

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -

Tasdawit Akli Muhend Ulhag - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Référence : ...../MM/ 2024

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

المرجع: .....م/م / 2024

# Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

Réalisé par :

BOUZINI Alla Eddine

## Thème

**Développement d'un système de Localisation d'une source sonore  
pour un Robot Mobil Autonome**

Soutenu le :10/07/2024

Devant le Jury composé de :

Mr : AMEZIANE Sadek

Univ. Bouira

Président

Mrs: KABLA Aida

Univ. Bouira

Examinateur

Mr : HAROUN Smail

Univ. Bouira

Encadreur

Année Universitaire : 2023-2024

# DÉDICACE

*Je consacre ce travail qui n'aurait jamais vu le jour sans le soutien indéfectible et illimité de mes chers parents qui continuent à me donner l'amour nécessaire pour arriver où je suis aujourd'hui. J'espère que Dieu vous protégera et que le succès sera toujours accessible à tous.*

## **JE DÉDIE AUSSI CE TRAVAIL À :**

- Mon fiancé
- Mes frères et sœurs
- Toute la famille Bouzini et la famille

*Ben Ali.*

- Tous mes amis et mes collègues.
- NACERI Mohamed, DJEMAOUNE  
Aissa, SAOUDI Hocine, SIRINE  
Oussama, FEDALLA Islam elhadj

**BOUZINI ALLA EDDINE**

---

## Remerciements

---

Nous remercions en premier lieu ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la foi et de nous avoir permis d'en arriver là

Nous tenons à exprimer nos remerciements et notre appréciation à Mr HAROUN Samil pour ses conseils et son soutien tout au long de cette période. Son expérience, ses précieux conseils, son écoute et ses encouragements nous ont permis de progresser et de surmonter les difficultés rencontrées.

Nous adressons nos plus vifs remerciements envers les membres du jury qui ont eu la gentillesse d'examiner attentivement notre travail

En conclusion, nous souhaitons exprimer nos remerciements les plus sincères à nos familles pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants tout au long de notre parcours d'étude.

# Résumé

## الملخص

تدرس هذه الأطروحة تصميم وتنفيذ نظام للكشف عن مصدر الصوت باستخدام مصفوفة من خمسة ميكروفونات ومحرك مؤازر. الهدف الرئيسي هو تحديد اتجاه مصدر الصوت في فضاء ثلاثي الأبعاد، مما يمهد الطريق للتطبيقات التفاعلية، المتقدمة. يقدم الفصل الأول المفاهيم الأساسية للصوتيات والميكروفونات وتحديد موقع الصوت. ويتناول الفصل الثاني التي تقيس التأخير الزمني بين TDOA بالتفصيل مختلف تقنيات تحديد موقع الصوت ثلاثي الأبعاد، ولا سيما طريقة وصول الصوت إلى الميكروفونات. وأخيراً، يتناول الفصل الثالث تفاصيل التنفيذ العملي للنظام، مع تحديد مكونات الأجهزة والبرمجيات المستخدمة. تقدم هذه الأطروحة دراسة متعمقة لتوطين مصدر الصوت ثلاثي الأبعاد باستخدام مصفوفات الميكروفونات، مما يوضح إمكانيات هذه التقنية للتطبيقات التفاعلية المبتكرة.

## Résumé

Ce mémoire étudie la conception et la mise en œuvre d'un système de détection de source sonore utilisant un réseau de cinq microphones et un servomoteur. L'objectif principal est d'identifier l'orientation de la source sonore dans un espace tridimensionnel, ouvrant la voie à des applications interactives avancées. Le premier chapitre introduit les notions fondamentales d'acoustique, de microphones et de localisation sonore. Le deuxième chapitre examine en détail les différentes techniques de localisation sonore 3D, notamment la méthode TDOA qui mesure le décalage temporel entre l'arrivée du son aux microphones. Enfin, le troisième chapitre détaille la réalisation pratique du système, spécifiant les composants matériels et logiciels utilisés. Ce mémoire offre une étude approfondie de la localisation de source sonore 3D par réseau de microphones, démontrant le potentiel de cette technologie pour des applications interactives innovantes.

## Abstract

This thesis studies the design and implementation of a sound source detection system using an array of five microphones and a servomotor. The main objective is to identify the orientation of the sound source in a three-dimensional space, paving the way for advanced interactive applications. The first chapter introduces the fundamental notions of acoustics, microphones and sound localization. The second chapter examines in detail the various 3D sound localization techniques, in particular the TDOA method, which measures the time lag between the arrival of sound at the microphones. Finally, the third chapter details the practical realization of the system, specifying the hardware and software components used. This dissertation offers an in-depth study of 3D sound source localization using microphone arrays, demonstrating the potential of this technology for innovative interactive applications.

---

# List des mots clés

---

## Les mots clés :

**GCC** : Corrélation croisée généralisée, **GCC-PHAT** : Generalized Cross-Correlation-PHASE Transform (Transformée de corrélation croisée généralisée), **ITD** : Interaural Time Difference (différence de temps interaurale), **ILD** : Différence de niveau interaurale, **MEMS** : Micro-Electro-Mechanical Systems, **SSL** : Sound Source Localization (localisation de la source sonore), **SRP-PHAT** : Streered Reponse Power-PHase Transform, **TDOA** : Différence de temps d'arrivée.

---

## Liste des matières

---

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
List des mots clés.....	IV
List des matières.....	V
List des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XI
Liste des Acronymes.....	XI
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>

### Chapitre 1 : Généralités Sur le Son et la Localisation de Source Sonore

1	INTRODUCTION.....	2
2	Notions sur l’acoustique .....	2
2.1	Qu’est- ce qu’une l’acoustique :.....	2
2.2	Qu’est- ce qu’un son :.....	3
2.2.1	Principe de la production d’un son : .....	3
2.2.2	Caractéristique d’un son : .....	4
3	Localisation source sonore .....	5
3.1	Localisation d’une source sonore chez l’être humain.....	5
3.2	La localisation des sources pour un robot.....	7
3.3	Localisation source sonore chez les animaux : .....	8
4	Les principales approches de la localisation d’une source sonore .....	9
5	Les microphones.....	10
5.1	Directivité et réponse fréquentielle .....	10
5.1.1	Les omnidirectionnels :.....	11
5.1.2	Les bi-directionnels : .....	11
5.1.3	Les cardioïdes :.....	12
5.1.4	Les hypercardioïdes :.....	12

5.1.5	Les directivités multiples : .....	13
5.2	Le réseau de microphones .....	14
5.3	L'espace entre microphones.....	15
5.4	Les types des microphones.....	16
5.4.1	Microphones électrodynamiques : .....	16
5.4.2	Microphones électrostatiques : .....	17
5.4.3	Microphones à électret : .....	17
5.4.4	Microphones à ruban : .....	18
5.4.5	Microphones de contact : .....	18
5.4.6	Microphones à zone de pression : .....	19
5.4.7	Microphones à réflecteur parabolique : .....	19
5.5	La sensibilité des microphones.....	20
5.6	Les types de microphones utilisés pour la localisation de sources sonores .....	21
6	Conclusion : .....	21

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

1	Introduction : .....	22
2	Méthodes de localisation des sources sonores .....	22
2.1	Energy-Based Localization .....	22
2.2	Temps d'arrivée (TOA) .....	23
2.3	Différence de temps d'arrivée (TDOA).....	23
2.4	Direction d'arrivée (DOA).....	24
2.5	Formation de faisceaux (Beamforming) .....	25
2.6	Différence d'intensité entre Microphones (IID) .....	26
2.7	Méthode d'ILD .....	26
2.8	La Méthode d'inter-corrélation simple .....	27
2.8.1	Principe de la méthode d'inter-corrélation simple.....	28
2.8.2	Difficultés et intérêt de la méthode d'inter-corrélation simple.....	29
2.9	Méthodes d'inter-corrélations généralisées.....	29
2.9.1	Choix de la méthode de localisation.....	30
2.9.2	Illustration pour une localisation sonore utilisant deux microphones .....	30
2.10	Steered Response Power (SRP).....	31

3	Localisation de la Source Sonore dans l'Espace 3D.....	32
3.1	Technologies.....	32
3.2	Caractéristiques de localisation du son.....	32
3.3	Méthodes de travail.....	33
3.4	Facteurs influençant le choix.....	34
3.4.1	Rapport coût-efficacité.....	34
3.4.2	Erreurs de mesure .....	35
3.4.3	Dissipation d'énergie.....	35
3.4.4	Problèmes de déploiement .....	35
3.4.5	Flexibilité du système .....	35
3.4.6	Évolutivité .....	36
4	Configurations de microphones .....	36
4.1	Algorithmes de localisation:.....	36
4.2	Défis et solutions : .....	37
4.3	Applications : .....	37
5	Conclusion .....	38

### **Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source**

1	Introduction :.....	39
2	Localisation de la source sonore à l'aide du réseau de microphones .....	39
2.2	Composants nécessaires.....	40
2.3	Étapes du projet .....	40
3	Présentation matrail.....	41
3.1	Présentation de Raspberry :.....	41
3.1.1	Spécification.....	42
3.2	Caméra raspberry :.....	43
3.3	Arduino nano :.....	44
3.1.1	spécifications :.....	44
3.4	Servo moteur SG90 :.....	45
3.4.1	Spécification :.....	45
3.5	KY-037 :.....	46



3.5.1	Description :	47
4	Softwar :	47
4.1	Configuration de raspberry pi 4 model b 8Gb.....	47
4.1.1	Préparer le Raspberry Pi :	47
4.1.2	Activation du SSH sur le Raspberry Pi.....	48
4.1.3	Activation du I2C (Inter-Integrated Circuit) :	48
4.1.4	Installer les dépendances :	49
4.1.5	Configurer la caméra :	49
4.1.6	Développer le script de reconnaissance faciale :	49
4.2	ARDUINO IDE :	50
4.2.1	Caractéristiques principales de l'IDE Arduino :	50
5	Programme pour Lecture des Signaux des Quatre Microphones :	52
6	Détection de la direction du microphone :	55
6.1	Comment fonctionne le son et comment fonctionne un microphone .....	56
6.2	Configuration du microphone :	56
6.3	Détection de l'orientation du microphone: .....	57
7	Conclusion :	57
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>58</b>
	<b>Référence .....</b>	<b>59</b>
	<b>Résumé .....</b>	<b>63</b>
	<b>Abstract .....</b>	<b>63</b>

---

## Liste des figures

---

### Chapitre 1

Figure 1- 1 : Echelle du bruit en db.....	2
Figure 1- 2 : Fréquence.....	4
Figure 1- 3 : La localisation spatiale des sons, principe du détecteur de coïncidence.....	6
Figure 1- 4: Le système auditif périphérique .....	7
Figure 1- 5 : Placement de quatre microphones sur la tête du robot .....	8
Figure 1- 6 : différence de temps intéraurale (ITD) .....	8
Figure 1- 7 : Représentation de technologies majeures pour la mesure d'un son .....	10
Figure 1- 8 : directivité des microphones .....	11
Figure 1- 9 : diagramme polaire omnidirectionnels .....	11
Figure 1- 10 : diagramme polaire bi-directionnels .....	12
Figure 1- 11 : diagramme polaire cardioïdes .....	12
Figure 1- 12 : diagramme polaire hypercardioïdes.....	13
Figure 1- 13 : Diagramme polaire de directivité multiples .....	13
Figure 1- 14 : réseau de microphones linéaires.....	14
Figure 1- 15 : Recouvrement spatial.....	16
Figure 1- 16 : microphones électrodynamiques .....	16
Figure 1- 17 : microphones électrostatiques .....	17
Figure 1- 18 : microphone a électret.....	17
Figure 1- 19 : microphone a ruban .....	18
Figure 1- 20 : Un micro-contact posé sur une guitare acoustique.....	18
Figure 1- 21 : Un microphone PZM.....	19
Figure 1- 22 : Microphone à réflecteur parabolique.....	19

### Chapitre 2

Figure 2- 1 : Localisation d'une source sonore par un réseau de 4 microphones .....	22
Figure 2- 2 : Application de méthode TDOA.....	24
Figure 2- 3 : Structure de l'estimation DOA .....	24
Figure 2- 4 : Méthode de calcul de la direction d'une source sonore .....	26

Figure 2- 5 : TDOA entre deux microphones .....	30
Figure 2- 6 : Réseau composé de deux microphones .....	31
Figure 2- 7 : Illustration de l'introduction pour un son .....	31
Figure 2- 8 : XYZO-AVS array.....	34

### Chapitre 3

Figure 3- 1 : Raspberry pi 4 model b.....	42
Figure 3- 2 : raspberry pi 4 model b pinout .....	43
Figure 3- 3 : Module de caméra 3 .....	44
Figure 3- 4 : Arduino Nano.....	45
Figure 3- 5 : Servo moteur SG90 .....	46
Figure 3- 6 : KY-037 .....	46
Figure 3- 7 : Installation Raspberry Pi Imager .....	47
Figure 3- 8 : Raspberry pi configuration .....	48
Figure 3- 9 : Activation SSH.....	48
Figure 3- 10 : Activation I2C .....	49
Figure 3- 11 : OpenCv .....	50
Figure 3- 12 : Logiciel Arduino IDE .....	52
Figure 3- 13 : Les microphones n'étaient pas connectés .....	53
Figure 3- 14 : Les microphones connectés .....	54
Figure 3- 15 : Localiser l'emplacement .....	54
Figure 3- 16 : Exemple de localiser 1er position.....	55
Figure 3- 17 : Exemple de localiser 2ème position .....	55
Figure 3- 18 : Réalisation de projet .....	56
Figure 3- 19 : fonctionnement de microphone.....	56
Figure 3- 20 : Installation des microphones.....	57

---

## Liste des tableaux

---

Tableau 3- 1 : Caractéristiques techniques de microphone KY-037 .....47

---

## Liste des Acronymes

---

<b>3D</b> : Trois-Dimensionnel	<b>m</b> : Mètre
<b><math>\alpha</math></b> : Angle	<b>mV</b> : Millivolt
<b>AVN</b> : Nœud Audio-Visuel	<b>N</b> : Nombre d'Échantillons
<b>AVS</b> : Capteurs Vectoriels Acoustiques	<b>OE</b> : Oreille Externe
<b>BLE</b> : Bluetooth Low Energy	<b>OI</b> : Oreille Interne
<b>c</b> : Vitesse du Son	<b>OM</b> : Oreille Moyenne
<b>cMUT</b> : Transducteurs Ultrasoniques	<b>P</b> : Puissance
Microélectromécaniques Capacitifs	<b>PA</b> : Pression Acoustique
<b>CLI</b> : Interface en Ligne de Commande	<b>PZM</b> : Microphone à Zone de Pression
<b>CSI</b> : Interface de Caméra Série	<b>PWM</b> : Modulation de Largeur d'Impulsion
<b>DC</b> : Courant Continu	<b>r<sub>m</sub></b> : Distance au Microphone
<b><math>\Delta t</math></b> : Différence de Temps	<b>ROS</b> : Système d'Exploitation pour Robots
<b>dB</b> : Décibels	<b>RSB</b> : Rapport Signal/Bruit
<b>dBu</b> : Décibels par rapport à 0,775 volts	<b>r</b> : Distance
<b>dBV</b> : Décibels par rapport à 1 volt	<b>S</b> : Signal
<b>DoA</b> : Direction d'Arrivée	<b>SLAM</b> : Localisation et Cartographie Simultanées
<b>DSI</b> : Interface d'Affichage Série	<b>SNR</b> : Rapport Signal/Bruit
<b>Fe</b> : Fréquence d'Échantillonnage	<b>SPI</b> : Interface Périphérique Série
<b>FFT</b> : Transformée de Fourier Rapide	<b>SPL</b> : Niveau de Pression Sonore
<b>FPGA</b> : Réseau de Portes Programmables sur le Terrain	<b>SSL</b> : Localisation de Sources Sonores
<b>GHz</b> : Gigahertz	<b>SRP-PHAT</b> : Puissance de Réponse Dirigée avec Transformée de Phase
<b>GCC</b> : Corrélacion Croisée Généralisée	<b>T</b> : Température
<b>GCC-PHAT</b> : Corrélacion Croisée Généralisée avec Transformée de Phase	<b>Te</b> : Temps d'Échantillonnage
<b>GPIO</b> : Entrée/Sortie Polyvalente	<b>TDOA</b> : Différence de Temps d'Arrivée
<b>HDMI</b> : Interface Multimédia Haute Définition	<b>TOA</b> : Temps d'Arrivée
<b>Hz</b> : Hertz	<b><math>\tau_m</math></b> : Temps de Retard pour le Microphone m
<b>I2C</b> : Circuit Intégré Interconnecté	<b><math>\tau_{mn}</math></b> : Différence de Temps d'Arrivée entre les Microphones m et n
<b>IDE</b> : Environnement de Développement Intégré	<b>Tx</b> : Transmission (dans le contexte MIMO)
<b>ILD</b> : Différence de Niveau Interaural	<b>UART</b> : Récepteur-Émetteur Asynchrone Universel
<b>ITD</b> : Différence de Temps Interaural	<b>USB</b> : Bus Universel en Série
<b>K</b> : Constante dans le Calcul de Puissance	<b>USB-C</b> : Bus Universel en Série Type-C
<b><math>\lambda</math></b> : Longueur d'Onde	<b>V</b> : Tension
<b>LED</b> : Diode Électroluminescente	<b>VR</b> : Réalité Virtuelle
<b>LPDDR4</b> : Double Taux de Données Basse Consommation	<b>WASN</b> : Réseaux de Capteurs Acoustiques sans Fil
4	<b>WiFi</b> : Fidelity sans Fil
<b>MEMS</b> : Systèmes Microélectromécaniques	
<b>MHz</b> : Mégahertz	
<b>mA</b> : Milliampère	



# **Introduction générale**

---

### Introduction générale

---

Des recherches approfondies ont été menées sur les mécanismes de localisation de sources sonores (SSL). La capacité de localiser les sources acoustiques est cruciale pour diverses applications, notamment les systèmes de téléconférence et d'amélioration de la parole. De plus, la localisation précise des sources est particulièrement importante dans les environnements présentant des niveaux élevés de bruit et de réverbération. Les stratégies utilisées pour la localisation des sources sonores remontent aux systèmes de localisation utilisés dans la technologie des radars et des sonars.

La localisation d'une source sonore (SSL) consiste à identifier l'emplacement géographique d'une source sonore. La SSL se divise en deux catégories principales : les approches directes et indirectes. Parmi toutes les positions de source, les approches directes sélectionnent le candidat le plus probable pour estimer l'emplacement de la source sonore. Alors que les méthodes indirectes reposent sur l'emplacement. Des méthodes comme la méthode d'inter-corrélation généralisée (GCC) développée par Knapp et Carter en 1976 [1], sont couramment employées pour les deux approches.

Une autre catégorie d'algorithmes de sécurité SSL cruciale repose sur un formateur de faisceau dirigé. Cependant, les techniques traditionnelles de faisceaux de direction utilisent des filtres pour améliorer les performances de localisation des signaux de réseaux.

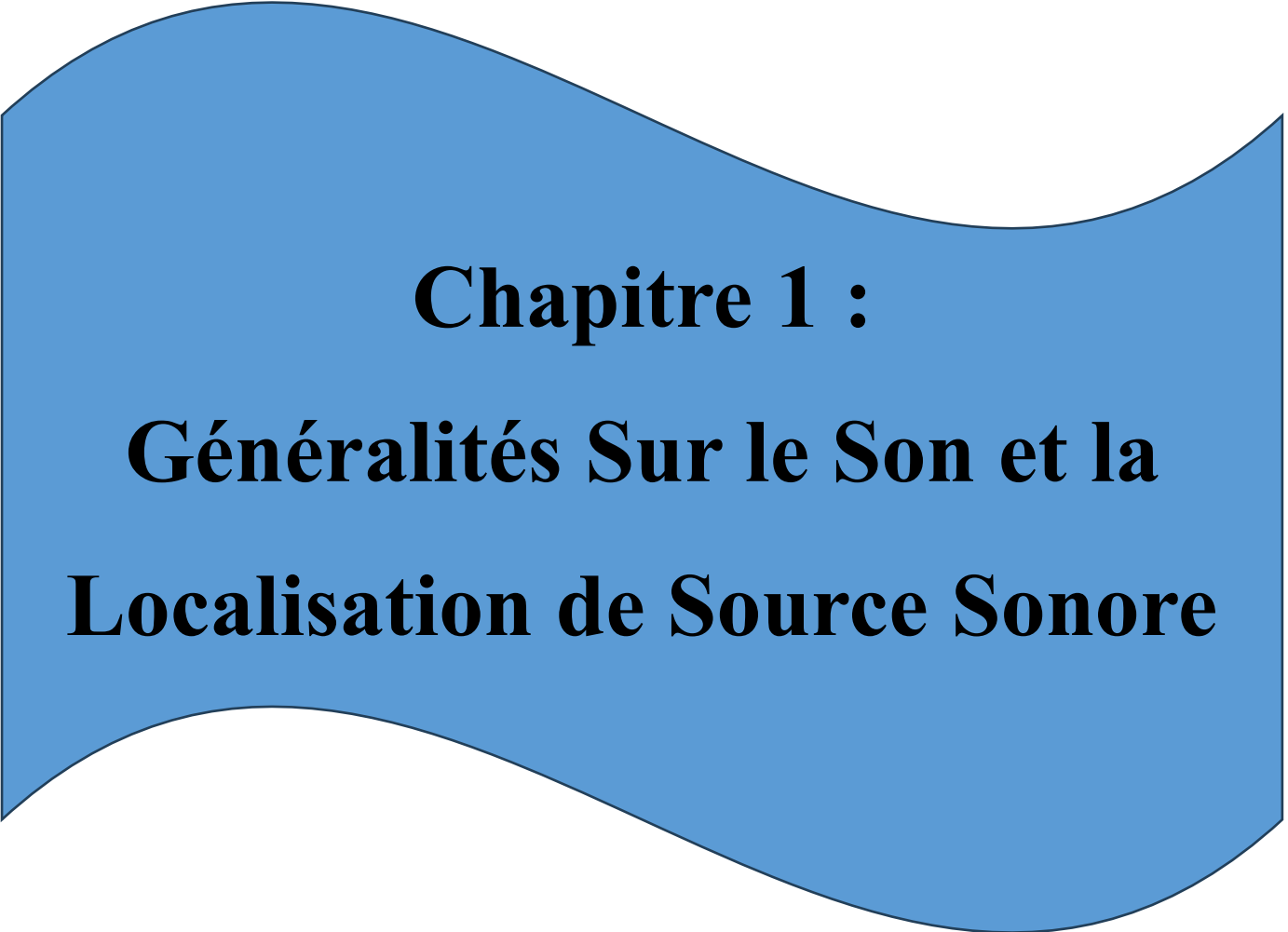
Actuellement, la méthode de localisation la plus appréciée est l'algorithme SRP-PHAT (Steered Response Power-PHAT, « puissance de réponse dirigée ») en raison de ses excellentes performances en environnement réel [2]. Cependant, la complexité des calculs de cette méthode rend sa mise en pratique en difficulté. Afin d'obtenir de meilleurs résultats en temps réel, nous avons choisi la méthode d'inter-corrélation généralisée (GCC-PHAT) qui est moins complexe à mettre en place.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres, tels que :

Dans le premier chapitre nous donnons des définitions générales sur la localisation de la source sonore et leurs principales approches.

Le deuxième chapitre les méthodes de la localisation des sources sonore.

Dans le troisième chapitre il présentera la mise en place de notre système, les divers logiciels et langages utilisés pour la réalisation du projet. De plus, ce chapitre exposera les tests, les résultats et les obstacles rencontrés lors de la réalisation de cette tâche.



**Chapitre 1 :**  
**Généralités Sur le Son et la**  
**Localisation de Source Sonore**

# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

## 1. INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre présente les concepts fondamentaux de l'acoustique et de la localisation des sources sonores. Nous explorerons les principes de base de la production et de la propagation des sons, ainsi que les mécanismes de localisation sonore chez les humains, les animaux et les robots. Une attention particulière sera portée aux différents types de microphones utilisés pour capter et analyser les sons

## 2. Notions sur l'acoustique

### 2.1 Qu'est-ce qu'une l'acoustique :

L'acoustique est une branche de la physique qui concerne la production sonore, ou vibrations, et la propagation des ondes dans des milieux comme l'eau ou le sol, et la perception du son par l'oreille. De ce fait, elle concerne la création, la propagation et la perception des sons, ainsi que les conséquences de ces sons sur les objets et les personnes. L'acoustique est utilisée dans de nombreux domaines, notamment la musique, le cinéma, l'architecture, la médecine et l'industrie [3].

L'acoustique fait l'objet de recherches dans plusieurs disciplines, notamment :

- **Acoustique musicale** : étude des propriétés sonores des instruments de musique et des systèmes sonores, ainsi qu'étude de la mélodie et de l'harmonie.
- **Acoustique architecturale** : étude des effets des bâtiments et des espaces sur la qualité du son, ainsi que conception de ces espaces pour améliorer la qualité de l'acoustique.
- **Acoustique industrielle** : étude des effets du son dans des industries comme l'aviation, la marine et les transports, ainsi que la réduction du bruit dans ces domaines.
- **Acoustique de l'environnement** : étude des effets des sons sur l'environnement, notamment dans le domaine des nuisances sonores et de la préservation de la faune et de la flore [3].



Figure 1- 1 : Echelle du bruit en db



# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

## 2.2 Qu'est- ce qu'un son :

Le son est dérivé des fluctuations de pression d'un environnement élastique, tel que l'air, l'eau ou des solides, provoquées par une surface vibrante ou un écoulement turbulent de fluides. Dans l'air, le son se propage lorsque la pression change. Dans les solides, elle s'exprime généralement sous forme de vibrations de type atomique. La vitesse du son dans l'air à 20 degrés Celsius est d'environ 344 mètres par seconde, mais elle est plus rapide dans l'eau (1482 mètres par seconde) et dans l'acier (5050 mètres par seconde). Le son ne voyage pas dans un appareil, celui-ci est un isolant phonique exceptionnel. Les anciens Grecs et Romains considéraient la propagation du son dans la conception des théâtres en plein air [4].

### 2.2.1 Principe de la production d'un son :

L'idée derrière la production sonore est la vibration d'une source sonore qui produit des ondes mécaniques qui voyagent à travers un support matériel, ce qui permet la transmission du son.

- **Un émetteur :** Il est à l'origine du son. Un haut-parleur peut être alimenté par un générateur basse-fréquence ou un diapason, par exemple.
- **Un milieu de propagation :** Le son se répand à travers un environnement, qu'il s'agisse de l'air, de l'eau ou même d'un solide tel qu'une barre de fer.

Différentes sources peuvent être utilisées pour produire des sons, qu'elles soient humaines, mécaniques ou naturelles.

Voici quelques illustrations :

- **Production humaine :** La voix humaine se produit grâce à l'utilisation de leur larynx, de leurs cordes vocales et de leurs résonateurs (bouche, nez, etc.). Cela englobe la parole, la musique et les hurlements, Les musiciens utilisent des instruments de musique tels que la guitare, le piano, la flûte, etc., afin de créer des sons mélodieux. Les oiseaux chantent et communiquent en utilisant leur syrinx (l'équivalent de notre larynx).
- **Production mécanique :** Les machines, les ordinateurs et les dispositifs électroniques génèrent des sons lors de leur fonctionnement. Une imprimante, un moteur de voiture ou un haut-parleur sont des exemples. Les instruments de musique électroniques, tels que les synthétiseurs, produisent des sons en utilisant des circuits électroniques.
- **Bruit :** Le bruit correspond à un son indésirable ou non maîtrisé. Il peut être issu de différentes origines, comme le trafic, les travaux de construction, les équipements domestiques, etc.

# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

## 2.2.2 Caractéristique d'un son :

### a) Fréquence

La fréquence du son correspond au nombre total d'oscillations que l'onde sonore réalise en une seconde. Elle s'exprime en fréquence hertz. À mesure que la fréquence augmente, le son devient plus fort. La fréquence des sons graves est inférieure à 20 Hz, tandis que celle des sons moyens est comprise entre 500 et 3000Hz. En musique, la fréquence est généralement appelée « hauteur ». [3]

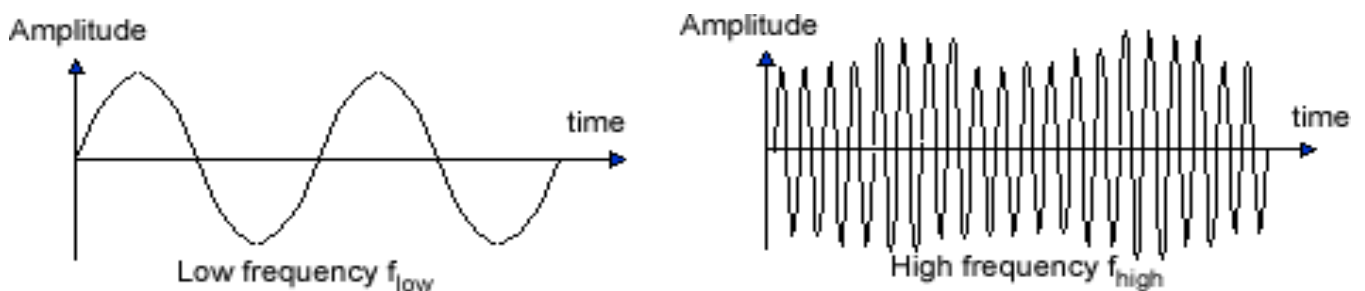


Figure 1- 2 : Fréquence

### b) Longueur d'onde

La fréquence d'onde (exprimée en  $\lambda$ ), La distance entre deux points de la courbe d'onde dans une position donnée est appelée longueur d'onde. On la mesure en mètres. La longueur d'onde des sons aériens varie de 17 mètres à 17 millimètres, selon la fréquence du signal.

$$\lambda = c / f$$

**C** : célérité (340m/s à 20°C)

**f** : fréquence en Hertz.

### c) Période

La période est le temps qu'il faut à l'onde pour effectuer une oscillation complète. Elle est l'inverse de la fréquence et se mesure en secondes.

### d) Vitesse

La vitesse du son dépend de la longueur d'onde et de sa fréquence. Elle varie également en fonction du milieu de propagation (par exemple, Dans l'air : 344 m/s, Dans l'eau : 1482 m/s, Dans l'acier : 5050 m/s) . Plus le milieu est dense, plus la vitesse du son est élevée.

## Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

### e) Célérité et vitesse de propagation :

La vitesse de propagation du son (sa rapidité) sera influencée par la densité du milieu et la température. En raison de la densité du milieu, le son se propagera plus rapidement. Comme la température augmentera, le son se propagera plus rapidement. À une température de 0°C, le son dans l'air atteint une vitesse de 330m/s. À 20°C, le son dans l'air atteint une vitesse de 340m/s. Cette valeur est la plus couramment employée dans les calculs [5].

### f) L'intensité du son, ou niveau sonore :

L'intensité ou le volume du son est évalué en fonction de l'amplitude (ou de la hauteur) des ondes sonores. L'intensité sonore est mesurée en décibels. C'est une mesure des changements de pression. Le seuil sonore minimum correspond à 0 dB = 20 mPa, Le seuil de douleur est de 130/140 décibels. Faites-vous savoir quoi, Représente une valeur en décibels, qui correspond au niveau de bruit que vous pouvez entendre.

### g) Timbre :

Quand la même note est jouée sur des instruments différents, le son n'est pas le même. Les harmoniques sont les multiples entiers des fréquences qui correspondent aux notes. Par exemple, la fréquence de la note « La » est de 440Hz, tandis que 880Hz est une harmonique du « La ». L'intensité et la quantité de ces harmoniques sont responsables de la distinction des sons et de la reconnaissance des voix de personnes qui s'expriment [6].

## 3 Localisation source sonore

La localisation d'une source sonore est généralement le processus permettant de déterminer la direction et la distance à partir de laquelle un son est émis dans un environnement. Pour ce faire, le système utilise différents indices acoustiques pour estimer la localisation spatiale de la source sonore. Les mécanismes de localisation sonore peuvent varier en fonction de l'environnement, comme chez les humains, les robots ou d'autres systèmes, et inclure les techniques suivantes :

**a) Analyse du décalage horaire d'arrivée :** utilisez le décalage horaire entre le son atteignant les deux oreilles pour estimer la direction de la source sonore.

**b) Utilisation des réflexions sonores :** les réflexions sonores sont utilisées pour déterminer l'emplacement d'une source sonore en fonction de la distance et de l'angle d'incidence.

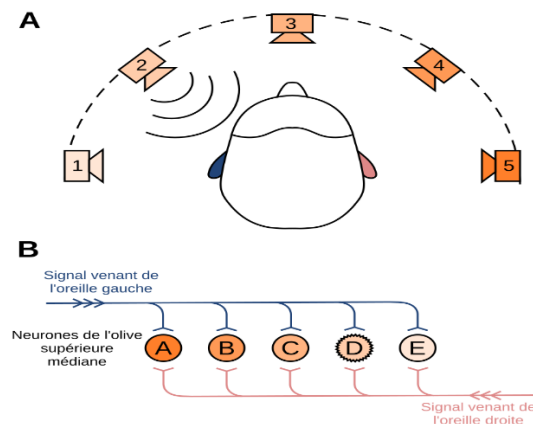
**c) Utilisation de réseaux de capteurs sonores :** les réseaux de capteurs sonores sont utilisés pour trianguler l'emplacement des sources sonores en fonction des signaux reçus par chaque capteur.

# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

Dans différents secteurs, comme la robotique mobile, la médecine auditive et l'aide à domicile, ces méthodes sont employées afin d'améliorer la précision de la localisation et de proposer des applications concrètes comme la localisation d'un tireur embusqué ou l'identification de sources de pollution sonore dans un environnement complexe [7-8].

## 3.1 Localisation d'une source sonore chez l'être humain

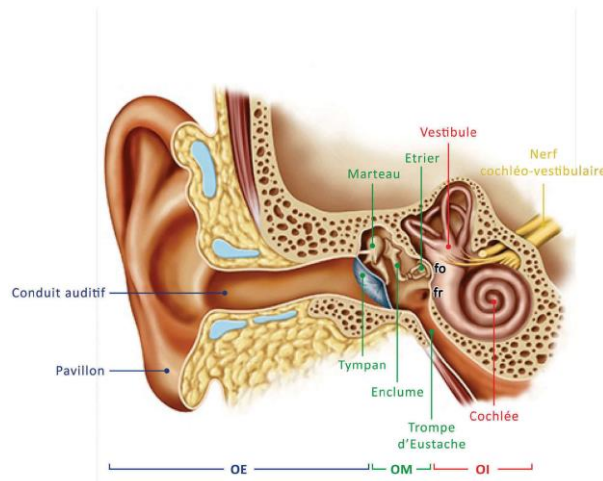
La structure de l'oreille humaine est complexe et se compose de trois parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne. Chaque composante joue des fonctions particulières dans la collecte et la conversion des sons.



**Figure 1- 3 :** La localisation spatiale des sons, principe du détecteur de coïncidence

- **L'oreille externe :** qui comprend le pavillon et le conduit auditif, recueille, amplifie et envoie les sons sous forme de vibrations vers le conduit auditif et le tympan. Elle est cruciale pour le recueillement des sons et la préservation du tympan.
- **Oreille moyenne :** L'oreille moyenne amplifie et transforme les vibrations aériennes en vibrations solidiennes pour les transmettre à l'oreille interne. Elle protège également l'oreille interne des sons trop puissants en limitant l'amplification [9].
- **Oreille interne :** Une fois les vibrations transmises à l'oreille interne, cette dernière transforme le son en signaux nerveux interprétables par le cerveau. La cochlée, partie cruciale de l'oreille interne, convertit l'énergie mécanique en signaux électriques complexes qui sont ensuite transmis au cerveau pour interprétation [9].

# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore



**Figure 1- 4:** Le système auditif périphérique

## Remarque

Il permet la transformation des vibrations sonores en un signal bioélectrique, interprétable par le système auditif central. Le système périphérique est constitué de trois compartiments : l'oreille externe (OE), l'oreille moyenne (OM) et l'oreille interne (OI). L'oreille externe (constituée du pavillon et du conduit auditif externe), est délimitée à son extrémité par une membrane souple, le tympan, qui la sépare de l'oreille moyenne. L'oreille moyenne comporte une chaîne de trois osselets liés les uns aux autres : le marteau, l'enclume puis l'étrier. Elle communique avec le milieu extérieur via la trompe d'Eustache qui assure l'équilibre de pression de part et d'autre du tympan. Enfin, l'oreille interne est constituée du vestibule (organe de l'équilibre) et de la cochlée (organe de l'audition). Cette dernière est enroulée dans une paroi osseuse, avec deux ouvertures vers l'oreille moyenne : la fenêtre ovale (fo) et la fenêtre ronde (fr). Ces fenêtres sont fermées par une membrane, avec un contact permanent de la plaque de l'étrier sur la membrane de la fenêtre ovale. Dessin Kristen Wienandt Marzeion – Medical Illustration Sourcebook.

## 3.2 La localisation des sources pour un robot

En réalité, la recherche en robotique se concentre sur la localisation des sources sonores pour les robots. Ces derniers utilisent des techniques de traitement du signal audio avancées ainsi que des réseaux de capteurs sonores pour repérer et localiser les sources sonores dans leur environnement. Il est essentiel que les robots puissent localiser leur environnement de manière autonome, interagir avec leur environnement et répondre à des stimuli sonores particuliers. Les études menées dans ce domaine ont pour objectif d'améliorer la précision, la solidité et l'efficacité des systèmes de localisation sonore afin de les utiliser de manière pratique et dans différentes applications en robotique [10].

La localisation des sources sonores pour un robot est un domaine de recherche actif en robotique. Voici quelques points clés :

## Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

- **Microphones** : Pour que l'interaction d'un robot avec son environnement semble la plus humaine possible, l'intégration de deux microphones correspondant à des tympanes sur le robot est souvent nécessaire [10].

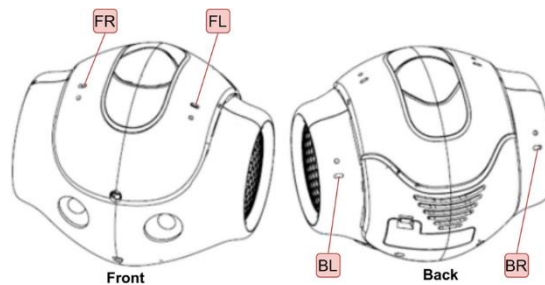


Figure 1- 5 : Placement de quatre microphones sur la tête du robot

- **Mesure de l'angle** : La mesure de l'angle  $\alpha$  est nécessaire pour que le robot puisse se tourner vers son interlocuteur. La détermination de  $\alpha$  repose sur le principe de la mesure de différence de temps interaurale, comme le cerveau humain [11].
- **Différence de temps interaurale (ITD)** :

La différence de temps d'arrivée d'une onde sonore à chaque microphone est un indice important pour estimer la position d'une source dans le plan horizontal [10].

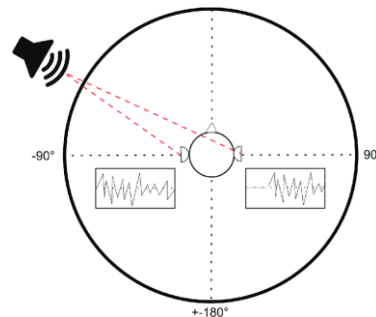


Figure 1- 6 : différence de temps interaurale (ITD)

- **Comparaison interaurale** : Le principal indice utilisé pour la localisation sonore est la comparaison interaurale, qui est la différence de niveau et de délai [10].
- **Cartographie et localisation simultanées (SLAM)** : Pour un véhicule robotique ou un système autonome, SLAM est le terme désignant une méthode permettant simultanément de créer une carte de l'environnement et de s'y localiser. Ceci est également connu sous le nom de CML ou SLAM.

### 3.3 Localisation source sonore chez les animaux :

La localisation des sources sonores chez les animaux est proche de celle des robots, mais elle présente également des différences significatives.

## Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

a) **Utilisation des indices binauraux** : Les animaux, comme les robots, utilisent les variations de temps d'arrivée (ITD) et d'intensité (ILD) entre les deux oreilles pour repérer les sources sonores dans le plan horizontal. On retrouve cette faculté de localisation binaurale chez de nombreuses espèces animales, telles que les mammifères et les oiseaux.

b) **Rôle de l'anatomie** : La configuration et les dimensions de la tête, des oreilles et autres éléments ont un impact sur la manière dont les animaux perçoivent l'espace sonore, tout comme chez les êtres humains. Ces particularités anatomiques sont adaptées aux exigences spécifiques de chaque espèce (chasse, communication, etc.).

c) **Intégration multimodale** : Contrairement aux robots, les animaux combinent les sons avec d'autres sens tels que la vue, l'odorat, etc., pour repérer d'où proviennent les bruits. Cette capacité à intégrer plusieurs modalités sensorielles est cruciale pour la survie et les interactions sociales des animaux dans leur milieu naturel.

d) **Apprentissage et adaptation** : Les animaux perfectionnent leur capacité à localiser les sons en fonction de leur environnement au fil de leur développement, contrairement aux robots qui nécessitent une programmation spécifique pour cette tâche. Ainsi, la localisation des sources sonores chez les animaux repose sur des mécanismes semblables à ceux des robots, mais dans un cadre écologique et évolutif plus vaste, incluant des capacités d'intégration multimodale et d'adaptation aux conditions environnementales [12].

### 4 Les principales approches de la localisation d'une source sonore

La localisation spatiale des sources sonores utilise des microphones non directifs et un traitement numérique des signaux. Trois approches existent :

- **Estimation spectrale** : basée sur la matrice de corrélation des signaux, adaptée aux signaux à bande étroite, mais exigeante en calcul.
- **Estimation des décalages temporels (TDOA)** : via PHAT-GCC, légère en calcul, mais sensible au bruit et à la réverbération.
- **Synthèse de faisceau acoustique** : sensible au bruit et à la réverbération, sauf pour certaines variantes nécessitant une forte puissance de calcul.

L'invention propose un procédé robuste au bruit et à la réverbération, léger en calcul, adapté aux systèmes embarqués. Ce procédé comprend :

- Capture des signaux par plusieurs microphones.
- Calcul d'inter-corrélations généralisées.
- Maximisation de la puissance de réponse dirigée.
- Estimation de la direction de la source sonore via les différences de temps inter-

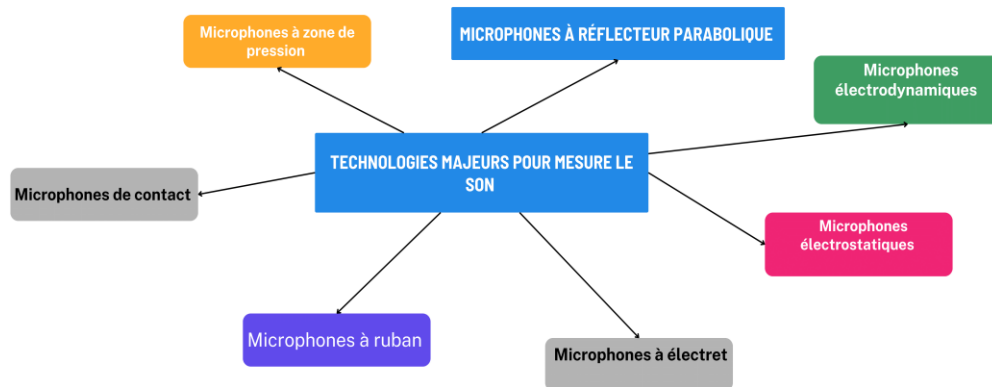
# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

auriculaires.

## 5 Les microphones

Le traitement du signal d'un réseau de microphones peut être influencé par la géométrie et la taille du réseau, ainsi que par le nombre de microphones. De plus, le choix des microphones utilisés joue un rôle crucial. Dans cette étude, il est possible d'utiliser deux types différents de microphones, à savoir omnidirectionnels et unidirectionnels, dont les différentes caractéristiques seront abordées dans cette section.

La perception courante de l'espace sonore repose sur la position des sources, leur azimut, leur profondeur et leur élévation. Les signaux sonores, comme un sifflet ou un claquement, sont des vibrations qui se produisent dans l'air, leur fréquence et leur amplitude leur sont propres. Pour les modifier, il faut les convertir en signaux électriques. L'oreille humaine possède un spectre sonore sensible aux fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz, la plus grande sensibilité se situant autour de 3 kHz, la fréquence de la voix. La fréquence d'un son est directement liée à sa hauteur (basse/aiguë) et à son intensité, qui se mesure en décibels acoustiques (dBA) [13].



**Figure 1- 7 :** Représentation de technologies majeures pour la mesure d'un son

### 5.1 Directivité et réponse fréquentielle

La directivité des microphones est une caractéristique importante qui décrit comment ils captent le signal en fonction de l'angle d'incidence de l'onde sonore. Les microphones omnidirectionnels captent le signal de la même manière dans toutes les directions, tandis que les microphones à ruban et cardioïdes présentent des diagrammes polaires en forme de « 8 » et de coeur respectivement. Les microphones hypercardioïdes ont la directivité la plus prononcée vers l'avant, et certains microphones proposent de multiples directivités.



# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

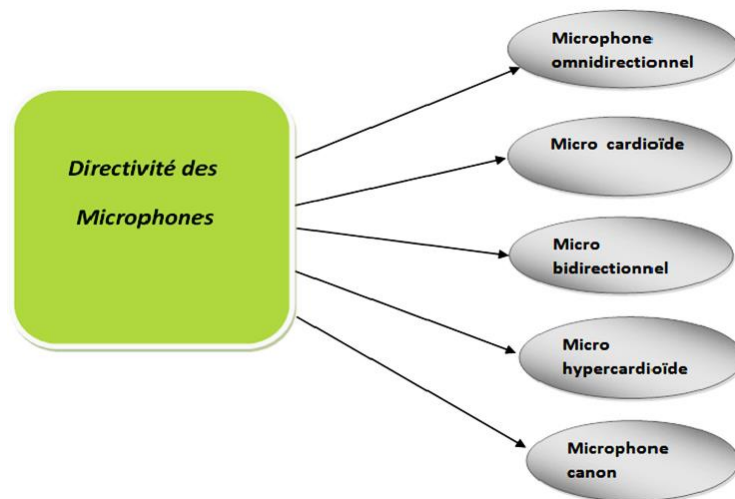


Figure 1- 8 : directivité des microphones

## 5.1.1 Les omnidirectionnels :

- Les micros omnidirectionnels captent le signal de la même manière dans toutes les directions.
- Le diagramme polaire des micros omnidirectionnels pour 1 kHz correspond à un cercle.
- Les microphones omnidirectionnels portent un cercle miniature sérigraphié à proximité de la capsule pour renseigner l'utilisateur sur la directivité du micro.

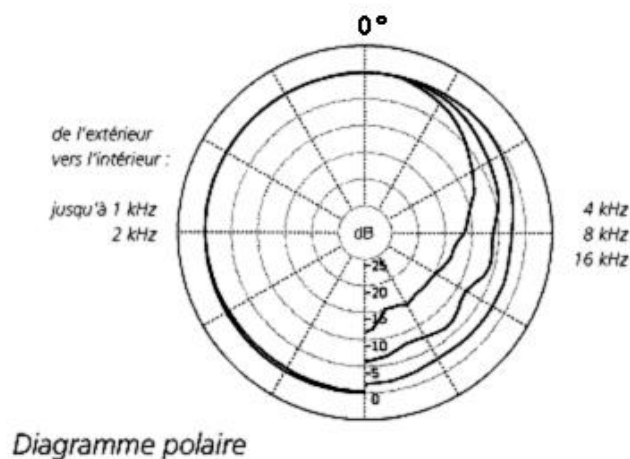


Figure 1- 9 : diagramme polaire omnidirectionnels

## 5.1.2 Les bi-directionnels :

- Les microphones à ruban présentent un diagramme polaire en forme de « 8 », avec deux lobes en opposition de phase centrés sur la capsule de part et d'autre des deux faces du ruban.
- Le diagramme suivant est typique d'un capteur à gradient de pression comme le microphone

# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

à ruban.

- Les capsules bi-directionnelles portent une sérigraphie représentant le signe « ¥ ».

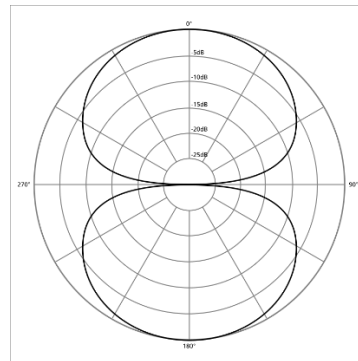


Figure 1- 10 : diagramme polaire bi-directionnels

## 5.1.3 Les cardioïdes :

- Mathématiquement, la réponse omnidirectionnelle est représentée par 1 et la réponse bi-directionnelle par  $\cos q$ .
- La réponse cardioïde correspond théoriquement à  $1 + \cos q$ .
- Le diagramme polaire des microphones cardioïdes a une forme de coeur.
- La courbe au trait plein sur la partie gauche du diagramme correspond aux mesures réalisées pour 1 kHz, ce qui correspond aussi au modèle théorique.

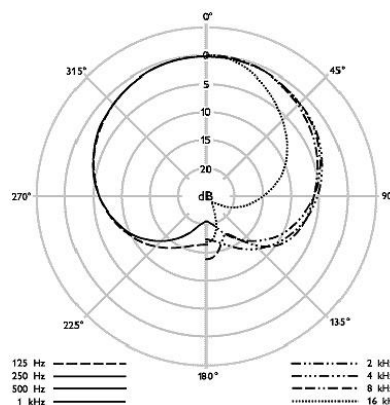


Figure 1- 11 : diagramme polaire cardioïdes

## 5.1.4 Les hypercardioïdes :

- Mathématiquement, le diagramme polaire est représenté par  $\frac{1}{2} + \cos q$ , c'est la combinaison d'une réponse omnidirectionnelle atténuée de 6 dB et d'une réponse bi-directionnelle.
- Le comportement des microphones hypercardioïdes à l'usage se rapproche beaucoup de la

## Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

réponse théorique.

- C'est aussi le microphone qui a la directivité la plus prononcée vers l'avant : le rapport de niveau sonore entre le signal capté dans l'axe et en dehors est très grand, ce qui permet d'éliminer les sons environnants une source sonore vers laquelle pointe le micro.

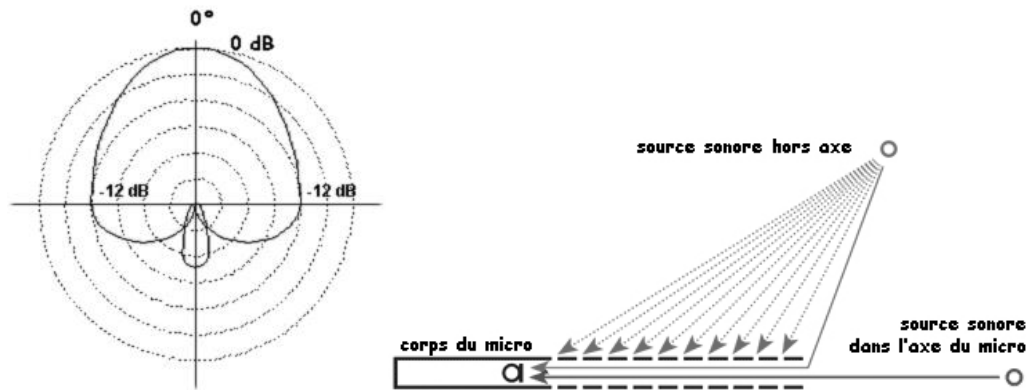


Figure 1- 12 : diagramme polaire hypercardioïdes

### 5.1.5 Les directivités multiples :

- Certains microphones proposent de multiples directivités.
- Il peut être obtenu en adaptant plusieurs capsules sur un même corps de microphone.
- Le micro dispose d'une seule capsule (et membrane) et des labyrinthes acoustiques modulables mécaniquement changent la directivité.
- Deux capteurs sont associés et mis en opposition de phase. La combinaison des deux réponses permet d'obtenir des directivités intermédiaires.

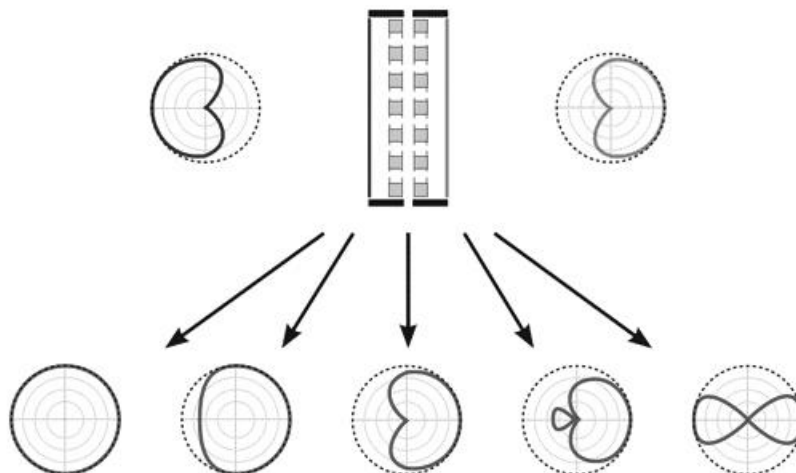
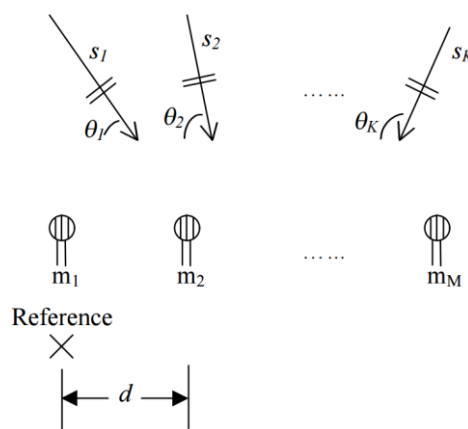


Figure 1- 13 : Diagramme polaire de directivité multiples

# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

## 5.2 Le réseau de microphones

Les réseaux de microphones ont été étudiés et mis en place il y a plus de 30 ans. Grâce à la recherche et aux expériences menées jusqu'à présent, le domaine a évolué au point que la technologie basée sur le réseau peut être immédiatement utilisée dans de nombreux systèmes actuels et présente un immense potentiel pour améliorer les produits existants et concevoir de futurs appareils. Le réseau de capteurs sonores est constitué d'un ensemble de capteurs sonores disposés à divers endroits pour recevoir un signal transmis par des ondes de propagation. La disposition d'un réseau de microphones linéaire est illustrée dans la figure (1.14), avec M microphones et K signaux incidents provenant des angles d'arrivée  $\theta_K$  [8].



**Figure 1- 14 :** réseau de microphones linéaires

Selon cette analyse, les ondes incidentes sont considérées comme des ondes planes. Les signaux seront donc transmis à chaque microphone  $s_k$ , mais ils seront des versions retardées ou avancées dans le temps. Afin de calculer la phase de chaque signal, il est nécessaire d'avoir un point de référence pour notre système de coordonnées AVN. Nous optons pour le microphone 1 comme source. Les deux microphones sont distants d'un (voir la figure 1.14). Le temps de réponse correspondant à chaque microphone est donc de : Le retard correspondant  $\tau_i$  à chaque microphone est alors :

$$\tau_i = \frac{d_i \cos \theta_k}{v} \quad (1.1)$$

Où  $v$  est la vitesse du son (343m/s) est  $d_i$  est la distance entre la référence (l'origine) est l'ième microphone.

L'entrée a l'ième microphone du signal du signal  $s_k$  est donc :

$$x_i(t) = s_k(t - \tau_i) \quad (1.2)$$

## Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

Dans un scénario a bande étroite, petites variations autour de  $\lambda$ , le retard peut être exprimé par un simple déphasage :

$$x_i(\mathbf{t}) = s_k(\mathbf{t})e^{-j\omega_0\tau_i} \quad (1.3)$$

Qui est équivalent à

$$x_i(\mathbf{t}) = s_k(\mathbf{t})e^{-jk d \cos \theta_k} \quad (1.4)$$

Ou  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  est le nombre d onde.

La représentation de (1.3) est plus simple à utiliser que la représentation (1.2). Maintenant si on veut voir une représentation générale on doit introduire tous les signaux, et inclure aussi le bruit à chaque microphone :

$$x_i(\mathbf{t}) = \sum_{k=1}^k s_k(\mathbf{t})e^{-jk d \cos \theta_k} + n_i(\mathbf{t}) \quad (1.5)$$

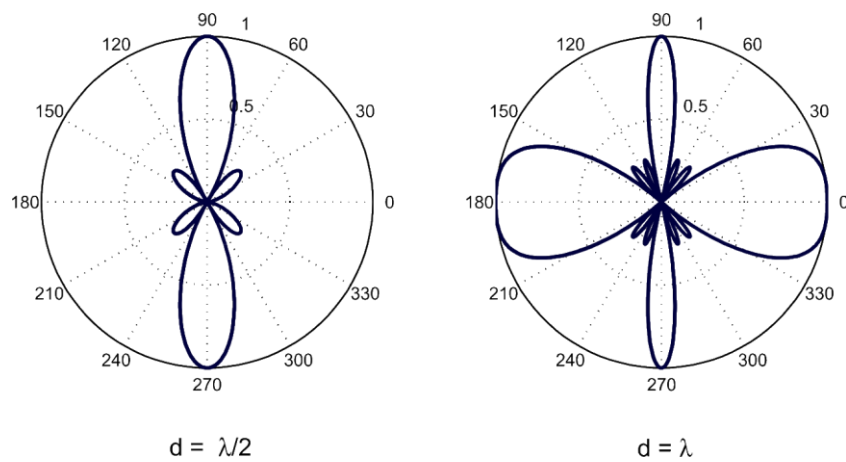
### 5.3 L'espace entre microphones

L'une des caractéristiques d'un réseau est la diminution de la largeur du faisceau à mesure que l'espace augmente. Ainsi, afin d'obtenir un faisceau plus précis, il est possible d'augmenter simplement l'espace, ce qui entraîne une ouverture de réseau plus grande, mais il est essentiel de toujours éviter le recouvrement spatial (aliasing) engendré par ce dernier. Le recouvrement de l'espace provoque l'émergence de lobes parasites dans le diagramme de directivité, connus sous le nom de lobes de grille, comme le montre la (figure 1.15). Dans la bande des fréquences qui nous intéresse, il est nécessaire d'avoir un déphasage entre deux microphones adjacents situés dans l'intervalle  $[-\pi, \pi]$ . Le déphasage de l'équation (1.4) peut être calculé :

$$\phi_k = \frac{2\pi d \cos \theta_k}{\lambda} \quad (1.6)$$

On veut  $\phi_k$  entre  $-\pi$  et  $\pi$ , donc  $d < \lambda \min(1.6) 2$  où  $\min$  est le minimum des longueurs d'onde des signaux reçus, sinon on va avoir plus d'un lobe principal. Par conséquent la distance d'espace critique requise pour traiter les signaux dans la bande passante de la parole Bs (300-3400 Hz) est  $d = 5$  cm. Par analogie à la théorie de Nyquist, ce résultat peut être exprimé comme un théorème d'échantillonnage spatial [8].

## Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore



**Figure 1- 15 :** Recouvrement spatial

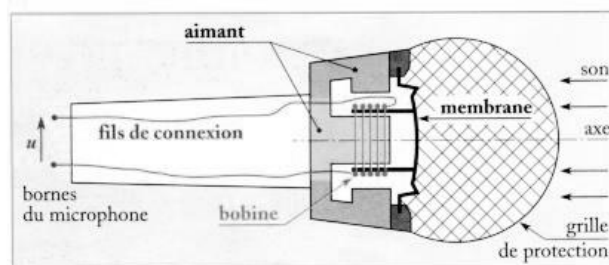
**Note :** **Figure 1-15 :** Recouvrement spatial diagramme polaire du diagramme de directivité d'un réseau de microphone linéaire avec quatre éléments, en fonction de la direction horizontale  $\theta$  ; Avec un échantillonnage spatial critique,  $d = \lambda/2$  (gauche), et avec des effets d'alias pour  $\lambda$  (à droite).

### 5.4 Les types des microphones

Voici un résumé des principaux points sur les microphones électrodynamiques, électrostatiques, à électret, à ruban, de contact, à zone de pression et à réflecteur parabolique :

#### 5.4.1 Microphones électrodynamiques :

- Fonctionnent par induction électromagnétique
- Membrane solidaire de la bobine se déplace dans l'entrefer d'un aimant permanent
- Sensibilité : typiquement entre -60 et -50 dBV/Pa
- Pression acoustique maximale : 180 dB SPL environ
- Utilisation : spectacles vivants, batteries et percussions, chant [15].



**Figure 1- 16 :** microphones électrodynamiques

# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

## 5.4.2 Microphones électrostatiques :

- Fonctionnent par variation de la distance entre les armatures d'un condensateur
- Membrane très légère et conductrice
- Sensibilité : -45 à -30 dBV/Pa,
- pression acoustique maximale : 130 dB SPL environ
- Utilisation : prises de son en studio, voix, instruments acoustiques [15].

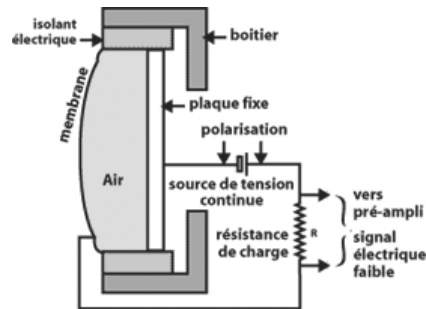


Figure 1- 17 : microphones électrostatiques

## 5.4.3 Microphones à électret :

- Fonctionnent par charge électrostatique permanente sur la membrane
- Sensibilité : -60 à -54 dBV/Pa
- Pression acoustique maximale : < 140 dB SPL
- Utilisation : miniaturisation, coût modique, prises de son en studio [15].

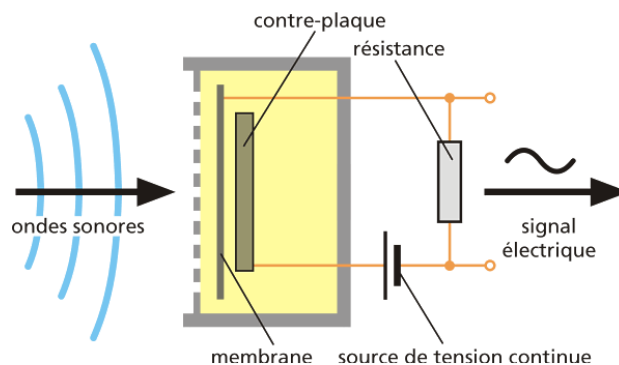


Figure 1- 18 : microphone a électret

## Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

### 5.4.4 Microphones à ruban :

- Fonctionnent par déplacement d'une fine feuille métallique dans l'entrefer d'un aimant
- Sensibilité : -60 à -54 dBV/Pa
- Pression acoustique maximale : < 140 dB SPL
- Utilisation : prises de son d'instruments acoustiques, ensembles classiques [15].

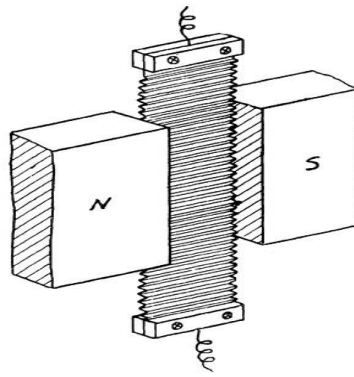


Figure 1- 19 : microphone a ruban

### 5.4.5 Microphones de contact :

- Fonctionnent par propriété de polarisation électrique des corps sous contrainte mécanique
- Sensibilité : non spécifiée
- Pression acoustique maximale : non spécifiée
- Utilisation : prises de son d'instruments vibrants [15].

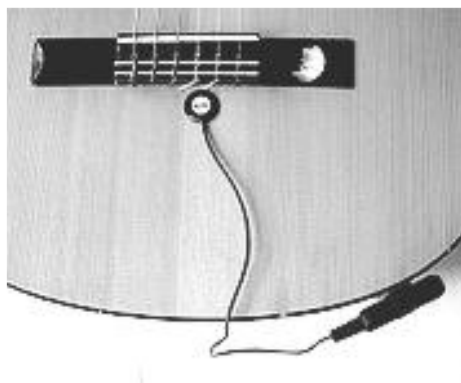


Figure 1- 20 : Un micro-contact posé sur une guitare acoustique



# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

## 5.4.6 Microphones à zone de pression :

- Fonctionnent par plaque de 15 cm de diamètre placée sur de larges surfaces
- Sensibilité : non spécifiée
- Pression acoustique maximale : non spécifiée
- Utilisation : prises de son sur scène, sous le couvercle d'un piano [15].

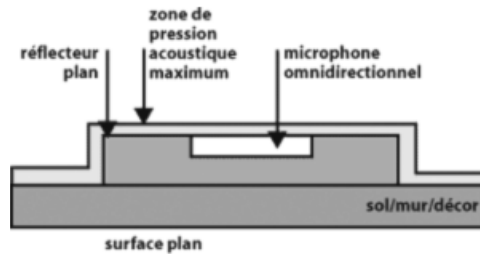


Figure 1- 21 : Un microphone PZM

## 5.4.7 Microphones à réflecteur parabolique :

- Fonctionnent par capsule de microphone placée sur le foyer d'un réflecteur parabolique
- Sensibilité : non spécifiée
- Pression acoustique maximale : non spécifiée
- Utilisation : enregistrement d'oiseaux, manifestations sportives [15].

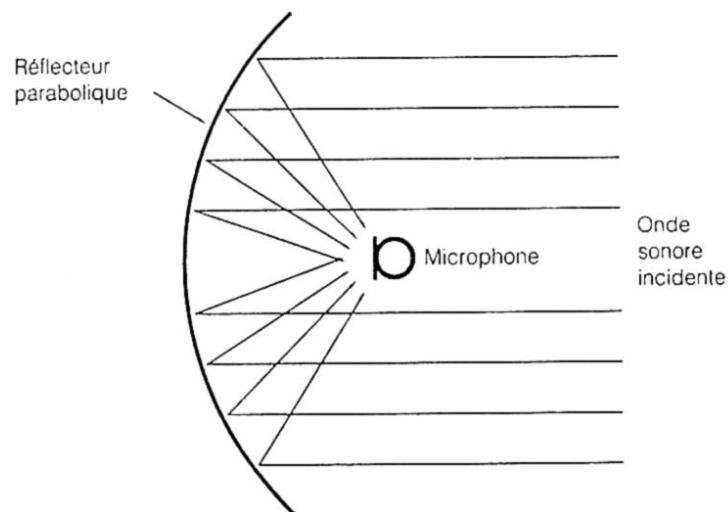


Figure 1- 22 : Microphone à réflecteur parabolique

## Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

En résumé, chaque type de microphone a ses caractéristiques spécifiques, telles que la sensibilité, la pression acoustique maximale et l'utilisation.

### 5.5 La sensibilité des microphones

#### a) Mesure de la sensibilité :

- Utilisation d'un signal d'1 kHz avec un niveau porté jusqu'à 74 dB SPL ou 94 dB SPL
- Mesure de la pression acoustique correspondante : 1  $\mu\text{B}$  (micro Bar) pour 74 dB SPL et 1 Pa pour 94 dB SPL (SPL pour Sound Pressure Level, ou niveau de pression acoustique).
- Gain de 20 dB entre 1  $\mu\text{B}$  et 1 Pa
- Notations pour exprimer la sensibilité : mV/ Pa, mV/  $\mu\text{B}$ , dBu/ Pa, dBV/ Pa [15].

#### b) Unités de mesures :

- mV/ Pa ou mV/  $\mu\text{B}$  pour exprimer la sensibilité en fonction de la pression acoustique
- dBu/ Pa ou dBV/ Pa pour exprimer la sensibilité en fonction de la tension de référence.

#### c) Sensibilité des microphones :

- Microphones électrostatiques : 5 à 25 mV/ Pa soit -45 à -30 dBV/ Pa
- Microphones électrodynamiques : 1 à 3 mV/ Pa soit -60 à -50 dBV/ Pa
- Microphones à ruban : 1 à 2 mV/ Pa soit -60 à -54 dBV/ Pa [11].

#### d) Ordres de grandeurs :

- Les microphones électrostatiques sont les plus sensibles
- Les microphones électrodynamiques sont moins sensibles que les électrostatiques
- Les microphones à ruban sont les moins sensibles [15].

**Note :** Certains modèles de micros statiques peuvent dépasser ces performances, mais ces modèles sont coûteux et marginaux.

# Chapitre 1 : Généralités sur le Son et la Localisation de Source Sonore

## 5.6 Les types de microphones utilisés pour la localisation de sources sonores

Voici les principaux types de microphones utilisés pour la localisation de sources sonores, d'après les informations fournies dans les sources :

**1. Microphones MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) :** Ce type de microphones est compact, robuste et peu coûteux, ce qui le rend bien adapté pour l'intégration sur des plateformes robotiques [16].

**2. Microphones à condensateur :** Ils présentent une bande passante large, typiquement de 100 Hz à 15 kHz, permettant de capter une large gamme de fréquences sonores pertinentes pour la localisation [16].

**3. Microphones à électret :** Ils offrent un faible niveau de bruit, améliorant ainsi la qualité des signaux audio captés et facilitant leur traitement pour la localisation [16].

**4. Réseaux de microphones :** Plusieurs microphones sont souvent utilisés en réseau sur les robots, permettant d'exploiter les différences de phase et d'amplitude entre les signaux pour localiser les sources sonores [7].

Le choix des microphones dépend des contraintes spécifiques de l'application robotique, en termes de taille, de bande passante, de sensibilité et de coût. L'utilisation de réseaux de microphones est particulièrement répandue car elle permet d'obtenir des informations directionnelles essentielles pour la localisation des sources sonores.

## 6 Conclusion :

Ce chapitre a présenté les principes de l'acoustique et de la localisation des sources sonores, expliquant la production, la propagation et la perception des sons. Nous avons examiné les techniques de localisation sonore chez les humains, les animaux et les robots, ainsi que l'importance des microphones dans ces processus. Ces notions établissent une base solide



**Chapitre 2 : Techniques de  
Localisation des Source Sonore**

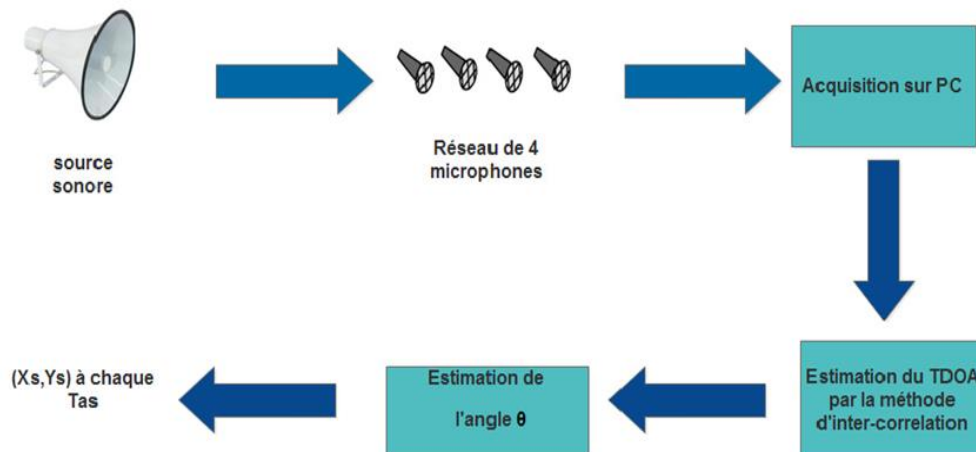
## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

### 1. Introduction

Ce chapitre explore les diverses méthodes employées pour la localisation des sources sonores, y compris la localisation dans l'espace 3D et les configurations de microphones. Nous commencerons par une revue des méthodes classiques telles que la différence de niveau interaural (ILD) et la différence de temps d'arrivée (TDOA), avant de plonger dans des techniques plus avancées comme la formation de faisceaux et les approches basées sur l'énergie. Nous examinerons également comment les configurations de microphones influencent la précision et l'efficacité des systèmes de localisation sonore. Enfin, les applications et défis associés à ces méthodes seront discutés pour fournir une compréhension complète de la localisation sonore dans divers contextes.

### 2. Méthodes de localisation des sources sonores

Dans le littérature, il existe plusieurs méthodes pour la détermination de la direction d'arrivée d'une onde sonore. Les deux les plus utilisées sont IILD (Intéaurale Level Différence) et le TDOA (Time Différence of Arrival) connue sous le nom DITD (Intéaural Time Différence).



**Figure 2- 1 :** Localisation d'une source sonore par un réseau de 4 microphones

#### 2.1 Energy-Based Localization

De nombreuses approches basées sur l'énergie sont utilisées pour les réseaux de capteurs acoustiques sans fil (WASN), car la variation de puissance acoustique est faible. (WASN) en raison de la variation limitée du volume sonore. La source du son provient de petits microphones, qui sont représentés par des nœuds. Intégrer l'énergie

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

sonore et son utilisation pour l'identification, dépend de la lecture moyenne acquise par le microphone pour un échantillon de signal spécifique, Échantillons définis de signal. Les méthodes basées sur l'énergie n'ont pas de problème de synchronisation. Ils ne nécessitent pas plusieurs microphones par nœud. La différence d'énergie entre les différents microphones au même endroit est faible. Le concept fondamental de la méthode de localisation, Le concept fondamental de la méthode de localisation de cibles basée sur l'énergie est d'utiliser la dépense énergétique des capteurs et l'espace restreint est une sphère. L'augmentation des capteurs entraînera une augmentation des hypersphères et le but sera situé au point de rencontre des hypersphères [7-16].

### 2.2 Temps d'arrivée (TOA)

Le TOA (Time of Arrival) est le moment où un signal est détecté par des microphones. Le ToF (Time of Flight) calcule la distance entre les microphones et un objet en mesurant le temps que le signal met à parcourir cette distance. Le TOA ne peut pas directement déterminer la distance à la source car il mesure uniquement le temps de trajet du signal. La précision du TOA nécessite une coopération entre la source et les capteurs pour synchroniser les temps de transmission. Sans cette coopération, la période de transmission initiale reste inconnue, empêchant une mesure précise du TOA. La trilatération est utilisée pour déterminer l'emplacement de la source en résolvant des équations basées sur les distances mesurées [18-19].

### 2.3 Différence de temps d'arrivée (TDOA)

La différence de temps d'arrivée (TDOA) est une méthode de localisation de source sonore en utilisant la différence de temps entre les signaux reçus. Ceci peut être accompli en mesurant le nombre de passages à zéro ou l'heure de début du signal. Une autre méthode de calcul du TDOA consiste à effectuer la corrélation croisée des signaux, celle-ci étant également affectée par le bruit.

Les algorithmes qui utilisent TDOA ou TOA nécessitent des points de référence supplémentaires pour réduire le bruit et faciliter la synchronisation, dont la précision dépend principalement du point choisi. Pour surmonter ce problème, Wang et al ont proposé une conception qui implique de synchroniser les horloges des nœuds tandis que l'horloge de la source sonore reste décorrélée. Cette méthode augmente la précision de la localisation sans s'appuyer sur un seul point de référence désigné [20-22].

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

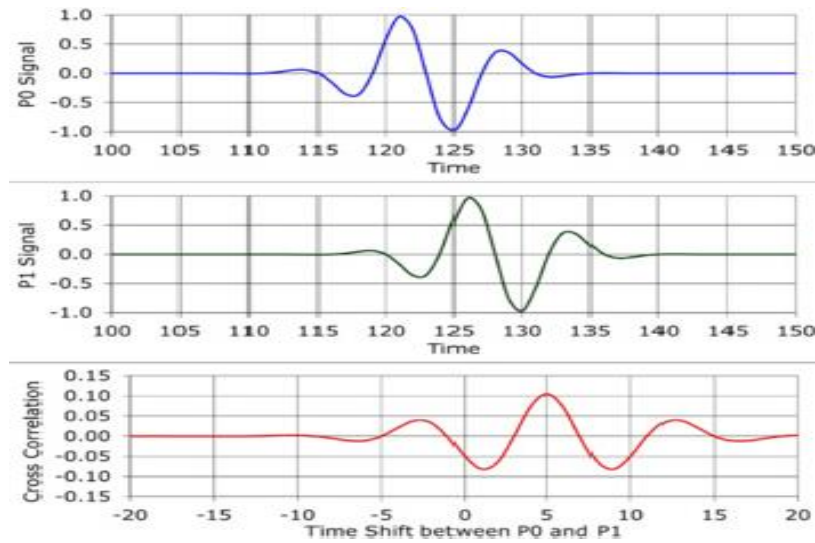


Figure 2- 2 : Application de méthode TDOA

### 2.4 Direction d'arrivée (DOA)

Dans cette approche, chaque nœud estime individuellement la direction d'arrivée (DOA) des sources et transmet ces estimations au centre, sans besoin de synchronisation. Le système fonctionne bien avec des entrées non synchronisées tant que le mouvement de la source est très faible. La triangulation est utilisée pour localiser la source, nécessitant une plus grande puissance de calcul et plusieurs microphones [21]. Pour le champ lointain à bande étroite, l'angle d'arrivée est déterminé par la différence entre la normale à la matrice et le plan du vecteur de direction. Pour un champ lointain large, la différence de phase d'onde entre les éléments du réseau fournit l'angle d'arrivée. L'estimation DOA se compose de trois étapes, illustrées à la (figure 3) [23].

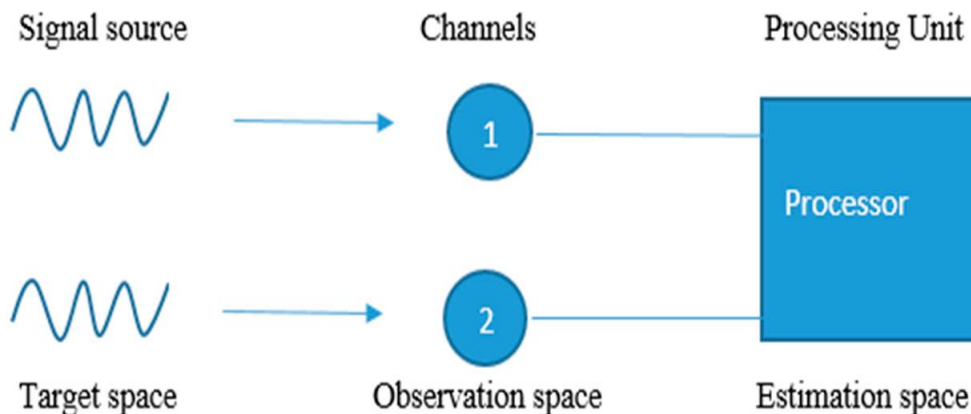


Figure 2- 3 : Structure de l'estimation DOA

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

La méthode de détermination de la direction d'arrivée (DOA) proposée dans [26], utilise la différence de phase entre les signaux pour calculer l'angle d'arrivée. Une transformée de Fourier rapide (FFT) évalue la fréquence et la phase des points les plus élevés du signal de chaque microphone, puis la différence de phase maximale est utilisée pour estimer les différences de phase aux points de crête.

Le processus de localisation comporte trois étapes :

- Espace cible : Comprend le générateur de signaux et l'habitat.
- Espace d'observation : Collecte des informations sur l'espace cible, y compris le bruit et les interférences.
- Technique d'estimation : Utilise des méthodes comme la compensation ou le filtrage du réseau pour recréer le signal spatial cible.

Les facteurs influençant l'estimation DOA sont :

- La quantité d'éléments du réseau : plus il y en a, plus la performance est élevée.
- Le rapport signal/bruit (RSB) : un rapport signal/bruit bas diminue les résultats.
- La cohérence du signal de départ : des signaux cohérents rendent la distinction plus difficile.
- L'emplacement des capteurs doit être idéal afin de détecter le son de manière efficace.

On utilise des algorithmes tels que MUSIC et ESPRIT pour estimer le DOA. Il est essentiel d'avoir une géométrie de réseau parfaitement ajustée et complexe pour MUSIC, tandis qu'ESPRIT est plus solide et moins complexe. Il existe également d'autres approches pour estimer le DOA.

### 2.5 Formation de faisceaux (Beamforming)

Un réseau de microphones dans le champ lointain est utilisé pour la formation de faisceaux, défini comme étant plus éloigné de la source que le diamètre. Dans le champ lointain, les ondes sonores qui impactent le réseau de microphones sont des ondes planes, ce qui facilite la propagation du son entrant directement vers l'objet testé. En intégrant le délai de la distance de propagation, on ajoute les signaux provenant du réseau de formation de faisceaux [25].



## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

### 2.6 Différence d'intensité entre Microphones (IID)

Cette méthode est efficace pour un réseau de deux microphones qui calcule la différence d'énergie entre les signaux au fur et à mesure de leur progression. Le signal résultant donne des informations sur la position de la source par rapport au microphone. Pour améliorer la résolution, davantage de microphones peuvent être utilisés. Ce signal peut être converti en une version de fréquence qui est l'ILD entre les microphones, cette version utilise le spectre de différence pour le signal. Un ensemble de filtres logarithmiques dans le domaine fréquentiel, appelé banc de filtres, est similaire à l'ILD, mais il est plus résistant au bruit que l'ILD.

### 2.7 Méthode d'ILD

L'ILD (Interaural Level Differences) mesure la différence d'intensité sonore entre les signaux reçus par deux récepteur (microphones ou oreilles) qui caractérisent la différence « d'intensité sonore » entre deux récepteurs. Nous savons que l'intensité sonore varie inversement proportionnelle au carré de la distance ( $I=W/d^2$ ) tel que  $I$  est l'intensité sonore en watts /  $m^2$ , et  $d$  est la distance de la source en mètres. Donc connaître l'intensité de chaque microphone permet d'en calculer la différence et donc déterminer la direction du son. L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple et que la différence permet immédiatement, si elle est positive ou négative, de se rendre compte si l'interlocuteur se trouve à gauche ou à droite [26].

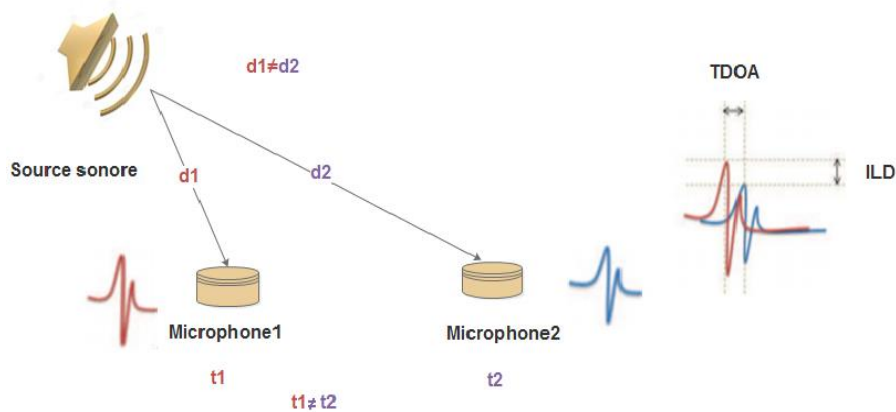


Figure 2- 4 : Méthode de calcul de la direction d'une source sonore

La méthode est basée sur la puissance du signal. Seule l'indication sommaire d'une direction est prise en compte. Pour la déterminer, l'idée est partie de pouvoir évaluer la puissance contenue dans un son. Pour un signal quelconque, la mesure de puissance ( $P$ ) peut être assimilée à sa valeur efficace.

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

Soit pour un signal périodique  $s(t)$  de période  $T$  :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt \quad (2.1)$$

Pour un signal quelconque  $s(t)$  :

$$P = k \int_0^{t_1} s^2(t) dt \quad (2.2)$$

Avec  $K$  est une constante et  $t_1$  est le temps d'intégration.

En mesurant la puissance des sons reçus par différence microphones est en comparant leur valeur les unes aux autres, il semble possible de pouvoir localiser la direction de la source sonore. En effet, plus un microphone est près d'une source sonore, plus la puissance qu'il reçoit est importante. Cependant ces méthodes restent limitées car elles ne permettent qu'une localisation se fait à  $180^\circ$  et ne donne donc qu'une précision relative du type gauche ou droit. Pour quatre micros, la localisation donne une précision à  $90^\circ$ , etc.

### 2.8 La Méthode d'inter-corrélation simple

La méthode d'inter-corrélation simple utilise les différences de temps d'arrivée des signaux sonores entre plusieurs microphones pour déterminer la direction de la source sonore. Ces différences sont calculées à l'aide de la formule  $\Delta t = (t_2 - t_1) / c$ , où  $c$  représente la vitesse du son. L'angle de la direction de la source est ensuite déterminé par  $\theta = \arcsin(2 * d) / \Delta t$ , où  $d$  est la distance entre les microphones.

Cette méthode, bien que simple et couramment employée dans des domaines tels que la surveillance de la sécurité, présente certaines limitations. Des problèmes de cohérence des signaux et des bruits parasites peuvent engendrer des erreurs, surtout en cas de faible rapport signal/bruit. Cependant, elle reste efficace lorsque la cohérence des signaux est suffisante à proximité de la source.

La vitesse du son varie avec la température, selon la formule  $c = 331 + 0.6 * T$ , atteignant 346 m/s à  $25^\circ\text{C}$ . Les valeurs de distance et d'angle sont ensuite déterminées par des formules trigonométriques.

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

### 2.8.1 Principe de la méthode d'inter-corrélation simple

Le but est de déterminer l'angle  $\theta$ , pour cela on doit :

- Mise en place d'une distance de  $D = 10$  cm entre les deux microphones.
- Calculer la durée d'échantillonnage  $T_e$ , en supposant que  $T_e = 1 / F_e$ .
- Calculer le TDOA ( $a$ ) en utilisant l'inter-corrélation :  $a = N * T_e$ .
- Réaliser l'estimation du retard entre les deux signaux  $x(t)$  et  $y(t)$  obtenus par les microphones en utilisant la fonction d'inter-corrélation :

$$C_{xy}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot y(t - r) \cdot dr \quad (2.3)$$

Si la position temporelle est recherchée par le maximum de la fonction d'inter-corrélation, la différence de temps est recherchée.

On détermine  $d$  :

$$d = a * c \quad (2.4)$$

$c$  : la vitesse de propagation du son dans l'aire

Selon la formule de Laplace :

$$c = (331 + 0.6 * T) \text{ m/s} \quad (2.5)$$

Où  $T$  représente la température en degré Celsius.

Donc pour une température de  $25^\circ\text{C}$  on aura  $c = 346$  m/s

Où «  $d$  » et «  $a$  » son déterminés par les formules trigonométriques.

$$\cos \theta = (a * c / D) = x \quad (2.6)$$

D'où

$$\theta = \cos^{-1} x \quad (2.7)$$

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

### 2.8.2 Difficultés et intérêt de la méthode d'inter-corrélation simple

La méthode est apparemment simple, mais elle présente des problèmes liés à la cohérence des signaux audio provenant des microphones, des problèmes liés au bruit parasite corrélé, et dans notre cas, la méthode fait l'hypothèse que le bruit de fond entre les deux microphones est en fonction de l'emplacement de la source, ce n'est pas vrai, mais cela entraîne quand même l'apparition de pics parasites qui peuvent être ignorés à une cohérence élevée entre le bruit et les deux signaux, nous pensons que cette méthode n'est pas appropriée aux fins de source localisation dans notre cas. Au lieu de cela, nous avons décidé de l'implémenter comme moyen d'estimer le délai entre les deux microphones afin de déterminer la position de la source [26].

### 2.9 Méthodes d'inter-corrélations généralisées

Les méthodes de corrélation croisée généralisées anticipent la corrélation croisée de chaque signal avec un autre signal en utilisant une fonction de pondération, la fonction calcule ensuite la corrélation croisée des deux signaux. La corrélation croisée généralisée est une méthode courante pour déterminer la différence de temps d'arrivée (TDOA) entre deux microphones d'une paire. Ensuite, nous dérivons l'emplacement de la source à partir des multiples valeurs TDOA. Nous rassemblons un groupe de petits microphones comportant 4 composants comme l'exemple de la figure (2.5).

Si la distance entre le microphone et la source est  $r_m$ , alors le retard (en décalage temporel) du signal de la source au microphone est :

$$\tau_m = \frac{r_m}{c} \quad (2.8)$$

Ensuite, le décalage horaire entre les arrivées de deux microphones, TDOA, peut s'écrire :

$$\tau_{mn} = \tau_m - \tau_n = \frac{\tau_m - \tau_n}{c} \quad (2.9)$$

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

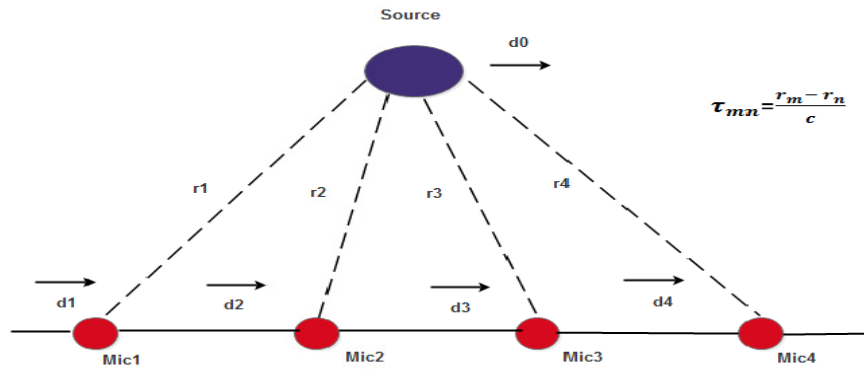


Figure 2- 5 : TDOA entre deux microphones

### 2.9.1 Choix de la méthode de localisation

La méthode TDOA est plus exacte et plus résistante à l'adversité que la première. À l'inverse, il est beaucoup plus difficile de mettre en œuvre une donnée qui implique du traitement et des mathématiques, des calculs et des traitements fastidieux. En effet, une corrélation entre les deux signaux enregistrés est nécessaire pour déterminer l'écart.

Toutefois, nous avons encore besoin d'une approche puissante pour mener à bien cette tâche. En effet, l'ILD mesuré approximativement ne correspond pas aux objectifs visés, c'est pourquoi la méthode TDOA a été maintenue.

Remarque : Pour localiser une source sonore dans un environnement 3D, vous avez besoin d'au moins 4 microphones (Dans notre cas, 2 microphones suffisent).

### 2.9.2 Illustration pour une localisation sonore utilisant deux microphones

Il s'agit d'un système composé de deux capteurs et d'une source sonore située en dehors du plan, perpendiculaire à la droite, qui traverse ces deux capteurs et traverse le milieu de leur trou. Les deux capteurs recevront alors le front d'onde de cette source sonore avec une légère disparité de temps ou de délai, en fonction de l'angle d'arrivée. Ce délai maximal correspond à une source sonore située sur la même droite qui traverse les deux capteurs (à 0° ou 180°).

Notre réseau est constitué de deux microphones qui peuvent être disposés de la manière indiquée dans la Figure. (2.6-2.7).

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

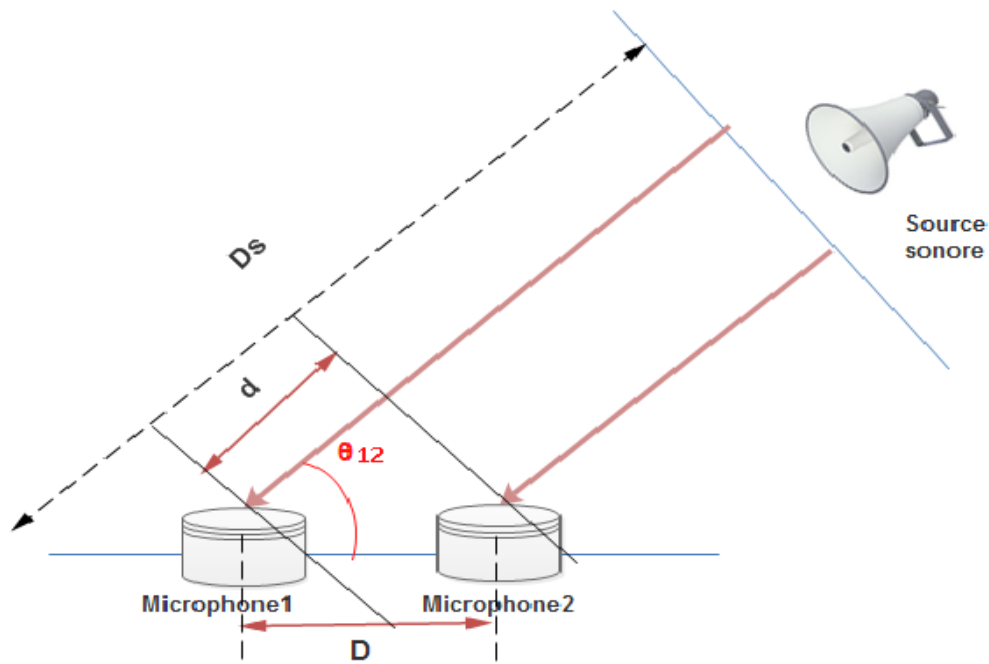


Figure 2- 6 : Réseau composé de deux microphones

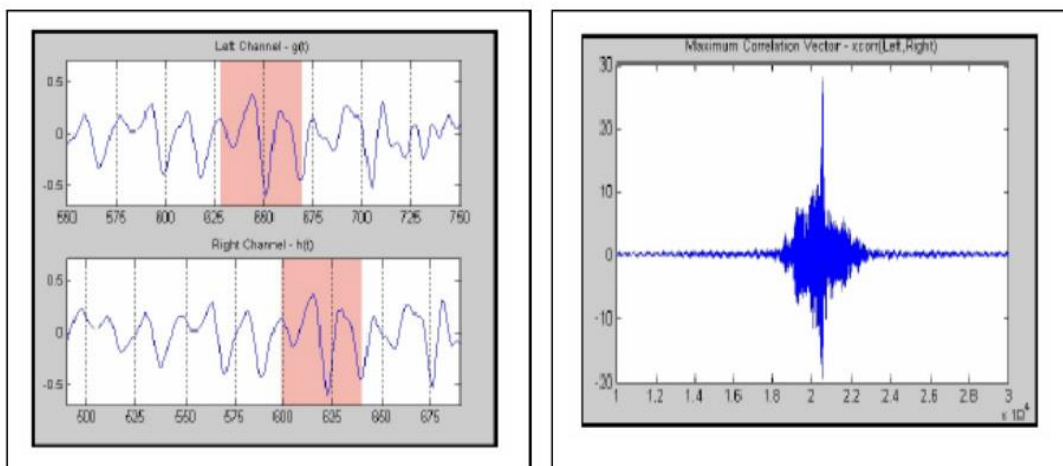


Figure 2- 7 : Illustration de l'introduction pour un son

### 2.10 Steered Response Power (SRP)

SRP est une méthode de formation de faisceaux qui calcule la puissance d'un filtre puis l'ajoute à l'ensemble des emplacements sources définis par la grille spatiale. Les données de corrélation croisée généralisée (GCC) provenant de plusieurs paires de microphones sont résumées et utilisées pour le calcul. L'emplacement estimé de la source est dérivé de la valeur la plus élevée de la carte de puissance SRP, qui est la grille de tous les SRP [27-28].

De nombreuses approches différentes sont utilisées pour l'identification sonore. En fonction du but recherché par l'utilisateur, une approche particulière est sélectionnée.

## **Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore**

Une analyse complète des différentes méthodes est effectuée et leurs comparaisons sont effectuées afin de déterminer la méthode la plus efficace pour nos objectifs.

### **3. Localisation de la Source Sonore dans l'Espace 3D**

On nomme localisation sonore 3D la localisation de la source sonore dans l'espace 3D. Elle implique d'étudier les angles horizontaux et verticaux de l'arrivée des ondes sonores et les variations entre la source sonore et les microphones. Il est essentiel que les microphones soient placés dans une configuration spécifique en relation avec la source sonore. En général, on détermine les coordonnées 3D en utilisant des méthodes de traitement du signal [29-30].

L'audition binaurale est utilisée par de nombreux mammifères ainsi que par les êtres humains pour localiser les sources sonores. Ce processus implique une analyse comparative des informations reçues de chaque oreille, qui fait partie d'un processus de synthèse. Dans le contexte de l'expérience il est possible d'obtenir la fonctionnalité auditive binaurale en utilisant deux microphones [31].

Dans ce projet, deux nœuds de microphones ont été utilisés, avec chaque nœud contenant un réseau de deux microphones [31-33].

#### **3.1 Technologies**

Dans les domaines de l'audio et de l'acoustique, la technologie de localisation de la source sonore est principalement employée pour la navigation directionnelle, l'amélioration de la parole, la surveillance et les aides auditives [34].

La différence d'heure d'arrivée de chaque signal sonore est utilisée dans les routines actuelles de localisation sonore. La localisation de ces systèmes se limite principalement à l'espace bidimensionnel et ne peut donc pas être utilisée pour résoudre des problèmes pratiques de localisation sonore [32].

#### **3.2 Caractéristiques de localisation du son**

La source sonore est identifiée à l'aide de certaines caractéristiques, Ces indices peuvent être binauraux ou monauraux. La localisation verticale du son peut être effectuée en utilisant des indices monauraux. Ces indices peuvent être obtenus par analyse spectrale. Les indices binauraux sont utilisés

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

Pour la localisation horizontale des sources sonores. La différence d'audition entre l'oreille gauche et l'oreille droite est analysée.

La différence de temps entre l'arrivée de l'onde sonore aux deux oreilles et les différences d'intensité sont toutes deux prises en compte lors de l'analyse [33-35].

### 3.3 Méthodes de travail

Examinons les méthodes de localisation sonore en 3D. Voici un aperçu des techniques couramment utilisées :

#### 1. Méthode du Formateur de Faisceau Orienté :

- Cette méthode consiste à combiner des microphones à l'aide d'un formateur de faisceau orienté.
- La Direction d'Arrivée (DoA) est détectée par un réseau de capteurs robotisés.
- Les signaux entrants sont filtrés pour réduire le bruit.
- Utile pour la reconnaissance vocale dans des environnements complexes où l'entropie sonore doit être réduite.

#### 2. Méthode du Formateur de Faisceau :

- Génère des impulsions vers un projecteur à plusieurs moments.
- Les impulsions atteignent le projecteur simultanément, créant un impact sonore puissant.
- Base d'un modèle Entrées Multiples Sorties Multiples (MIMO) pour améliorer la localisation sonore (par exemple, dans les technologies cellulaires).
- Réduit le taux d'erreur binaire dans la transmission sonore.
- La présence de canaux de transmission (Tx) et de réception (Rx) multiples augmente la capacité du canal sans augmenter la largeur de bande globale.

#### 3. Réseau de Capteurs Vectoriels Acoustiques (AVS) :

- Mesure la pression acoustique.
- Un AVS comprend trois capteurs de vitesse et un capteur de pression.
- Détecte les signaux sous forme d'un réseau XYZO.



## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

- Estime la DoA du son à l'aide de ces réseaux.
- L'AVS surpasse d'autres méthodes rapportées.
- Idéal pour les plates-formes à espace limité

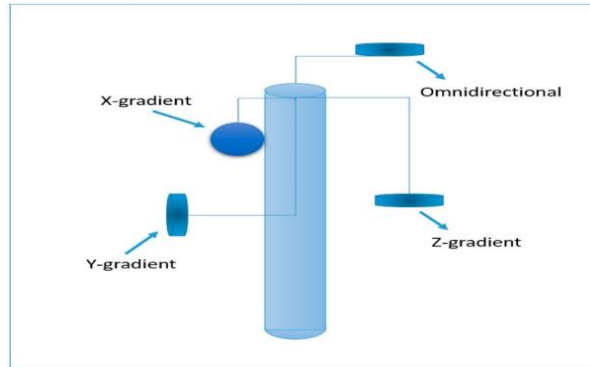


Figure 2- 8 : XYZO-AVS array

### 4. Réseau de plusieurs microphones

Cette méthode enregistre le décalage temporel entre l'arrivée des sons à différents microphones pour déterminer leur direction. La triangulation, basée sur les distances entre les microphones, permet de calculer précisément la répartition spatiale des faisceaux sonores. La mobilité du réseau est avantageuse pour identifier la source sonore en mesurant les distances entre les microphones. Cependant, les sons provenant de sources multiples compliquent la détermination du signal, et la détection de la direction d'arrivée (DOA) devient plus difficile avec des objets en mouvement [36].

#### 3.4 Facteurs influençant le choix

La sélection d'une méthode parmi une multitude de méthodes différentes engendre des difficultés. Il est essentiel de trouver le meilleur compromis entre les deux méthodes, car certaines sont rentables mais manquent de précision, tandis que d'autres sont efficaces mais manquent de bande passante. Quelques-uns des éléments qui impactent la sélection d'une méthode sont les suivants.

##### 3.4.1 Rapport coût-efficacité

Pour obtenir une précision élevée dans la localisation des sons, de nombreuses techniques sont utilisées, à la fois avancées et récentes, afin de fournir des vitesses de traitement élevées et de simplifier les calculs complexes. Afin d'accomplir cela, il est indispensable d'employer des systèmes matériels de luxe qui sont relativement onéreux.

## **Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore**

En prenant cela en compte, de nombreux ordinateurs à carte unique sont conçus pour réduire ce problème, mais il est crucial de gérer le coût global du système et de le maintenir dans les limites du budget.

### **3.4.2 Erreurs de mesure**

Chaque approche de localisation sonore est susceptible de faire l'objet d'erreurs en raison du bruit ambiant et des interférences. La diffraction, l'écho, la réflexion, la déviation et la diffraction du signal sont des problèmes qui affectent les ondes sonores, ce qui entraîne de nombreuses erreurs de mesure et une localisation incorrecte. Le manque de synchronisation des nœuds est également responsable de nombreuses erreurs, ce qui revêt une grande importance dans certaines méthodes telles que la TOA et la TDOA. Il est donc essentiel de sélectionner une méthode qui réduit ce problème, qui est moins sensible au bruit et qui offre de meilleurs résultats [37].

### **3.4.3 Dissipation d'énergie**

Afin d'optimiser les performances du système, plusieurs nœuds alimentés par des batteries sont employés dans le matériel, ce qui entraîne une perte d'énergie. Il est essentiel de vérifier cette perte de manière adéquate et de tenter de la réduire autant que possible.

### **3.4.4 Problèmes de déploiement**

Il est essentiel de respecter les exigences spécifiques du matériel pour chaque méthode afin de l'utiliser de la meilleure manière possible. Les méthodes ont des exigences différentes : pour la TOA, il est essentiel de synchroniser les nœuds, tandis que les méthodes basées sur l'énergie requièrent des gains ajustés. Il y a aussi des méthodes qui requièrent une administration physique et des variations saisonnières. L'ajustement de ces problèmes peut demander un certain temps [37].

### **3.4.5 Flexibilité du système**

La souplesse du système est évaluée en fonction de la facilité avec laquelle un problème peut être résolu au sein du réseau. Étant donné qu'elles sont utilisées dans un environnement ouvert, les méthodes de localisation sonore font face à de nombreux obstacles physiques. Il peut arriver que certaines pièces ou nœuds (microphones) ne

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

fonctionnent pas lors de ce processus, ce qui nécessite une solution de secours afin de garantir que, même en cas de défaillance d'une pièce, les estimations de localisation soient toujours correctement mesurées.

### 3.4.6 Évolutivité

Étant donné l'usage fréquent de la localisation sonore dans de nombreuses applications, il peut être indispensable d'appliquer les systèmes dans des espaces très petits comme dans des espaces plus vastes. Il est primordial de faire des modifications au matériel en conséquence et de l'ajuster aux exigences. Après avoir bien compris l'application de l'utilisateur, il est nécessaire d'augmenter ou de réduire les différentes techniques de localisation sonore.

## 4. Configurations de microphones

- **Carré** : On peut disposer les microphones en forme de carré. La mise en place de cette configuration est facile et assure une couverture adéquate autour du centre.
- **Croix** : Les microphones peuvent être placés en carré. Cette configuration est simple à mettre en place et garantit une couverture suffisante autour du centre.
- **Cercle** : Il est possible de disposer les microphones en cercle autour d'un point central. Cet arrangement garantit une couverture homogène dans toutes les directions.
- **Réseau irrégulier** : Il est possible d'ajuster la position des microphones en fonction de l'environnement et des besoins particuliers.

### 4.1 Algorithmes de localisation:

- **Triangulation hyperbolique** : Les différences de temps d'arrivée (TDOA) sont utilisées dans cette méthode pour identifier les hyperboles sur lesquelles la source doit être localisée. La position de la source est indiquée par l'intersection de ces hyperboles.
- **Trilatération** : Si on connaît les distances aux microphones (par exemple, en utilisant le temps de vol du signal), on peut utiliser la trilatération pour

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

localiser la source en trouvant l'intersection de cercles centrés sur chaque microphone.

- **Formation de faisceau :** Cette méthode fait appel à des retards temporels afin de synchroniser les phases des signaux des microphones et créer un faisceau de direction. La direction du faisceau maximal est la direction de la source.
- **Méthodes basées sur la fonction de corrélation croisée (GCC) :** En utilisant la corrélation entre les signaux des microphones, ces méthodes permettent d'estimer les TDOA et de localiser ensuite la source.

### 4.2 Défis et solutions

- **Bruit :** Ces techniques permettent d'évaluer les TDOA en utilisant la corrélation entre les signaux des microphones, puis de localiser la source.
- **Réflexions :** Grâce à ces méthodes, il est possible d'évaluer les TDOA en se basant sur la corrélation entre les signaux des microphones, puis de déterminer la source.
- **Calibration :** Les microphones doivent être calibrés afin d'assurer la précision des mesures de temps d'arrivée.

### 4.3 Applications

- **Robotique :** On utilise la localisation sonore pour guider et interagir les robots avec leur environnement.
- **Réalité virtuelle et augmentée :** Il est possible d'utiliser la localisation sonore afin de concevoir des expériences immersives en positionnant les sources sonores virtuelles dans l'espace 3D.
- **Surveillance :** La localisation sonore permet de repérer et de suivre des événements sonores, comme des tirs ou des hurlements.
- **Téléconférence :** La localisation sonore offre la possibilité de détecter et de suivre des événements sonores tels que des tirs ou des cris.

## Chapitre 2 : Techniques de Localisation des Source Sonore

### 5. Conclusion :

Ce chapitre a analysé les méthodes de localisation des sources sonores, en se concentrant sur la localisation en 3D et les configurations de microphones.

Les techniques comme l'ILD et le TDOA, ainsi que des approches avancées comme la formation de faisceaux et les méthodes basées sur l'énergie, ont été examinées. Les défis liés à la synchronisation, la calibration et la gestion du bruit ont été discutés.

Les configurations de microphones ont été mises en avant pour leur rôle dans l'amélioration de la précision et de l'efficacité des systèmes de localisation sonore.

Ces connaissances constituent une base solide pour les applications avancées et les futures recherches dans ce domaine

➤ **Chapitre 3 : Implémentation  
de l'algorithme de  
Localisation d'une Source  
Sonore**

## **Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore**

### **1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous examinons la création et l'exécution d'un système de détection de sources sonores qui utilise cinq microphones et un servomoteur. Le but principal consiste à identifier l'orientation de la source sonore dans un espace tridimensionnel, ce qui ouvre la voie à des applications interactives avancées. Dans de nombreux secteurs, tels que les jeux vidéo et la robotique, la technologie de localisation sonore joue un rôle crucial en améliorant l'interaction utilisateur et l'autonomie des systèmes. Outre la localisation sonore, le projet inclut la reconnaissance faciale afin d'améliorer la précision et la dynamique de l'interaction. Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les approches et les technologies employées afin d'atteindre ces objectifs, ainsi que les obstacles rencontrés et les solutions mises en œuvre pour les surpasser.

### **2. Localisation de la source sonore à l'aide du réseau de microphones**

La localisation d'une source sonore utilisant un réseau de microphones est une technique sophistiquée employée pour déterminer l'origine d'un son dans un espace donné. Ce processus implique plusieurs étapes :

#### **a) Dispositif de Réseau de Microphones :**

- Un réseau de microphones est installé dans la zone surveillée. Ces microphones captent les ondes sonores provenant de différentes directions.
- Chaque microphone enregistre le temps d'arrivée du son, permettant ainsi de déterminer les différences temporelles entre les signaux captés par chaque microphone.

#### **b) Traitement des Signaux :**

- Les signaux audio captés sont ensuite traités pour extraire des informations temporelles précises.
- Des algorithmes de traitement du signal, comme la corrélation croisée, sont utilisés pour calculer les différences de temps d'arrivée, permettant ainsi de trianguler la position de la source sonore.

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

### c) Calcul de l'Angle :

- À partir des différences temporelles, l'angle de provenance du son est déterminé.
- Le système peut alors diriger une caméra ou un dispositif d'alarme vers la source sonore, fournissant ainsi une réponse automatisée en cas de détection d'intrus ou de comportements suspects.

Afin de concevoir un système de sécurité comprenant un réseau de microphones, des servomoteurs et des caméras pour la reconnaissance faciale et la surveillance en cas de vol, voici un projet détaillé :

### 2.2 Composants nécessaires

- a) Microphones** : Plusieurs microphones MEMS placés stratégiquement pour capter les sons provenant de différentes directions.
- b) Microcontrôleur** : Un Arduino ou Raspberry Pi pour traiter les données des microphones.
- c) Servomoteurs** : Pour orienter les caméras vers la source sonore détectée.
- d) Caméras** : Caméras de surveillance avec capacités de reconnaissance faciale.
- e) Logiciel de traitement audio et vidéo** : Pour analyser les sons et les vidéos, et détecter les anomalies et visages.
- f) Système d'alerte** : Notifications en temps réel (SMS, email) pour alerter le personnel de sécurité.

### 2.3 Étapes du projet

#### a) Installation des microphones :

- Placer les microphones dans toute la zone à surveiller.
- Connecter les microphones au microcontrôleur pour la collecte et le traitement des données.



## **Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore**

### **b) Traitement des données audio :**

- Utiliser des algorithmes pour analyser les sons et déterminer la direction et la distance de la source sonore [3].
- Identifier les sons anormaux (bris de verre, mouvements suspects).

### **c) Contrôle des servomoteurs**

- Programmer les servomoteurs pour orienter les caméras vers la source sonore détectée [7].
- Utiliser un arduino pour le contrôle précis des angles de rotation des servomoteurs.

### **d) Surveillance vidéo**

- Les caméras captent les images et les envoient au logiciel de reconnaissance faciale.
- En cas de détection d'un visage non autorisé ou de comportements suspects, le système envoie une alerte et enregistre la vidéo pour une analyse ultérieure.

Ce système intégré offre une solution complète pour la sécurité dans une boutique ou une maison, combinant la détection sonore, la réactivité des servomoteurs, et la surveillance visuelle avec reconnaissance faciale.

## **3. Présentation matériel**

### **3.1 Présentation de Raspberry**

Mini-ordinateur composé d'un processeur, de mémoire vive, de divers ports et d'un système d'alimentation. Le Raspberry Pi révolutionne l'univers de l'information par sa taille et son coût réduit. Cette carte est fabriquée pour aider à étudier les ordinateurs et pour représenter un moyen d'apprentissage de la programmation informatique en plusieurs langages (python, scratch, C, etc.). L'intérêt d'utiliser le Raspberry Pi est sa capacité d'interaction avec le monde extérieur et d'exécuter plusieurs variantes du système d'exploitation libre (GNU/Linux, Raspbian Debian, etc.) et des autres logiciels compatibles.

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore



**Figure 3- 1** : Raspberry pi 4 model b

Le Raspberry Pi 4 Model B est équipé d'un processeur quadricœur 64 bits hautes performances, supporte un double affichage 4K via des ports micro HDMI, et dispose d'une mémoire vive allant jusqu'à 8 Go. Il offre une connectivité sans fil bi-bande (2,4/5,0 GHz), Bluetooth 5.0, Ethernet Gigabit, USB 3.0, et PoE via un module séparé. Il propose des performances comparables aux PC x86 d'entrée de gamme tout en maintenant une rétrocompatibilité avec le Raspberry Pi 3 Model B+ et une consommation d'énergie similaire. Le réseau sans fil et le Bluetooth certifiés permettent de réduire les coûts et délais de mise sur le marché [38].

### 3.1.1 Specification

- Processor: Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit, SoC @ 1.5GHz
- Memory: 1GB, 2GB, 4GB or 8GB LPDDR4, (depending on model) with on-die ECC
- Connectivity:
  - 2.4 GHz and 5.0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 5.0, BLE, Gigabit Ethernet
  - 2 × USB 3.0 ports, 2 × USB 2.0 ports
- GPIO: Standard 40-pin GPIO header, (fully backwards-compatible with previous boards)
- Video & sound:
  - 2 × micro HDMI ports (up to 4Kp60 supported)
  - 2-lane MIPI DSI display port

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

2-lane MIPI CSI camera port

4-pole stereo audio and composite video port

- Multimedia: H.265 (4Kp60 decode), H.264 (1080p60 decode, 1080p30 encode), OpenGL ES, 3.0 graphics
- SD card support: Micro SD card slot for loading operating system and data storag
- Input power:

5V DC via USB-C connector (minimum 3A1)

5V DC via GPIO header (minimum 3A1)

Power over Ethernet (PoE)–enabled (requires separate PoE HAT)

- Environment: Operating temperature 0–50°C
- Production lifetime: Raspberry Pi 4 Model B will remain in production until at least January 2034 [38].

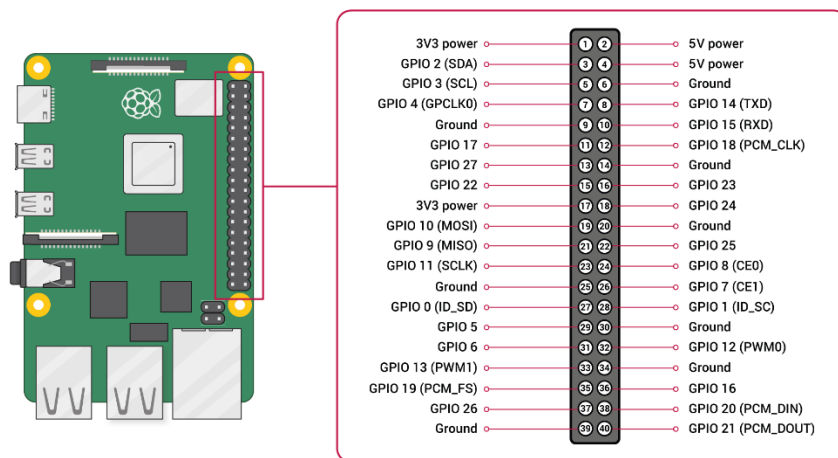


Figure 3- 2 : raspberry pi 4 model b pinout

### 3.2 Caméra raspberry :

Il existe désormais plusieurs modules de caméra Raspberry Pi officiels. Le modèle original de 5 mégapixels est sorti en 2013, il a été suivi par un module de caméra 2 de 8 mégapixels qui est sorti en 2016. Le dernier modèle de caméra est le Camera

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

Module 3 de 12 mégapixels, sorti en 2023. Le dispositif original de 5 mégapixels n'est plus disponible auprès de Raspberry Pi.

Toutes ces caméras sont disponibles en lumière visible et en infrarouge, tandis que le Camera Module 3 est également disponible en version standard ou à large champ de vision, pour un total de quatre variantes différentes. [38].



Figure 3- 3 : Module de caméra 3

### 3.3 Arduino nano :

L'Arduino Nano est la carte classique d'Arduino, conçue pour la planche à pain et dotée des plus petites dimensions. L'Arduino Nano est livré avec des connecteurs qui permettent une fixation facile sur une planche à pain et dispose d'un connecteur USB Mini-B.

L'Arduino Nano est une carte microcontrôleur compacte et puissante. Voici ses principales

#### 3.3.1 Spécifications :

1. **Microcontrôleur** : ATmega328P.
2. **Tension de fonctionnement** : 5V.
3. **Tension d'entrée (recommandée)** : 7-12V.
4. **Tension d'entrée (limites)** : 5-20V.
5. **Pins d'E/S numériques** : 14 (dont 6 peuvent être utilisés comme sorties PWM).
6. **Pins d'entrée analogiques** : 8.
7. **Courant DC par pin I/O** : 40 mA.

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

8. **Mémoire Flash** : 32 KB (dont 2 KB utilisés par le bootloader).
9. **SRAM** : 2 KB.
10. **EEPROM** : 1 KB.
11. **Fréquence d'horloge** : 16 MHz.
12. **Dimensions** : 45 mm x 18 mm.
13. **Poids** : 7 grammes [39].

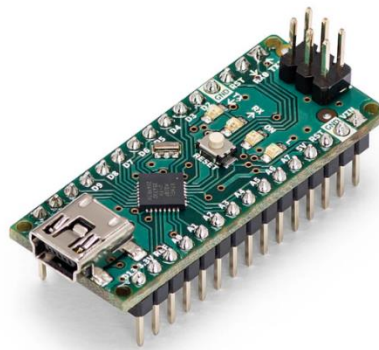


Figure 3- 4 : Arduino Nano

### 3.4 Servo moteur SG90

Le SG90 Micro Servo est un servo de haute qualité, compact (23 x 12,2 x 29 mm) et léger (9 g), parfait pour les projets de loisirs et les petits robots. Avec un couple de 1,5 kg/cm, il fonctionne à une tension de 4,8-6V et se connecte facilement grâce à un connecteur à 3 broches. Il offre une rotation précise de 180 degrés et un temps de réponse rapide de 0,1 seconde, idéal pour des applications nécessitant vitesse et précision [40].

#### 3.4.1 Spécification

- Puissance : 1,8 kg/cm
- Plage de pivotement : environ 180 degrés
- Tension de fonctionnement : 4,8 V-6 V
- Vitesse : 0,10 sec / 60 degrés

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

- Dimensions : environ 22,2 x 11,8 x 31 mm
- Fréquence PWM : 50 Hz (20 ms)
- Poids : 9 g
- Vitesse à vide : 0,12 sec / 60 degrés (4,8 V)
- Couple : 1,5-1,7 kg/cm ( 4.8V-6V )
- Température de fonctionnement : -30 / + 60 degrés Celsius



Figure 3- 5 : Servo moteur SG90

### 3.5 KY-037

Le module microphone haute sensibilité KY-037 est un composant électronique de qualité supérieure conçu pour capturer des signaux audio avec une grande précision. Il est équipé d'un capteur avant qui mesure la zone et envoie un signal analogique à l'amplificateur. Ce dernier amplifie le signal en fonction de la valeur résistante du potentiomètre et le transmet à la sortie analogique du module. Un comparateur intégré permet d'éteindre la sortie numérique et la LED si le signal tombe en dessous d'une valeur spécifique prédéfinie. La sensibilité peut être ajustée grâce au potentiomètre. Il convient parfaitement aux professionnels de l'électronique souhaitant intégrer une solution audio de haute performance dans leurs projets [41].

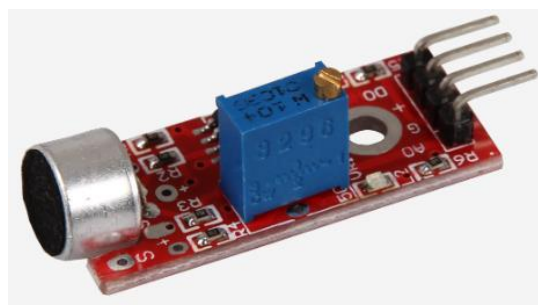


Figure 3- 6 : KY-037

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

### 3.5.1 Description

Ceci est un module de détection son à microphone électret ultrasensible. Il est très pratique car il peut être fixé (trou 3mm). On peut l'utiliser via les sorties A0 ou D0, GND est VCC

**A0** : sortie analogique simple

**D0** : sortie n'émettant un signal que lorsque le son atteint un certain seuil (threshold)

Il est équipé d'un chip amplificateur LM398 et d'une résistance réglable pour le seuil de sensibilité.

<b>Signal de sortie</b>	Analogique
<b>Tension de fonctionnement</b>	5VDC
<b>Fixation</b>	Trou 3mm pour fixation
<b>Led</b>	Led d'indication de fonctionnement
<b>Dimension</b>	38.5 x 15.5 x 12.5mm

Tableau 3- 1 : Caractéristiques techniques de microphone KY-037

## 4. Software

### 4.1 Configuration de raspberry pi 4 model b 8Gb

#### 4.1.1 Préparer le Raspberry Pi :

- Installer le système d'exploitation Raspbian sur une carte SD.
- Insérez la carte SD dans son support.
- Connecter le Raspberry Pi à un écran, un clavier, une souris et à Internet.



Figure 3- 7 : Installation Raspberry Pi Imager

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

### 4.1.2 Activation du SSH sur le Raspberry Pi

- Si vous avez un écran et un clavier connectés au Raspberry Pi, ouvrez le terminal. Si vous accédez à distance, utilisez une connexion terminale comme PuTTY (Windows) ou Terminal (Mac/Linux).

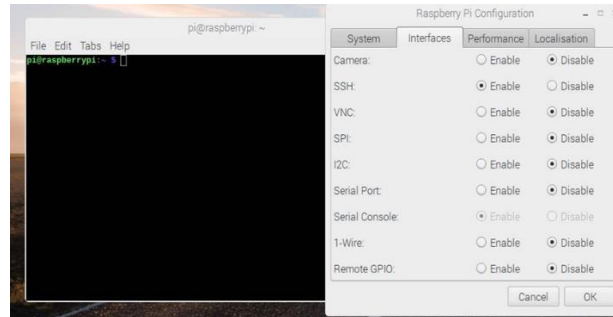


Figure 3- 8 : Raspberry pi configuration

- Activer SSH via raspi-config : « `sudo raspi-config` ».
- Allez dans "Interface Options".
- Sélectionnez "SSH".
- Choisissez "Yes" pour activer.
- Vérifier que le service SSH est actif : « `sudo systemctl status ssh` ».

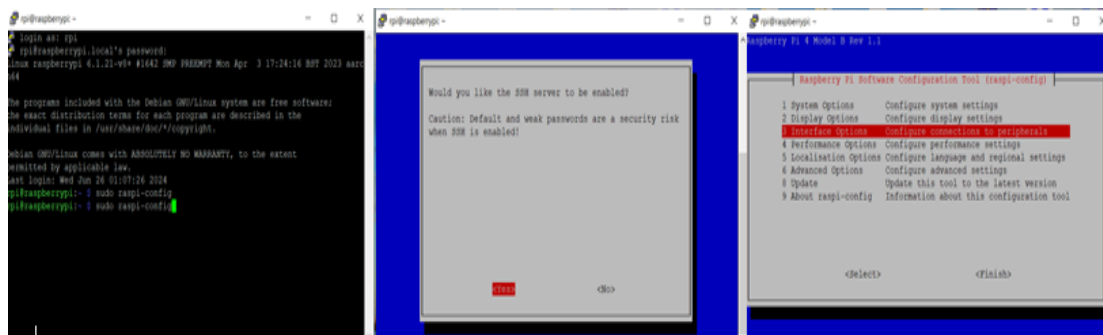


Figure 3- 9 : Activation SSH

### 4.1.3 Activation du I2C (Inter-Integrated Circuit) :

- Activer I2C via raspi-config : « `sudo raspi-config` ».
- Allez dans "Interface Options".
- Sélectionnez "I2C" . Choisissez "Yes" pour activer I2C.
- Installer les outils I2C : « `sudo apt-get install -y i2c-tools` » , « `sudo apt-get install -y python3-smbus` »..



## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

- Configurer le fichier /boot/config.txt : Ajoutez les lignes suivantes si elles ne sont pas déjà présentes : « sudo nano /boot/config.txt » « dtparam=i2c\_arm=on ».
- Charger le module I2C : « sudo modprobe i2c-dev ».
- Vérifier les périphériques I2C : « sudo i2cdetect -y 1 ».

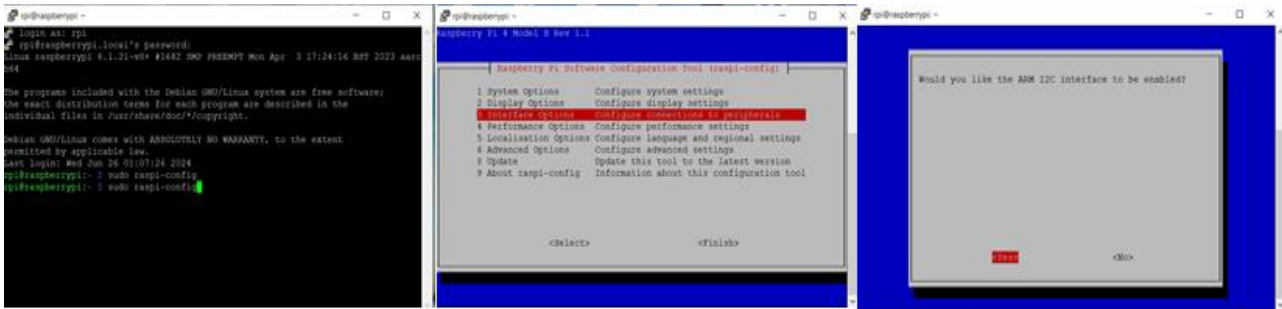


Figure 3- 10 : Activation I2C

### 4.1.4 Installer les dépendances

- Mettre à jour le système avec les commandes : `sudo apt-get update / sudo apt-get upgrade-y`
- Installer Python et les bibliothèques nécessaires : `sudo apt-get install python3-pip/ pip3 install opencv-python pip3/ install numpy`

### 4.1.5 Configurer la caméra

- Activer la caméra du Raspberry Pi via raspi-config : « sudo raspi-config ».
- Choisir "Interfacing Options" puis "Camera" et activer la caméra.

### 4.1.6 Développer le script de reconnaissance faciale

- Utiliser OpenCV pour la capture et la reconnaissance des visages.

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

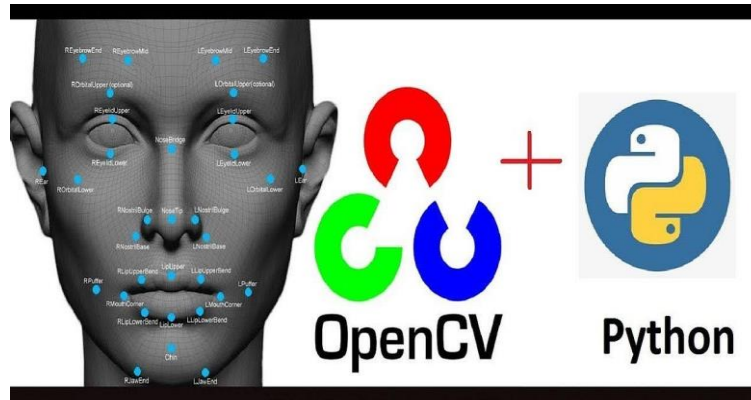


Figure 3- 11 : OpenCv

➤ Exemple de code pour capturer et afficher des images :

```
import cv2

cap = cv2.VideoCapture(0)

while True:
    ret, frame = cap.read()
    cv2.imshow('frame', frame)
    if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
        break

cap.release()
cv2.destroyAllWindows()
```

### 4.2 ARDUINO IDE

L'IDE Arduino (Integrated Development Environment) est un logiciel open-source utilisé pour programmer les cartes Arduino. Il permet aux utilisateurs d'écrire, de compiler et de télécharger du code vers une carte Arduino via un câble USB.

#### 4.2.1 Caractéristiques principales de l'IDE Arduino

##### a) Éditeur de Texte

Au sein de l'EDI, il existe un éditeur de texte convivial qui permet aux individus de composer leur code à l'aide du langage de programmation propriétaire d'Arduino, ancré en C/C++.

## **Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore**

### **b) Zone de Message**

Dans cette section particulière, les utilisateurs peuvent observer les messages d'erreur, les notifications et tout autre détail pertinent survenu lors du processus de compilation et de téléchargement [3].

### **c) Moniteur Série**

En utilisant le moniteur série, les individus peuvent communiquer en temps réel avec leur carte Arduino, simplifiant ainsi le processus de débogage et d'interaction avec les programmes actifs [7].

### **d) Bibliothèques**

De plus, l'EDI intègre un gestionnaire de bibliothèque qui facilite l'intégration transparente de diverses bibliothèques, élargissant ainsi les capacités fondamentales d'Arduino, notamment la gestion des capteurs, des modules sans fil, etc. [7].

### **e) Compatibilité**

Accessible à une base d'utilisateurs diversifiée, l'IDE Arduino est compatible avec les principaux systèmes d'exploitation tels que Windows, macOS et Linux [8].

Essentiellement, l'IDE Arduino est une ressource indispensable pour les personnes souhaitant se lancer dans des projets de cartes Arduino, offrant une interface conviviale pour écrire, tester et déployer du code facilement.

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

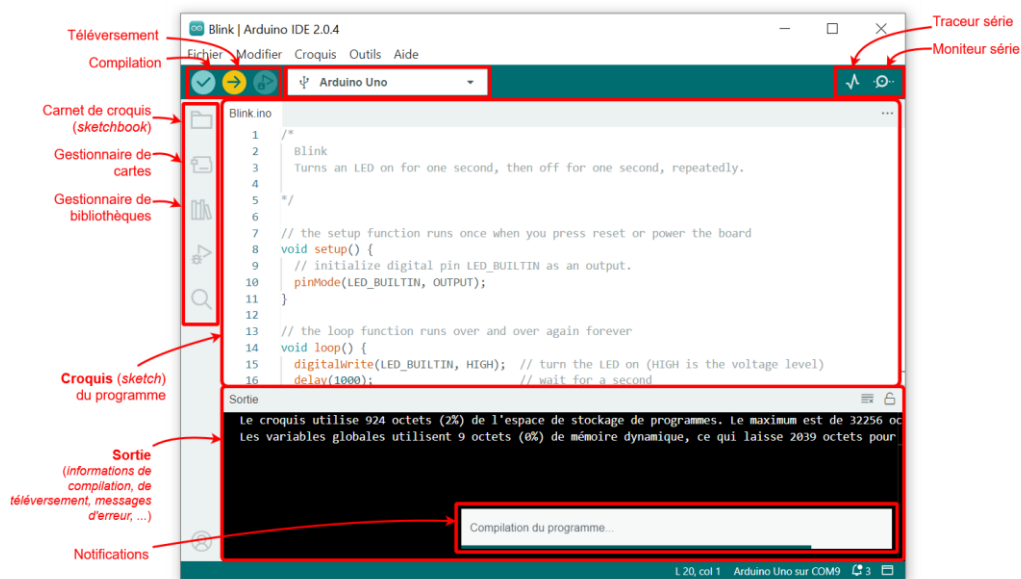


Figure 3- 12 : Logiciel Arduino IDE

### 5. Programme pour Lecture des Signaux des Quatre Microphones

Voici un modèle de programme qui permet de lire les signaux analogiques de quatre microphones en utilisant un microcontrôleur Arduino. Ce programme capte les signaux quasiment en même temps afin de réduire les erreurs de mesure.

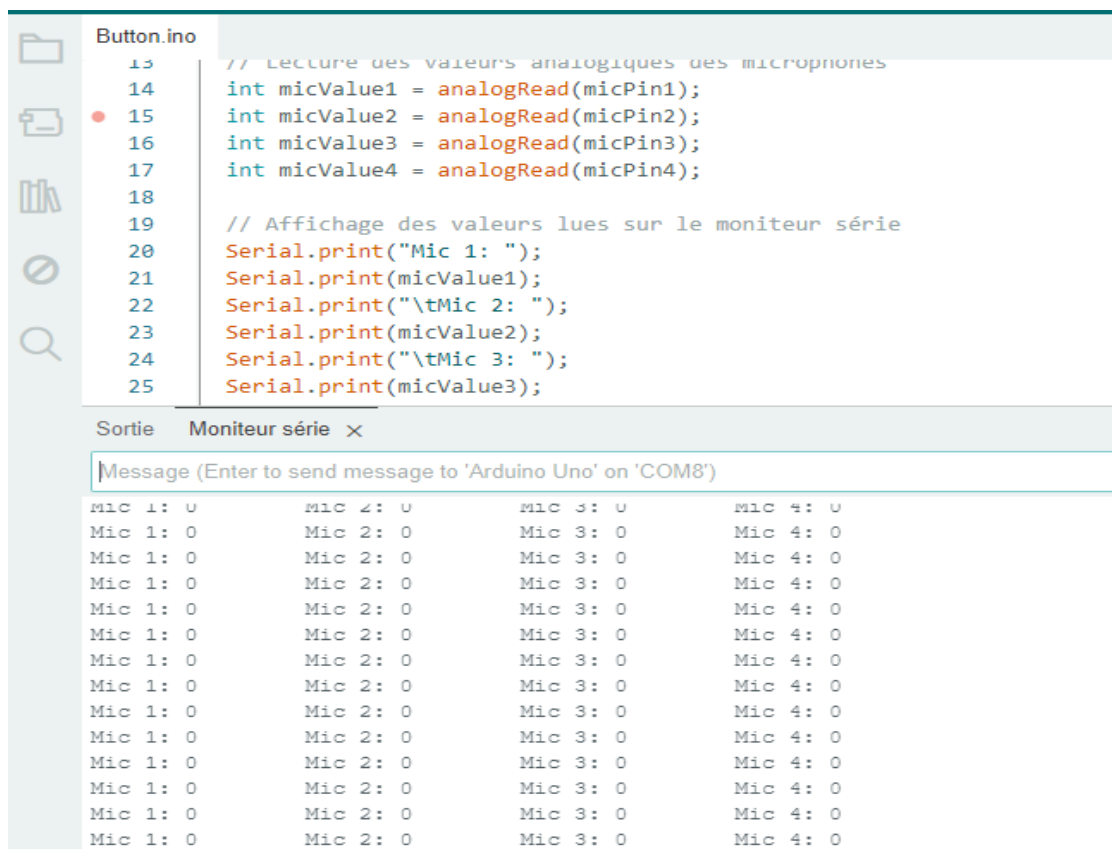
```
// Définition des broches des microphones
const int micPin1 = A0;
const int micPin2 = A1;
const int micPin3 = A2;
const int micPin4 = A3;
void setup() {
    // Initialisation de la communication série pour
    // afficher les valeurs lues
    Serial.begin(9600);
}
void loop() {
    // Lecture des valeurs analogiques des microphones
    int micValue1 = analogRead(micPin1);
    int micValue2 = analogRead(micPin2);
    int micValue3 = analogRead(micPin3);
    int micValue4 = analogRead(micPin4);
```

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

```
// Affichage des valeurs lues sur le moniteur
série

Serial.print("Mic 1: ");
Serial.print(micValue1);
Serial.print("\tMic 2: ");
Serial.print(micValue2);
Serial.print("\tMic 3: ");
Serial.print(micValue3);
Serial.print("\tMic 4: ");
Serial.println(micValue4);

// Ajout d'un délai pour éviter de saturer le
moniteur série
delay (100);
}
```



The image shows a screenshot of an IDE. The top part displays the code from the previous block. Below the code editor, there is a window titled 'Sortie Moniteur série x'. Inside this window, there is a text input field with the placeholder 'Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM8')'. Below the input field, the serial monitor displays the output of the code, which consists of 16 lines of data. Each line contains four values, all of which are '0', indicating that the microphones are not connected or not providing any data.

```
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
Mic 1: 0      Mic 2: 0      Mic 3: 0      Mic 4: 0
```

Figure 3-13 : Les microphones n'étaient pas connectés

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

```
Arduino Uno
Button.ino
13 // Lecture des valeurs analogiques des microphones
14 int micValue1 = analogRead(micPin1);
15 int micValue2 = analogRead(micPin2);
16 int micValue3 = analogRead(micPin3);
17 int micValue4 = analogRead(micPin4);
18
19 // Affichage des valeurs lues sur le moniteur série
20 Serial.print("Mic 1: ");
21 Serial.print(micValue1);
22 Serial.print("\tMic 2: ");
23 Serial.print(micValue2);
24 Serial.print("\tMic 3: ");
25 Serial.print(micValue3);

Sortie Moniteur série x
Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM8')
Mic 1: 127 Mic 2: 27 Mic 3: 511 Mic 4: 21
Mic 1: 127 Mic 2: 27 Mic 3: 509 Mic 4: 22
Mic 1: 127 Mic 2: 28 Mic 3: 510 Mic 4: 21
Mic 1: 127 Mic 2: 28 Mic 3: 510 Mic 4: 22
Mic 1: 127 Mic 2: 27 Mic 3: 510 Mic 4: 21
Mic 1: 127 Mic 2: 27 Mic 3: 509 Mic 4: 21
Mic 1: 129 Mic 2: 28 Mic 3: 511 Mic 4: 21
Mic 1: 128 Mic 2: 27 Mic 3: 510 Mic 4: 21
Mic 1: 128 Mic 2: 28 Mic 3: 511 Mic 4: 22
Mic 1: 128 Mic 2: 28 Mic 3: 512 Mic 4: 21
Mic 1: 129 Mic 2: 28 Mic 3: 513 Mic 4: 21
Mic 1: 128 Mic 2: 27 Mic 3: 511 Mic 4: 21
Mic 1: 129 Mic 2: 27 Mic 3: 512 Mic 4: 21
Mic 1: 128 Mic 2: 28 Mic 3: 512 Mic 4: 22
```

Figure 3- 14 : Les microphones connectés

Le but de ce projet est de localiser l'emplacement de la source sonore en calculant la différence entre les microphones comme le montre la figure.

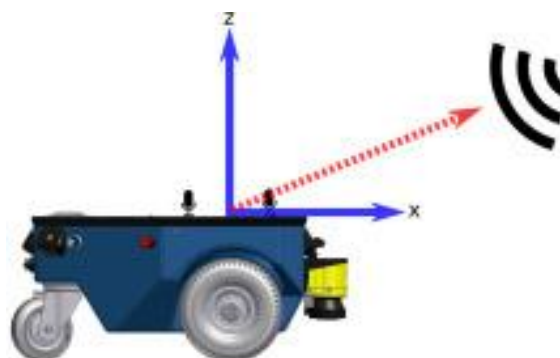


Figure 3- 15 : Localiser l'emplacement

### Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

Ce projet peut être utilisé pour la surveillance des magasins, des banques et autres. En cas de sons inhabituels, l'emplacement exact du son est déterminé à l'aide des microphones et la caméra se déclenche automatiquement pour connaître la source du son, qu'il s'agisse d'une personne ou de toute autre source, et dans le cas où la personne est identifiée, la base de données est examinée pour savoir si la personne est connue ou non identifiée, dans le cas d'une personne non identifiée, une alarme est déclenchée.

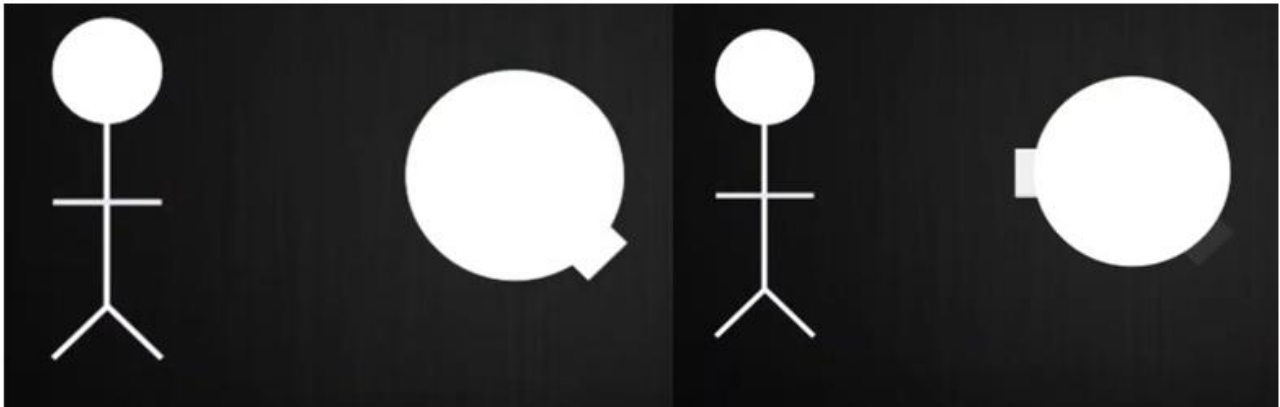


Figure 3- 14 : Exemple de localiser 1er position

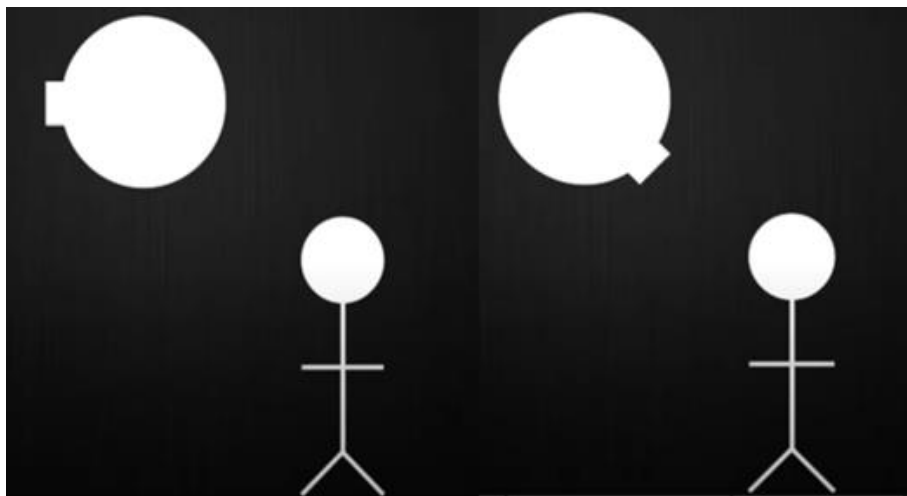


Figure 3- 15 : Exemple de localiser 2ème position

#### 6. Détection de la direction du microphone

L'objectif du projet est de trouver une source sonore dans l'espace 3D pour différentes applications, la détection de la direction des microphones est une technique utilisée pour déterminer l'origine des sons enregistrés par un microphone. Le projet inclut l'emploi de plusieurs microphones et d'un microcontrôleur, l'emploi d'un servomoteur

## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

pour signaler l'angle défini, la construction d'une installation de test robuste et la détermination de l'angle entre la source sonore et les microphones.

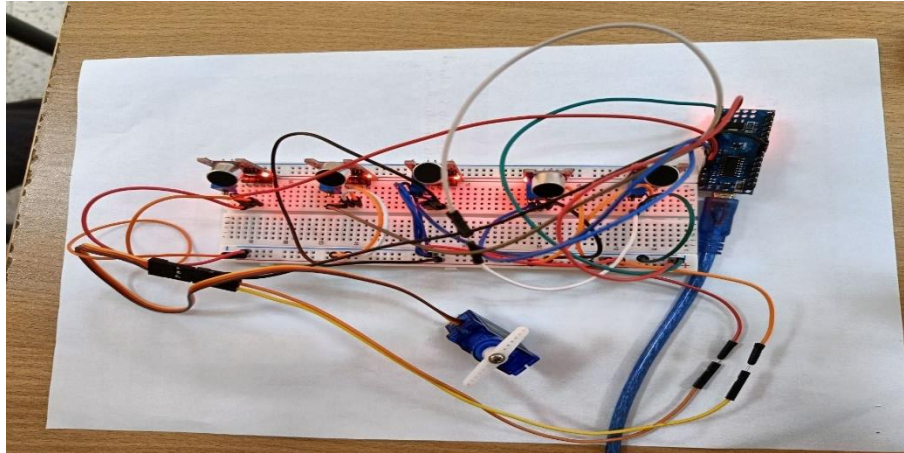


Figure 3- 16 : Réalisation de projet

### 6.1 Comment fonctionne le son et comment fonctionne un microphone

Le son est une variation de la pression d'un milieu tel que l'air à différentes fréquences et amplitudes, qui se traduit par une forme d'onde affichée en deux dimensions.

Un microphone utilise un diaphragme à électret et un transistor JFET pour convertir les variations de pression en tension alternative pour l'amplification.

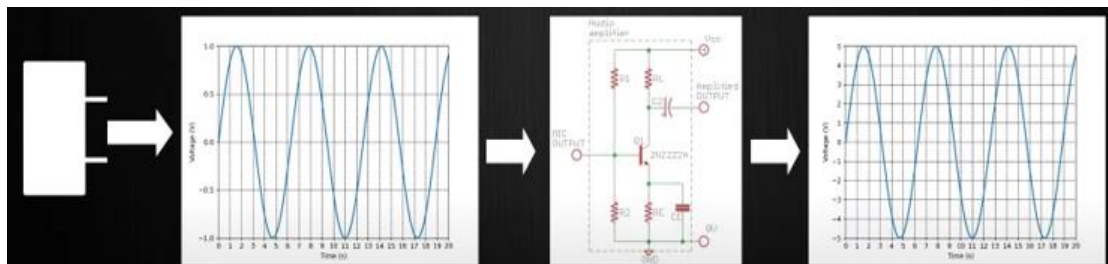


Figure 3- 17 : fonctionnement de microphone

### 6.2 Configuration du microphone

Utilisation d'un réseau de 5 microphones en demi-cercle pour un angle de 180°, amplification des variations en millivolts à l'aide de composants tels que des résistances, des condensateurs et des transistors.



## Chapitre 3 : Implémentation de l'algorithme de Localisation d'une Source Sonore

### 6.3 Détection de l'orientation du microphone:

- L'installation consiste en 5 microphones autour d'un servomoteur, reliés à un Arduino Nano.
- Les tests montrent que le concept fonctionne avec des amplitudes fortes et dirigées, mais seulement avec une résolution de 45 degrés.

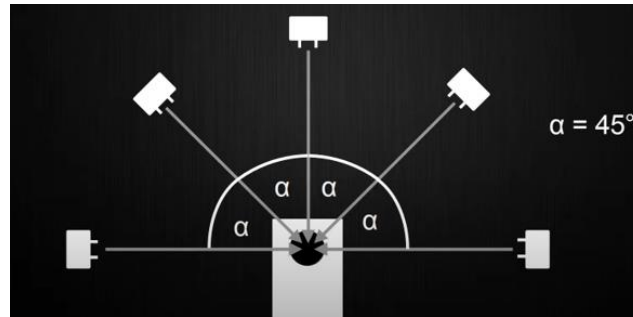


Figure 3- 18 : Installation des microphones

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné comment réaliser et concevoir un système de localisation sonore en utilisant cinq microphones et un servomoteur. L'objectif principal était de déterminer l'orientation de la source sonore dans un espace 3D pour l'intégrer dans des applications interactives. Le projet inclut également la reconnaissance faciale afin d'améliorer la dynamique et la précision des interactions. Grâce à l'adoption de ces technologies, il devient possible de concevoir des systèmes interactifs de pointe, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans divers domaines tels que les jeux vidéo et la robotique.

# Conclusion générale

Ce mémoire de master s'articule autour de l'étude et la réalisation d'un système de détection de sources sonores utilisant un réseau de microphones en vue de mettre en œuvre la méthode TDOA. Dans un premier chapitre nous avons abordé les concepts de base tels que l'acoustique, les microphones et la localisation sonore chez l'homme, les robots et les animaux.

Dans un second chapitre, nous avons fait un tour d'horizon sur les différentes méthodes utilisées ce jour pour monétiser un site 3D en mettant accent particulièrement sur la méthode qui est la différence de temps d'arrivée (TDOA) qui mesure le délai entre l'arrivée du son à microphones.

Enfin, nous avons évoqué lors du troisième chapitre la réalisation concrète d'un système en précisant les éléments matériels et logiciels qui le constituent.

Les résultats obtenus attestent du potentiel de la localisation de source sonore 3D par réseau de microphones pour des applications en interaction innovantes.

Ce système développé permet de déterminer l'orientation avec précision de la source sonore dans l'espace ce qui ouvre la voie à des interactions plus naturelles et immersives dans des domaines qui sont autant de champs appliqués à la robotique et les jeux vidéos.

Il reste toutefois quelques défis à relever dans l'amélioration de la robustesse face aux bruits et réverbérations la portée de l'analyse et la minimisation des coûts de telle analyse.

Il va par conséquent falloir retrouver ce genre de travail qu'il est possible de réaliser et de voir où nous en sommes quelque part entre le laboratoire et le terrain.

Quelques travaux futurs pourraient tout d'une manière générale s'orienter autour de ces enjeux pour rendre la technologie accessible et performante.

Il s'agit d'un travail de mémoire apportant ainsi une contribution significative au domaine en question.

La solidité du concept et sa réussite dans la mise en œuvre attestent de la maturité de cette technologie et de ses forts enjeux pour le futur. Les progrès à venir pourraient ainsi permettre à la localisation de sons 3D de devenir un outil standard qui sorte de la 3D pour offrir une expérience utilisateur plus naturelle et intuitive.

# REFERENCES

- [1] Knapp C. H. and Carter G. C., "The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 24, no. 4, pp. 320-327, August 1976.
- [2] M. S. Brandstein, J. E. Adcock, and H. F. Silverman, "Method and Apparatus for Source Location Estimation from Microphone-Array Time-Delay Estimates," Patent 5737431, April 7, 19
- [3] Librairie Unithèque. (s. d.). Acoustique - cepadues - 9782383950134 - Livre Unitheque.com. Unithèque. <https://www.unitheque.com/acoustique/lecons-de-physique/cepadues/Livre/689429>
- [4] Claude Lesueur, "Éléments de base en acoustique physiologique et physique," in *Acoustique.*, 1997, ch. 1, p. 15.
- [5] Physique-chimie pour la santé. (2024). Récupéré July 13, 2024, depuis [eduscol.education.fr/document/23035/download](https://eduscol.education.fr/document/23035/download)
- [6] Son, fréquence, période, longueur d'onde, | Cochlea. (2024). Récupéré May 10, 2024, depuis [www.cochlea.eu/son](https://www.cochlea.eu/son)
- [7] Thaljaoui, Adel and Brulin, Damien and Val, Thierry and Nasri, Nejah Localisation d'une source sonore par un réseau de microphones. (2014) In: Journées Nationales des Communications Terrestres - JNCT 2014, 22 May 2014 - 23 May 2014 (Toulouse, France)
- [8] Djemai, Mohamed (2017). Localisation de sources par un réseau de microphones. École Nationale Polytechnique d'Alger.
- [9] Antoine Lorenzi. Audition et démasquage binaural chez l'homme. Médecine humaine et pathologie. Université Montpellier, 2016. Français. NNT : 2016MONTT003. Tel-01508857 ; Consulté le : 28/04/2024
- [10] Sylvain Argentieri. Conception d'un capteur sonore pour la localisation de source en robotique mobile. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2006. Français. NNT : . tel-00148058 ; Consulté le : 08/05/2024
- [11] [Livrescolaire.fr](https://www.livrescolaire.fr). (2021). Physique-Chimie 1re Spécialité: La localisation d'une source sonore. Récupéré de <https://www.livrescolaire.fr/page/9453855>; Consulté le : 08/05/2024

- [12] Éric Baratay. Aux sources de l'histoire animale, édition, Éditions de la Sorbonne. Paris , 2019, 288 p, ISBN 979-10-351-0344-6
- [13] FARINEY Thomas, IMPACT DE L'ENTRETIEN DES MICROPHONES SUR LA DIRECTIVITE, MEMOIRE présenté pour l'obtention du. DIPLOME D'ETAT D'AUDIOPROTHESISTE, Université Claude Bernard Lyon 1, 2016
- [14] <https://fr.scribd.com/doc/231825232/Les-Microphones-Complet>
- [15] Margueron, Pedro. (2000). Rapport d'activité. INRIA. Récupéré de <https://iwww.inria.fr/sedgra/files/2021/04/rapportMargueron.pdf>; Consulté le: 10/05/2024
- [16] Salas, N.M.A.; Martinez, R.O.R.; de Haro, A.L.; Sierra, P.M. Calibration proposal for new antenna array architectures and technologies for space communications. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **2012**, 11, 1129–1132.
- [17] Liaquat, M.U.; Munawar, H.S.; Rahman, A.; Qadir, Z.; Kouzani, A.Z.; Mahmud, M.A. Sound Localization for Ad-Hoc Microphone Arrays. *Energies* **2021**, 14, 3446.
- [18] Gergen, S.; Nagathil, A.; Martin, R. Classification of reverberant audio signals using clustered ad hoc distributed microphones. *Signal Process.* **2015**, 107, 21–32.
- [19] Keyrouz, F.; Diepold, K.; Keyrouz, S. High performance 3D sound localization for surveillance applications. In *Proceedings of the 2007 IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, London, UK, 5–7 September 2007; pp. 563–566.
- [20] Thomas, F.; Ros, L. Revisiting trilateration for robot localization. *IEEE Trans. Robot.* **2005**, 21, 93–101.
- [21] Aich, A.; Palanisamy, P. On-grid DOA estimation method using orthogonal matching pursuit. In *Proceedings of the 2017 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSPC)*, Coimbatore, India, 28–29 July 2017; pp. 483–487.
- [22] Shaukat, M.; Shaukat, H.; Qadir, Z.; Munawar, H.; Kouzani, A.; Mahmud, M. Cluster Analysis and Model Comparison Using Smart Meter Data. *Sensors* **2021**, 21, 3157.
- [23] Munawar, H.S. Image and video processing for defect detection in key infrastructure. *Mach. Vis. Insp. Syst. Image Process. Concepts Methodol. Appl.* **2020**, 1, 159–177.
- [24] Munawar, H.S.; Hammad, A.; Ullah, F.; Ali, T.H. After the flood: A novel application of image processing and machine learning for post-flood disaster management. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering (ICSDC 2019)*, Jamshoro, Pakistan, 5–7 December 2019; pp. 5–7.

- [25] Munawar, H.S.; Maqsood, A. Isotropic surround suppression based linear target detection using Hough transform. *Int. J. Adv. Appl. Sci.* **2017**.
- [26] Mariam Sall, "La localisation d'une source sonore dans un environnement 2D," Université Joseph Fourier, Grenoble, France, Rapport de stage de Master 1ère Année EEATS 2015.
- [27] Anushirvani, R. Sound Source Localization with Microphone Arrays; University of Illinois Urbana-Champaign: Champaign, IL, USA, 2014.
- [28] Traa, J.; Smaragdis, P. Multiple speaker tracking with the Factorial von Mises-Fisher Filter. In Proceedings of the 2014 IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP), Reims, France, 21–24 September 2014.
- [29] Busso, C.; Hernanz, S.; Chu, C.W.; Kwon, S.I.; Lee, S.; Georgiou, P.G.; Cohen, I.; Narayanan, S. Smart room: Participant and speaker localization and identification. In Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Philadelphia, PA, USA, 23 March 2005.
- [30] Risoud, M.; Hanson, J.N.; Gauvrit, F.; Renard, C.; Lemesre, P.E.; Bonne, N.X.; Vincent, C. Sound source localization. *Eur. Ann. Otorhinolaryngol. Head Neck Dis.* **2018**, *135*, 259–264.
- [31] Nakashima, H.; Mukai, T. 3D Sound Source Localization System Based on Learning of Binaural Hearing. In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Waikoloa, HI, USA, 12 October 2005; pp. 3534–3539.
- [32] Tamai, Y.; Sasaki, Y.; Kagami, S.; Mizoguchi, H. Three ring microphone array for 3D sound localization and separation for mobile robot audition. In Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, AB, Canada, 2–6 August 2005; pp. 4172–4177.
- [33] Fan, J.; Luo, Q.; Ma, D. Localization estimation of sound source by microphones array. *Procedia Eng.* **2010**, *7*, 312–317.
- [34] Liang, Y.; Cui, Z.; Zhao, S.; Rupnow, K.; Zhang, Y.; Jones, D.L.; Chen, D. Real-time implementation and performance optimization of 3D sound localization on GPUs. In Proceedings of the 2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), Dresden, Germany, 12–16 March 2012; pp. 832–835.

- [35] Lanslots, J.; Deblauwe, F.; Janssens, K. Selecting sound source localization techniques for industrial applications. *Sounds Vib.* **2010**, 44, 6–10.
- [36] Chetupalli, S.R.; Ram, A.; Thippur, V.S. Robust offline trained neural network for TDOA based sound source localization. In *Proceedings of the 2018 Twenty Fourth National Conference on Communications (NCC)*, Hyderabad, India, 25–18 February 2018; pp. 1–5.
- [37] Griffin, A.; Alexandridis, A.; Pavlidi, D.; Mastorakis, Y.; Mouchtaris, A. Localizing multiple audio sources in a wireless acoustic sensor network. *Signal Process.* **2015**, 107, 54–67.
- [38] <https://www.raspberrypi.com/documentation/>; Consulté le : 10/06/2024
- [39] <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>; Consulté le : 11/06/2024
- [40] <https://www.otronic.nl/fr/servo-sg90-micro-180-degres.html>; Consulté le : 10/06/2024
- [41] <https://sensorkit.joy-it.net/fr/sensors/ky-037>; Consulté le: 12/06/2024