



Université du Québec
à Rimouski

SURVEILLANCE ACOUSTIQUE AUTOMATISÉE DE MACHINES VIBRANTES AVEC UN ROBOT DOOSAN

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M. Sc. A.)

PAR

© **OUSSEMA TRIKI**

[Août 2024]

Composition du jury :

Tan Sy Nguyen, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Raef Cherif, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

**Mohamed Amine Ben Souf, examinateur externe, École Nationale d'Ingénieurs de
Sfax**

Dépôt initial le 09 mai 2024

Dépôt final le 14 août 2024

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

C'est avec une sincère gratitude que je souhaite exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers mon directeur de recherche, le Professeur **M. Cherif Raef** de l'Université du Québec à Rimouski, pour m'avoir accordé l'opportunité de collaborer avec lui. Son expertise, sa guidance, son soutien constant et sa bienveillance et ses conseils éclairés ont grandement enrichi mon expérience tout au long de ce projet.*

*Un grand merci également à **Mme. Loubert Suzie**, auxiliaire d'enseignement et de recherche à l'Université du Québec à Rimouski, pour notre collaboration fructueuse, les échanges stimulants que nous avons eus, ainsi que ses conseils éclairés.*

*Malgré la distance, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon père, **Mondher**, ma mère, **Thouraya**, et mes frères, **Zied** et **Mohamed**, pour leurs suggestions précieuses, leur présence constante à mes côtés, et leur soutien inconditionnel tout au long de mes études. Leur encouragement a été un moteur essentiel de ma réussite. Un merci tout particulier à ma chère femme, **Ines**, pour sa présence constante, son amour dévoué, et sa tendresse inébranlable. J'attends avec une impatience palpable notre prochaine rencontre.*

Enfin, mes remerciements vont à mes amis qui ont partagé avec moi les hauts et les bas de cette étape importante de ma vie. Leur amitié sincère a été une source de motivation constante, et ces moments partagés resteront gravés dans ma mémoire. Merci à tous pour avoir rendu cette expérience académique mémorable et enrichissante

RÉSUMÉ

La mesure du niveau sonore des systèmes vibrants représente un défi complexe et ardu pour les industriels, notamment en ce qui concerne la certification sonore. Les approches traditionnelles peuvent se révéler coûteuses, peu précises et parfois même dangereuses pour les travailleurs. L'intégration de la robotique et de la vision par ordinateur dans les processus de mesure acoustique offre une solution innovante à ces problèmes.

Ce projet vise à développer et à mettre en place une méthode de mesure automatisée du niveau sonore basée sur l'intelligence artificielle. L'objectif est d'équiper un robot collaboratif (Doosan) d'une caméra de balayage et d'un microphone afin de (1) générer une trajectoire adaptative à chaque système vibrant à l'aide d'algorithmes de vision par ordinateur. Ensuite, (2) capturer et afficher les niveaux sonores du système, fournissant ainsi des indications significatives pour améliorer la qualité sonore et atténuer les niveaux de bruit. Une cartographie acoustique en 3D a été réalisée pour visualiser la distribution spatiale d'une source sonore (haut-parleurs) dans l'environnement.

Les résultats démontrent que l'utilisation conjointe de la mesure acoustique, de l'intelligence artificielle et de la robotique constitue une approche efficace pour automatiser les mesures acoustiques, tout en améliorant leur précision et leur qualité.

Mots clés – Niveau sonore, Robotique, Intelligence artificielle, Localisation des sources.

ABSTRACT

Measuring sound levels in vibrating systems poses a complex and challenging task for industries, particularly regarding sound certification. Traditional approaches may prove costly, imprecise, and sometimes hazardous for workers. Integrating robotics and computer vision into acoustic measurement processes offers an innovative solution to these issues. This project aims to develop and implement an automated method for measuring sound levels based on artificial intelligence.

The objective is to equip a collaborative robot (Doosan) with a scanning camera and a microphone to (1) generate an adaptive trajectory for each vibrating system using computer vision algorithms. Then, (2) capture and display the system's sound levels, providing meaningful insights to enhance sound quality and mitigate noise levels. A 3D acoustic mapping was conducted to visualize the spatial distribution of a sound source (speakers) in the environment.

The results demonstrate that the combined use of acoustic measurement, artificial intelligence, and robotics constitutes a practical approach to automating acoustic measurements while enhancing their precision and quality.

Keywords - Sound level, Robotics, Artificial intelligence, Source localization.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	VII
RÉSUMÉ.....	IX
ABSTRACT	XI
TABLE DES MATIÈRES	XIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XVI
LISTE DES FIGURES	XVII
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	XXI
LISTE DES SYMBOLES.....	XXIII
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE	30
1.1 MISE EN CONTEXTE :.....	30
1.2 PROBLEMATIQUE :.....	31
1.3 OBJECTIFS :	32
1.4 CONTRIBUTIONS ORIGINALES :	33
1.5 METHODOLOGIE :	35
1.6 STRUCTURE DU DOCUMENT :	36
CHAPITRE 2 : ETUDE DE L'ART ET GÉNÉRALITÉS	37
2.1 INTRODUCTION A LA NUISANCE SONORE :.....	37
2.1.1 Les ondes sonores :.....	37
2.1.2 Les niveaux et normes de bruit :.....	48
2.2 TECHNIQUES CONVENTIONNELLES DE LOCALISATION DES SOURCES DE BRUIT :	50
2.2.1 La cartographie acoustique :.....	52
2.2.2 Comparaison des méthodes de cartographie acoustique :	57

2.3	TECHNIQUES DE LOCALISATION AUTOMATIQUE DE SOURCES DE BRUIT	58
2.3.1	Méthode de microphone adoptée :	60
2.4	LES TECHNIQUES DE DETECTION D'OBJET BASEES SUR L'IA :	63
2.5	CONCLUSION :	68
CHAPITRE 3 : LE ROBOT COLLABORATIF DOOSAN		69
3.1	HISTORIQUE DE LA ROBOTIQUE :	69
3.2	ROBOT DOOSAN :	70
3.2.1	L'évolution des bras robotiques industriels Doosan :	70
3.2.2	Caractéristiques techniques du robot Doosan M1013 :	71
3.2.3	Interface de programmation et système de contrôle du robot Doosan :	73
3.2.4	Sécurité :	74
3.2.5	Caractéristiques des capteurs et des actionneurs du robot :	75
3.3	AVANTAGES ET LIMITES DE L'UTILISATION DU ROBOT DOOSAN :	78
3.4	PROGRAMMATION HORS LIGNE A L'AIDE DU LOGICIEL ROBOTDK AVEC PYTHON :	79
3.5	CONCLUSION :	81
CHAPITRE 4 : MESURE ACOUSQTIQUE AUTOMATISÉE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE		82
4.1	METHODE DEVELOPEE :	82
4.1.1	Norme de mesure :	83
4.2	ETUDE DE CAS :	84
4.2.1	Liste d'équipements :	86
4.2.2	Calibration des équipements :	89
4.2.3	Localisation de la source sonore :	92
4.2.4	Positionnement du bras robotisé :	95
4.2.5	Balayage automatique :	97
4.2.6	Génération de cartes acoustiques :	101
4.3	CONCLUSION.....	101
CHAPITRE 5 : ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES MESURES		102

5.1	MESURES D'EVALUATION DES PERFORMANCES DU MODELE DE DETECTION D'OBJETS	102
5.2	DEVELOPPEMENTS DES CODES :	105
5.2.1	Robot Doosan et le microphone pour la détection et suivi de trajectoire.....	105
5.2.2	Module LAN-XI Open API pour les mesures automatisées :	107
5.3	RESULTAT DE MESURES	109
5.3.1	Traitement des mesures à l'aide du BK Connect :	109
5.3.2	Génération du code Matlab :	111
5.4	RAPPORT DE MESURE ET INTERPRETATION :	113
5.4.1	Rapport sur le niveau de pression acoustique :	113
5.4.2	Comparaison entre la méthode utilisée et les autres méthodes :	114
	CONCLUSION GÉNÉRALE	116
	ANNEXE -1- Interface OnRobot Webclient.....	118
	ANNEXE -2- Configuration de l'adresse IP du protocole TCP/IPV4	119
	ANNEXE -3- Extrait de l'algorithme YOLOV5 utilisé pour la détection de l'objet...120	
	ANNEXE -4- Extrait de l'algorithme développé destinée à la positionnement et la prise de décision.....	123
	ANNEXE -5- Extrait du code python associé à la détection et au scan automatique	124
	ANNEXE -6- Extrait du code python associe au mesures automatisees LAN-XI OPEN API.....	126
	ANNEXE -7- Extrait d'enregistrement de mesures automatisées avec LAN-XI OPEN API.....	129
	ANNEXE -8- Extrait du code en Matlab associe au cartographie acoustique	130
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	132

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Vitesse du son en fonction du milieu de propagation à 20 °C [14].....	41
Tableau 2 : Avantages et limites des méthodes de cartographie acoustique.....	58
Tableau 3 : Résultats des performances du modèle	105
Tableau 4 : Comparaisons de positions désirées et détectées de la source sonore.....	106
Tableau 5 : Rapport sur le niveau de pression acoustique	113
Tableau 6 : Tableau comparatif entre les méthodes de mesures	114

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Onde longitudinale et onde transversale [10]	38
Figure 2 : Détermination de l'amplitude d'une onde transversale [12]	39
Figure 3 : Courbe isosonique [17].....	42
Figure 4 : L'impact de la distance sur l'intensité et la puissance du son [21].....	46
Figure 5 : Microphones placés autour de l'objet dans une configuration hémisphérique	47
Figure 6 : Intensité du son (g) et Pression acoustique (d) autour d'un moteur électrique	48
Figure 7 : Échelle des niveaux sonores [25]	50
Figure 8 : Méthode de microphone à réseau fixe [35]	53
Figure 9 : Sonde d'intensité avec un système de guidage robotisé [37]	54
Figure 10 : Antenne multi microphonique pour le « Beamforming » [38].....	55
Figure 11 : Système d'acquisition NAH [40]	56
Figure 12 : Méthode de microphone à réseau fixe [47]	61
Figure 13 : Positions des microphones pour la surface de mesure hémisphérique [47]	61
Figure 14 : Positionnement des microphones par rapport à la source et leurs distances	62
Figure 15 : Flux de traitement de R-CNN [49]	64
Figure 16 : Flux de traitement de Fast R-CNN [51]	65
Figure 17 : Architecture de YOLO [52].....	66
Figure 18 : Comparaison des performances de YOLOv6 avec les différentes versions de YOLO [61].....	68
Figure 19 : Robot Doosan Serie M1013 [63].....	72
Figure 20 : Architecture mécanique du robot Doosan M1013 [63]	73
Figure 21 : Teach pendant et Interface de programmation [64].....	74
Figure 22 : "Emergency Stop" et "Recovery mode" du robot Doosan.....	75
Figure 23 : Le préhenseur parallèle 2FG7 [65]	77
Figure 24 : Le système de vision 2.5D [66]	78
Figure 25 : Programmation en Python du robot avec la caméra sur RobotDK.....	80

Figure 26 : Processeur intégré au robot Doosan	83
Figure 27 : Illustration d'une trajectoire en spirale pour le microphone en mouvement	84
Figure 28 : Diagramme de la solution proposée	85
Figure 29: Microphone TYPE 4189-A-021 utilisé pour les mesures [69]	87
Figure 30 : Module d'acquisition de données LAN-XI TYPE 3160 [70]	88
Figure 31: Les principales applications BK Connect [71]	89
Figure 32 : Configuration du microphone sur BK Connect	90
Figure 33 : Calibrage du microphone avec LAN-XI et BK Connect	90
Figure 34 : Configuration de la caméra sur l'interface OnRobot	91
Figure 35 : Étalonnage de la caméra externe Eye Tool	92
Figure 36 : L'utilisation de haut-parleurs comme source sonore	93
Figure 37 : Détection de la source sonore	95
Figure 38 : Localisation de la source sonore et positionnement du robot	96
Figure 39 : Schéma de principe des positions des dispositifs dans le système	97
Figure 40 : Communication transparente entre les dispositifs via TCP/IP	98
Figure 41 : Programmation hors ligne de la trajectoire en hémisphère du robot Doosan ..	100
Figure 42 : Robot Doosan équipé d'un microphone qui suit une trajectoire bien définie ..	101
Figure 43 : Intersection Over Union (IOU) [73]	103
Figure 44 : Exemple de détections (cases rouges) effectuées visant à détecter les objets de référence (cases vertes) appartenant à la même classe [73].	103
Figure 45 : Message affiché à l'opérateur	106
Figure 46 : LAN-XI TYPE 3160 Open API	108
Figure 47 : Processus de mesure et enregistrement automatique des mesures	109
Figure 48 : Mesures et traitement des données à l'aide du logiciel Bk Connect	110
Figure 49 : Analyse acoustique : Variations du signal sonore en fonction de la fréquence	110
Figure 50 : Trajectoire du robot avec les différents points de mesures	112
Figure 51 : Cartographie acoustique de mesures	112

Figure 52 : Interface OnRobot WebClient (Devices) pour la configuration de la caméra. 118

Figure 53 : Configuration de l'adresse IP du protocole TCP/IPV4 et transfert du contrôle de robot Doosan..... 119

Figure 54 : Extrait d'enregistrement de mesures automatisées avec LAN-XI Open API.. 129

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CNESST	Commission des Normes, de l'Équité, de la Santé et de la Sécurité du Travail
IA	L'intelligence Artificielle
IIEEC	International Informatics and Software Engineering Conference
INES	Intelligent Engineering Systems
NCEJ	Noise Control Engineering Journal
dB	Décibels
SPL	Sound Pressure Level
SIL	Sound Intensity Level
NAH	Nearfield Acoustic Holography
3D	Trois Dimensions
UX	User experience
CTA	Consumer Technology Association
NINA	New Inspiration New Angle
DRC	Doosan Robot Control
EOAT	End Of Arm Tooling
CNN	Convolutional Neural Network
R-CNN	Regions with Convolutional Neural Network

YOLO	You Only Look Once
NMS	Non-Maximum Suppression
IoU	Intersection over Union
AP	Average Precision
API	Application Programming Interface
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
SSR	Source Sound Reference
NPS	Niveau de Pression Acoustique
B&K	Brüel & Kjaer
SEA	Statistical Energy Analysis
AP	Average Precision
IOU	Intersection On Union

LISTE DES SYMBOLES

λ	Longueur d'onde	[m]
c	Célérité (vitesse) de l'onde	[m/s]
f ou ν	Fréquence de l'onde	[Hz]
T	Période	[s]
P	Pression de mesure	[Pa]
P_0	Pression de référence	[Pa]
L_p	Niveau de pression acoustique	[dB]
I	Intensité sonore	[W/m ²]
I_0	Intensité sonore de référence	[W/m ²]
L_I	Niveau d'intensité sonore	[dB]
W	Puissance acoustique	[W]
W_0	Puissance acoustique de référence	[W]
A	Surface	[m ²]
L_w	Niveau de puissance acoustique	[dB]
r	Rayon	[m]

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 MISE EN CONTEXTE :

Les nuisances sonores représentent un risque pour la santé humaine et l'environnement. Les machines vibrantes, telles que les moteurs, les compresseurs, les turbines et les équipements industriels, sont souvent responsables de niveaux sonores élevés. Ce problème devient de plus en plus crucial en raison de l'augmentation du nombre de ces machines bruyantes dans notre environnement. Les niveaux de bruit sont régis par des normes telles que la norme ISO 1996-1 : 2016 et des réglementations strictes émises par des organismes gouvernementaux telle la CNESST au Québec [1]. Ces instances fournissent des directives précieuses pour la mesure et l'évaluation du bruit environnemental, définissant des critères spécifiques en termes de niveaux sonores acceptables pour divers types de machines industrielles, généralement exprimés en décibels (dB). En plus des normes et réglementations existantes, l'importance de la certification acoustique des nouveaux produits est indéniable dans la lutte contre les nuisances sonores. Les fabricants doivent être tenus de soumettre leurs équipements et machines à des tests rigoureux pour évaluer leur niveau de bruit avant leur mise sur le marché. Cette certification garantit que les produits respectent les normes de qualité acoustique établies, contribuant ainsi à réduire l'impact du bruit sur l'environnement et la santé publique. Le contrôle et la réduction du bruit dans les environnements industriels sont essentiels pour préserver la santé et le bien-être des travailleurs ainsi que pour atténuer les effets négatifs sur les communautés environnantes. Outre les aspects réglementaires, les entreprises peuvent également adopter des pratiques internes visant à réduire le bruit à la source, en utilisant des technologies d'isolation acoustique, en optimisant les processus de production pour minimiser les vibrations, et en mettant en œuvre des programmes de maintenance préventive pour garantir le bon fonctionnement des équipements.

Dans ce contexte, plusieurs études ont été menées pour lutter contre les forts niveaux sonores, engendrés par des systèmes vibrants. La meilleure stratégie pour y faire face est de réduire la source de bruit à la source. Pour ce faire, il est important de détecter et localiser les imperfections et les anomalies, puis de les analyser, afin d'améliorer les performances acoustiques de la machine [2]. Cette démarche permet également de certifier ces machines selon les normes et les réglementations en vigueur. En identifiant les défauts et en apportant les ajustements nécessaires, les fabricants peuvent garantir que leurs équipements respectent les critères de qualité acoustique exigés par les organismes de certification.

1.2 PROBLEMATIQUE :

Les mesures et les cartographies sonores sont des outils clés pour comprendre l'impact du bruit sur l'environnement et les individus, ainsi que pour la certification acoustique des systèmes vibrants [3].

Les méthodes de mesure actuelles, comme la méthode de la sonde d'intensité [4] et la méthode de l'hémisphère [5], présentent des défis importants. Les opérations manuelles associées à la sonde d'intensité sont souvent laborieuses et parfois inefficaces. De plus, l'utilisation intensive de multiples microphones dans la méthode de l'hémisphère peut entraîner des coûts élevés en équipement et en maintenance, tout en posant des défis de gestion et de synchronisation.

En outre, l'ajustement de la taille du demi-sphère dans la méthode de l'hémisphère peut poser des défis pratiques. Cette adaptation exige une expertise approfondie pour garantir une configuration optimale, notamment pour capter le champ acoustique dans le champ direct et proche avec une distance minimale nécessaire. Les ajustements incorrects risquent non seulement d'altérer la précision des mesures, mais aussi de rendre le processus fastidieux et sujet aux erreurs humaines.

Au-delà de ces défis, la complexité croissante des scénarios d'application, comme la caractérisation des champs acoustiques dans des environnements industriels complexes,

dépasse souvent les capacités des méthodes manuelles. De même, lorsqu'il s'agit de certifier plusieurs machines neuves dans une chaîne de production, telle que des balayeuses, des réfrigérateurs, etc., les méthodes classiques deviennent fastidieuses et prennent beaucoup de temps pour réaliser les mesures et confirmer la conformité du champ sonore aux normes, ainsi que pour obtenir leur certification [6].

Pour surmonter les limitations des méthodes traditionnelles, un intérêt croissant s'est manifesté pour l'intégration de la robotique dans l'automatisation des mesures des champs acoustiques [7].

Plusieurs études récentes [8] ont exploré l'utilisation de systèmes robotiques dans divers contextes. En fait, les robots peuvent être programmés pour effectuer des mesures répétitives à différents moments, permettant ainsi une analyse complète et détaillée sur une longue période. Ils sont capables de collecter des données et d'accomplir des tâches dans des environnements difficiles d'accès pour les humains. De plus, l'utilisation de robots pour ces mesures réduit l'exposition des individus à des niveaux élevés de bruit, potentiellement nuisibles pour la santé.

Cependant, malgré l'intégration de la robotique dans les mesures des champs acoustiques, cela requiert toujours une préprogrammation du robot, rendant ainsi le processus semi-adaptatif et non entièrement autonome, car il nécessite l'intervention humaine.

1.3 OBJECTIFS :

L'objectif général de ce projet est de développer et mettre en place un système de mesure autonome permettant un balayage entièrement automatisé basé sur un système de vision, l'intelligence artificielle, un robot Doosan et un microphone. Ce système permettra de (1) générer une trajectoire adaptative à chaque système vibrant à l'aide d'algorithmes de vision par ordinateur. Ensuite, (2) capturer et afficher les niveaux sonores du système, fournissant ainsi des indications significatives pour améliorer la qualité sonore, ainsi que pour obtenir leur certification.

Pour atteindre notre objectif général, nous organisons notre travail autour de 4 objectifs spécifiques.

1. Contrôler le robot Doosan de manière cohérente en utilisant son interface, le logiciel commercial RoboDK et la programmation Python.
2. Concevoir des algorithmes autonomes intégrant une caméra et l'intelligence artificielle pour identifier la source sonore, réaliser le balayage et cartographier le rayonnement acoustique.
3. Développer un système permettant le couplage automatique du robot avec la station d'acquisition BK Connect pour réaliser des mesures complètement automatisées.
4. Assurer la fiabilité et l'efficacité des mesures en utilisant une combinaison avancée de technologies et d'algorithmes.

1.4 CONTRIBUTIONS ORIGINALES :

L'originalité de ce projet est de pouvoir combler le manque de précision et d'autonomie dans l'identification du niveau sonore des machines vibrantes. La nouvelle méthode proposée a pour objectifs de repousser les limites des méthodes classiques et de prendre en compte la complexité des structures.

Ce travail présente trois contributions majeures.

Tout d'abord, des algorithmes en Python ont été développés pour la planification des trajectoires du robot Doosan, garantissant ainsi des mouvements précis lors des mesures. Au lieu de se limiter à l'interface de contrôle du fabricant du robot, avec ses fonctionnalités limitées et ses modules payants, tels que le contrôle de la caméra, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel commercial RoboDK. Ce dernier offre une vaste bibliothèque et de nombreuses fonctionnalités pour les robots. La première contribution consiste à programmer les trajectoires du robot via Python et à les intégrer avec RoboDK. Cette approche a permis

de réaliser des simulations virtuelles sur RoboDK pour des raisons de sécurité. Une fois que la mesure est validée, elle est directement exécutée sur le robot Doosan.

La deuxième contribution à ce projet est l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) pour améliorer la détection des sources sonores. Des modèles pré-entraînés de réseaux de neurones convolutionnels (CNN) ont été utilisés conjointement avec une base de données d'images de différents objets pour entraîner notre propre modèle CNN. Cela a permis de rendre le robot capable de détecter avec précision les sources sonores à mesurer à l'aide d'une caméra intégrée. Cette approche novatrice a permis l'identification automatique des points d'intérêt acoustiques adaptés à chaque système vibrant. Grâce à ces informations, le robot peut calculer la distance entre la source sonore et le microphone, se positionner stratégiquement, guidé par les informations de détection des objets, et ainsi lancer automatiquement le scan.

Enfin, la troisième et dernière contribution consiste à élaborer un algorithme en Python pour synchroniser le système d'acquisition B&K avec le robot Doosan. Habituellement, ce module de synchronisation est proposé par le fournisseur B&K avec des frais supplémentaires. Cependant, afin de réduire les coûts et de maximiser l'efficacité de notre projet, nous avons décidé de développer cet algorithme en interne.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet ont conduit à la rédaction de deux articles de conférences de l'IEEE, soumis à un processus de revue par les pairs. De plus, un troisième article est en cours de soumission au journal Noise Control Engineering Journal.

Le premier article, intitulé "Improving Accuracy of Acoustic Measurement in Vibrating Machines Using a Doosan Robot", a été accepté le 10 août 2023, présenté le 22 décembre 2023 lors de la conférence "4th IEEE International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC) 2023", et publié le 19 janvier 2024 : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10391014>

Le deuxième article, intitulé "Automated Sound Pressure Measurement Using Doosan Robot: Off-Line Programming for Enhanced Accuracy", a été accepté le 24 mai 2024, présenté le 18 juillet 2024 lors de la conférence "IEEE 28th International Conference on Intelligent

Engineering Systems 2024 (INES) 2024" (<http://www.ines-conf.org/ines-conf/2024index.html>) et sera publié en ligne par la suite.

Le troisième article, intitulé "Improving Accuracy of Acoustic Measurement in Vibrating Machines Using a Doosan Robot: Automated Acoustic Monitoring", constitue une version étendue du premier article. Il a été soumis, accepté et publié le 23 juillet par le "International Journal of Computer Science and Mobile Applications (IJCSMA)", un journal de référence dans le domaine : <https://www.ijcsma.com/articles/improving-measurement-accuracy-of-sound-pressure-in-vibrating-machines-using-a-doosan-robot-108728.html>

1.5 METHODOLOGIE :

Afin d'atteindre les objectifs de recherche fixés, dans un premier temps, une revue exhaustive de la littérature a été menée afin de comprendre en profondeur les mécanismes de rayonnement acoustique et la propagation du son. Ensuite, une étude détaillée du robot Doosan a été réalisée pour observer son comportement dans différentes situations. Cela nous a permis de construire une base solide pour notre propre méthode de mesure.

En deuxième lieu, une approche intégrée a été utilisée impliquant l'intelligence artificielle (IA) et le développement de code Python pour réaliser les mesures de pression acoustique et cartographier le rayonnement acoustique des sources de bruit. Tout d'abord, l'IA a été utilisée pour la détection de l'objet d'intérêt à travers la caméra du robot, permettant ainsi la localisation précise de la source sonore à surveiller. Cette détection a été cruciale pour garantir que le robot soit positionné de manière optimale pour effectuer les mesures requises. Ensuite, des algorithmes et des scripts en Python ont été développés pour planifier la trajectoire du robot afin qu'il puisse se déplacer de manière autonome et efficace autour de la source sonore. Ces codes ont permis au robot de collecter les données acoustiques nécessaires à différentes positions prédéfinies, assurant ainsi une couverture complète de la zone d'intérêt.

Finalement, une fois les mesures réalisées, les informations recueillies ont été utilisées pour tracer la cartographie du rayonnement acoustique de la source sonore. En combinant les données de pression acoustique obtenues à partir des différentes positions du robot, une image précise de la distribution spatiale du bruit émis par la source a pu être reconstruite. Cette distribution fournit des indications importantes pour l'amélioration de la qualité sonore.

1.6 STRUCTURE DU DOCUMENT :

Ce document s'articule en cinq chapitres, soit l'introduction (premier chapitre), quatre chapitres et une conclusion générale. Une conclusion générale prend place à la fin de ce document. Dans le deuxième chapitre, la revue de la littérature est présentée. Une description générale des mécanismes de rayonnement acoustique est élaborée. Les méthodes de cartographie acoustique scientifiques sont explorées, accompagnées d'une introduction aux techniques de détection de l'objet ainsi que la méthode utilisée dans ce travail. Le troisième chapitre contient les développements reliés au premier sous-objectif. En premier lieu, le robot Doosan et le logiciel RoboDK sont présentés. Les capacités de mouvement de robot, les moyens de communication avec celui-ci ainsi que la configuration des accessoires sont détaillés.

Le quatrième chapitre est lié au deuxième sous-objectif. Dans un premier temps, une étude des mesures automatisées pour la détermination de la pression acoustique est abordée. Ensuite, à partir des mesures effectuées à proximité de la source de bruit, la cartographie du rayonnement acoustique des sources de bruit problématiques est effectuée. Des algorithmes autonomes intégrant la caméra et l'intelligence artificielle pour identifier la source sonore, réaliser le balayage et cartographier le rayonnement acoustique sont développés.

Dans le cinquième chapitre, la méthode pour le couplage automatique du robot avec la station d'acquisition BK Connect en vue de réaliser des mesures entièrement automatisées (sous-objectif 3) est présentée. Une analyse et une interprétation des résultats de recherche sont ensuite fournies, mettant particulièrement l'accent sur l'évaluation détaillée des algorithmes développés pour les mesures.

CHAPITRE 2 : ÉTUDE DE L'ART ET GÉNÉRALITÉS

Ce chapitre dresse l'état de l'art concernant les ouvrages et publications de référence sur lesquelles s'appuient les travaux de ce projet de recherche. Les mécanismes de rayonnement acoustique, ainsi que les différentes méthodes de cartographie acoustique sont présentés. Les thématiques étudiées sont les suivantes :

- La nuisance sonore et le phénomène de rayonnement acoustique.
- Les différentes techniques de mesure et localisation de bruit.
- L'intégration des technologies de l'industrie 4.0 telles que l'IA et la robotique dans la gestion et la réduction des nuisances sonores.

2.1 INTRODUCTION A LA NUISANCE SONORE :

Le bruit est un problème majeur dans l'industrie, le transport et la vie courante. Il peut affecter la santé et le bien-être des travailleurs, des passagers et des résidents, ainsi que l'environnement en général. Les sources de bruit peuvent être nombreuses et diverses, allant des machines industrielles aux moyens de transport en passant par les équipements domestiques [9].

2.1.1 Les ondes sonores :

Les ondes désignent le transfert ou le flux d'énergie d'un point à un autre sans transfert de matière. Les ondes peuvent être très différentes les unes des autres selon leurs caractéristiques, le milieu dans lequel elles se propagent ainsi que leur type. Elles apparaissent sous forme d'oscillations lorsqu'elles traversent un milieu quelconque (dans le cas des vagues d'eau ou des ondes sonores) ou sans milieu (dans le cas des ondes électromagnétiques).

a. Les types d'ondes :

Les ondes se présentent sous différentes formes. On peut les distinguer selon leur façon de se propager ou en fonction du milieu nécessaire à leur propagation. Deux types d'ondes dépendent du type de propagation : onde transversale et onde longitudinale, et selon le milieu de propagation nécessaire à la transmission de l'onde, on distingue deux types d'ondes : onde mécanique et onde électromagnétique [10].

Dans le type d'onde transversale, le milieu vibre dans un sens et dans l'autre à angle droit par rapport à la direction de propagation de l'onde/énergie. En d'autres termes, c'est une onde qui se propage perpendiculairement au déplacement du milieu, c'est-à-dire qu'elle monte et descend. L'un des meilleurs exemples d'ondes transversales est celui des ondes radio, des ondes océaniques, de la ficelle ondulante et des ondes polarisées.

Pour l'onde longitudinale, il s'agit d'une variation importante de l'onde. Ici, les particules vibrent dans un sens et dans l'autre dans la direction de la propagation de l'onde/de l'énergie. C'est une onde qui se propage parallèlement au déplacement du milieu, c'est-à-dire qu'elle se comprime et s'étire comme la montre la figure 1. Parmi les exemples de ce type d'onde longitudinale, on peut citer les ondes sonores et les ondes de pression [10].

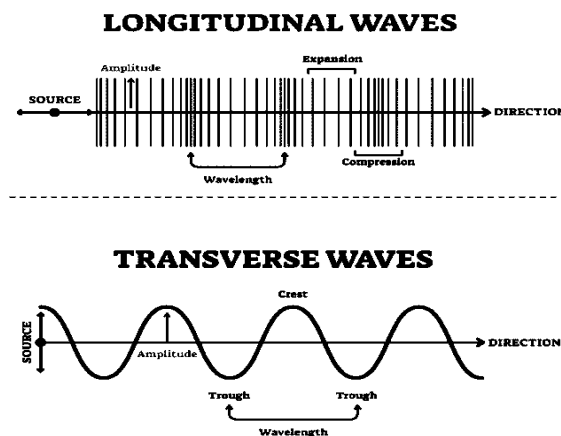


Figure 1 : Onde longitudinale et onde transversale [10]

b. Les caractéristiques d'une onde :

Les ondes peuvent être décrites selon plusieurs caractéristiques. Ces propriétés sont l'amplitude, la longueur d'onde, la fréquence, la vitesse et la période. Il existe également d'autres caractéristiques propres aux ondes (période, énergie, etc.). L'ensemble de ces caractéristiques exercent une influence sur la propagation des ondes [11]. Pour mieux comprendre ces éléments, voyons-les un par un :

– L'amplitude :

L'amplitude d'une onde transversale correspond à la hauteur maximale atteinte par l'onde par rapport à sa position au repos. Pour une onde longitudinale, l'amplitude est évaluée en fonction de la pression maximale des particules comprimées par l'onde [12]. Plus précisément, l'amplitude correspond à la différence entre cette pression maximale et la pression normale du milieu dans lequel l'onde se propage comme la montre la figure 2.

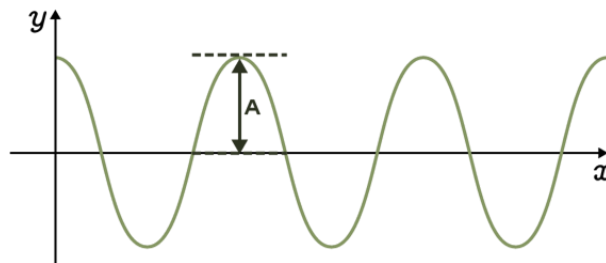


Figure 2 : Détermination de l'amplitude d'une onde transversale [12]

– Longueur d'onde :

La longueur d'onde correspond à la distance parcourue par une onde pour effectuer un cycle. Elle est calculée comme la distance entre deux creux ou crêtes successifs de l'onde. Elle est mesurée en mètres. La longueur d'onde est évaluée différemment selon que l'onde soit transversale ou longitudinale, elle est désignée par λ (lambda) et est égale à la célérité de l'onde (en mètres/seconde) divisée par la fréquence de l'onde (en Hertz).

$$\lambda = c/f \quad [1]$$

Avec :

λ : représente la longueur d'onde (m)

c : représente la célérité (vitesse) de l'onde (m/s)

f : représente la fréquence de l'onde (Hz)

– **La fréquence :**

La fréquence d'une onde correspond au nombre de cycles que l'onde effectue en une seconde. Elle est symbolisée par la lettre f ou encore par la lettre ν (nu). La fréquence (ν ou f) est évaluée différemment selon que l'onde soit transversale ou longitudinale. Elle se mesure en secondes moins un (s^{-1}) ou en Hertz (Hz).

La période est le temps total que met une onde pour accomplir un cycle unique. Elle est mesurée en secondes. Elle est représentée par l'alphabet "T". L'inverse de la période est la fréquence d'une onde.

– **La vitesse :**

La vitesse d'une onde est considérée comme la distance parcourue par l'onde de dans un laps de temps donné. Elle implique le nombre de mètres qu'une onde parcourt en une seconde. La vitesse des ondes est également liée à la fréquence des ondes et à la longueur d'onde.

Elle est symbolisée par la lettre v , se mesure généralement en mètres par seconde (m/s). Elle peut être comprise par l'équation suivante :

$$v = \lambda f \quad [2]$$

Avec v : représente la vitesse (m/s)

c. Onde acoustique :

L'onde acoustique est un modèle de perturbation qui se produit par le mouvement de l'énergie voyageant à travers un milieu (comme l'air, l'eau, ou l'autre matière liquide ou solide).

La source est constituée de quelques objets qui provoquent des vibrations, comme la sonnerie d'un téléphone ou les cordes vocales d'un individu [13]. La vibration perturbe les particules du milieu environnant, ces particules perturbent celles qui se trouvent à côté d'elles, et ainsi de suite. La configuration de la perturbation crée un mouvement vers l'extérieur sous la forme d'une onde. L'onde transporte l'énergie sonore dans le milieu, généralement dans toutes les directions et avec moins d'intensité à mesure qu'elle s'éloigne de la source.

– **Célérité :**

Elle est constante dans un milieu quelconque, mais elle varie suivant ce milieu ou les conditions dans lesquels il se trouve. Pour l'air, on a :

$$c = 331 \sqrt{T/273} \quad [3]$$

Le tableau suivant présente la vitesse moyenne du son dans différents milieux de propagation [14] :

Milieu de propagation du son	Vitesse du son (m/s)
Air	342
Acier	5960,6
Eau	1481,5
Marbre	3810
Alcool à désinfecter	1160

Tableau 1 : Vitesse du son en fonction du milieu de propagation à 20 °C

d. Pression acoustique :

La pression sonore ou pression acoustique (P) est la variation de la pression statique d'un milieu quelconque lorsqu'une onde sonore le traverse. Les particules du milieu assistent la transmission de l'onde sonore et retournent ensuite à leur état initial, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de mouvement net des particules du milieu après la transmission du son. La pression acoustique dépend de la distance à laquelle la mesure est effectuée et de l'environnement atmosphérique dans lequel elle est effectuée. Dans l'air, la pression acoustique peut être mesurée à l'aide d'un microphone et dans l'eau avec un hydrophone [15].

Dans ce contexte, Fletcher et Munson [16] ont réalisé des expériences pour déterminer les niveaux de pression acoustique nécessaires à différentes fréquences pour produire une sensation sonore équivalente à celle d'un son de référence à 1000 Hz. Le résultat est représenté par des courbes (figure 3) qui décrivent la sensibilité de l'oreille humaine en fonction du niveau sonore et de la fréquence.

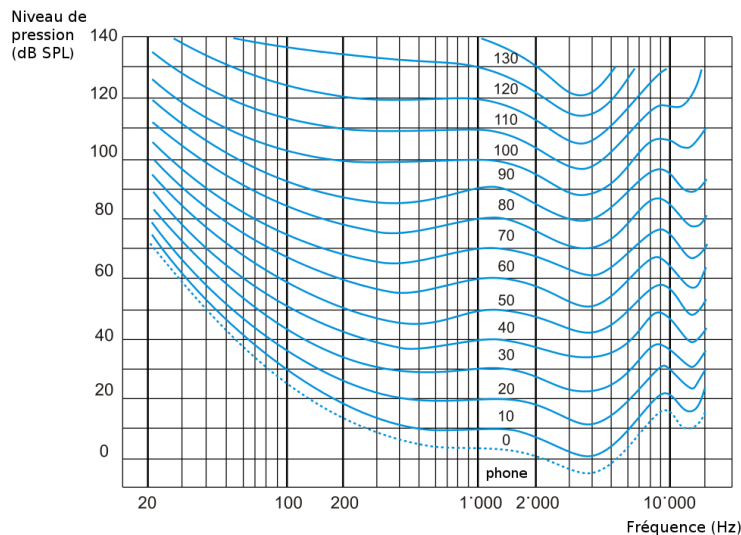


Figure 3 : Courbe isosonique [17]

Ces courbes montrent que l'oreille humaine est plus sensible aux fréquences moyennes, autour de 1000 Hz, et moins sensible aux fréquences extrêmes, graves ou aiguës, à des niveaux sonores équivalents. Cette sensibilité variable est prise en compte dans la création

de normes d'évaluation du son et dans la conception d'équipements audio pour s'assurer que les niveaux de volume perçus correspondent à l'intensité physique réelle des signaux sonores. Les unités de mesure utilisées dans ce contexte sont les phones, qui reflètent la sensation subjective de l'intensité sonore perçue.

Sur ce sujet, l'oreille humaine peut tolérer une très large gamme de pressions sonores, mais la pression sonore minimale qu'un être humain peut entendre est d'environ 20 μPa . Cependant, des dommages causés à l'oreille par une maladie ou une exposition à une musique forte peuvent affecter la sensibilité auditive. En général, la gêne auditive est ressentie à environ 20 Pa et la douleur auditive survient à une pression sonore d'environ 60 Pa [18].

– **Les relations de la pression acoustique :**

Les différentes relations de la pression acoustique sont :

$$p = I/\vartheta$$

$$p = \sqrt{I \times Z_a}$$

$$p = \vartheta \times Z_a \quad [4]$$

Avec :

p : pression sonore [P_a]

ϑ : vitesse des particules [m/s], Où la vitesse des particules (air) est la vitesse et la direction

Z_a : impédance acoustique [$P_a \cdot m^{-3}$]

– **Niveau de pression acoustique (SPL) :**

Le niveau de pression acoustique (SPL) est le niveau de pression d'un son, mesuré en décibels (dB). Le niveau sonore peut être perçu différemment par différentes personnes. Nous devons donc disposer d'un moyen d'obtenir une mesure objective du niveau sonore exprimé en termes numériques [19].

Le niveau de pression acoustique est l'indicateur le plus couramment utilisé de la force de l'onde acoustique. Il correspond bien à la perception humaine de l'intensité sonore et se mesure facilement avec des instruments relativement peu coûteux.

$$L_p = SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \text{ dB} \quad [5]$$

Avec :

P_0 : désigne la pression de référence de 20 μPa (0.00002 Pa)

P : désigne la pression mesurée

e. L'intensité acoustique :

L'intensité acoustique est la quantité d'énergie circulant par unité de temps à travers une unité de surface perpendiculaire à la direction dans laquelle se déplacent les ondes sonores c.-à-d. c'est l'énergie sonore traversant une zone donnée [20].

L'intensité du son est la puissance acoustique par unité de surface. L'unité de l'intensité sonore (I) est le watt par mètre carré [W/m^2]

$$I = p \cdot \vartheta \quad [6]$$

Avec :

p : pression sonore [P_a]

ϑ : vitesse des particules [m/s], Où la vitesse des particules (air) est la vitesse et la direction dans laquelle les particules du milieu vibrent d'avant en arrière lors de la transmission du son.

L'intensité sonore donne également une mesure de la direction, car il y aura un flux d'énergie dans certaines directions, mais pas dans d'autres. Par conséquent, l'intensité sonore est une quantité vectorielle, car elle a à la fois une magnitude et une direction.

La mesure de l'intensité sonore est similaire à celle de la puissance sonore, car elle nécessite deux microphones en phases ou plus disposés de manière à capter l'amplitude et la direction.

– **Niveau d'intensité sonore (SIL) :**

L'intensité sonore (SIL) est le rapport logarithmique de l'intensité sonore mesurée, dans une direction donnée, et l'intensité sonore de référence en décibels I_0 . Le niveau d'intensité sonore est aussi communément quantifié en décibels et est donné par l'équation :

$$L_I = SIL = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad [7]$$

Avec :

I : l'intensité sonore W/m^2

$I_0 = I_{ref}$: L'intensité sonore de référence universellement reconnue, $I_0 = 1pW/m^2$

– **Mesure de l'intensité acoustique :**

La mesure de l'intensité acoustique consiste à mesurer l'énergie sonore qui traverse une zone donnée dans une direction donnée. Elle fait appel à des équations mathématiques complexes prenant en compte plusieurs facteurs, tels que le niveau de pression acoustique et la zone sur laquelle l'énergie sonore est distribuée. Ces équations sont utilisées pour déterminer l'intensité du son dans une zone et une direction donnée, ce qui est essentiel pour comprendre les propriétés du son et ses effets sur le milieu environnant [21].

L'intensité étant la puissance par zone, nous pouvons facilement mesurer l'intensité moyenne spatiale normale sur une surface entourant la source, puis la multiplier par la zone pour obtenir la puissance sonore.

La figure 4 illustre la relation entre la puissance sonore, l'intensité et la distance de la source.

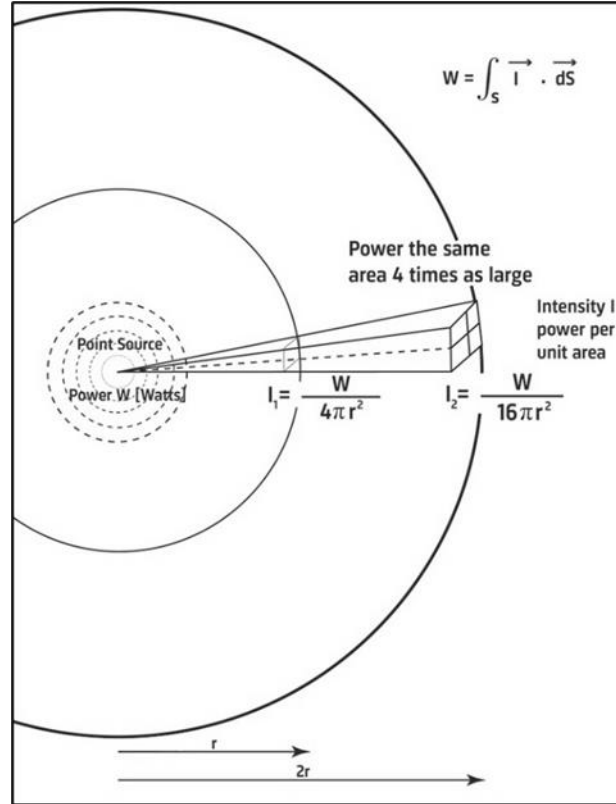


Figure 4 : L'impact de la distance sur l'intensité et la puissance du son [21]

f. La puissance acoustique :

La puissance acoustique est la vitesse à laquelle l'énergie sonore est émise par une source par unité de temps. Cela produit une pression acoustique à une certaine distance de la source.

La puissance acoustique est exprimée en watts (W) [22]. Elle est liée à l'intensité de l'onde sonore, qui correspond à la puissance acoustique par unité de surface. Plus l'intensité est grande, plus la puissance acoustique est élevée.

$$W = I \cdot A \quad [8]$$

Avec :

I : l'intensité du son [W/m^2]

A : Surface [m^2]

Cette mesure est souvent utilisée dans la réglementation sur le bruit des engins de construction afin que les employeurs puissent s'assurer que leurs employés sont bien équipés et peuvent travailler en toute sécurité dans cet environnement. La puissance acoustique est une mesure utile, généralement effectuée à l'aide de plusieurs microphones placés autour de l'objet dans une configuration hémisphérique pour capturer le son émis autour de l'objet dans toutes les directions comme illustre la figure 5.

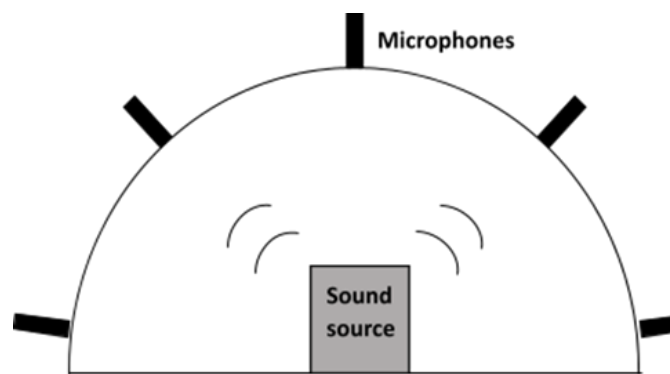


Figure 5 : Microphones placés autour de l'objet dans une configuration hémisphérique [22]

– **Niveau de puissance acoustique :**

En effet, la pression acoustique est une grandeur qui décrit la force exercée par une onde sonore sur une surface, la puissance acoustique décrit la quantité d'énergie sonore émise par unité de temps, et l'intensité acoustique décrit la puissance acoustique par unité de surface. En tout point autour d'une source sonore, on peut mesurer soit l'intensité sonore, soit la pression sonore, comme le montre la figure 6.

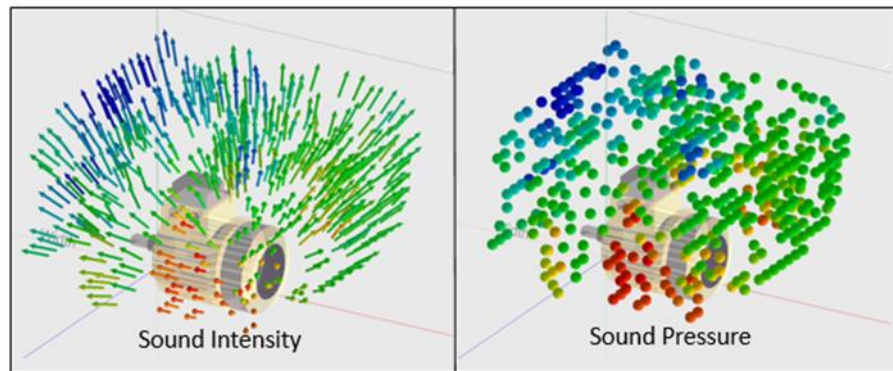


Figure 6 : Intensité du son (gauche) et Pression acoustique (droite) autour d'un moteur électrique [23]

Bien que de nombreuses études aient été menées sur la mesure de l'intensité acoustique à l'aide de deux microphones ou plus, très peu de résultats expérimentaux ont été publiés concernant le cas de mesure de pression. Notre étude s'intéresse à la mesure de la pression sonore en utilisant un simple microphone et le bras robotique. En vue de pouvoir estimer la localisation de source de bruit problématique, ce projet de mémoire vise à développer une méthode expérimentale de mesure automatisée de la pression sonore capable de localiser la source de bruit à travers la cartographie sonore.

2.1.2 Les niveaux et normes de bruit :

Dans l'industrie, le bruit est souvent généré par des machines industrielles, des équipements de production et des outils de travail. Les machines et les équipements tels que les presses, les scies, les souffleuses, les compresseurs, les convoyeurs, les turbines et les ventilateurs peuvent produire des niveaux de bruit élevés. Les opérateurs de machines industrielles sont souvent exposés à des niveaux de bruit supérieurs aux limites recommandées par les normes de santé et de sécurité au travail.

Les normes en matière de bruit sur le lieu de travail varient en fonction des régions et des pays, mais elles sont généralement définies pour protéger la santé auditive des travailleurs. Au Québec, les normes de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) établissent des limites spécifiques pour protéger la santé auditive des

travailleurs en fonction de la durée d'exposition au bruit. Pour une exposition quotidienne typique de 8 heures, la CNESST recommande que le niveau sonore ne dépasse pas 85 dBA [24], visant à prévenir les effets néfastes du bruit sur le long terme. Pour des expositions quotidiennes courtes, comme celles de 4 heures, la limite recommandée pourrait être ajustée, par exemple, à un niveau sonore maximal de 88 dBA. De plus, les travailleurs ne doivent jamais être exposés à des niveaux sonores supérieurs à 140 dBC, peu importe la durée [24].

Le bruit est également un problème majeur dans le transport. Les véhicules motorisés, les avions, les trains et les bateaux sont des sources de bruit importantes, en particulier dans les zones urbaines et les zones densément peuplées. Les pneus qui roulent sur la route, les moteurs, les hélices et les turbines peuvent produire des niveaux de bruit élevés, affectant ainsi la qualité de vie des êtres humains.

Dans la vie courante, les équipements domestiques tels que les appareils électroménagers, les climatiseurs, les aspirateurs, les tondeuses à gazon et les perceuses peuvent produire des niveaux de bruit élevés. Les concerts, les événements sportifs et les festivals sont également des sources de bruit élevé qui peuvent affecter les résidents locaux.

– **L'échelle des décibels :**

Du seuil audible de 0 dB au seuil de douleur de 130 dB, le bruit peut être mesuré. Les sons quotidiens varient généralement entre 30 et 90 décibels. Malgré la nature agréable d'un son, c'est son intensité qui présente un risque pour l'ouïe [25].

En effet, même si un son est agréable, il peut tout de même être dommageable si le volume est excessif comme indique la figure 7.

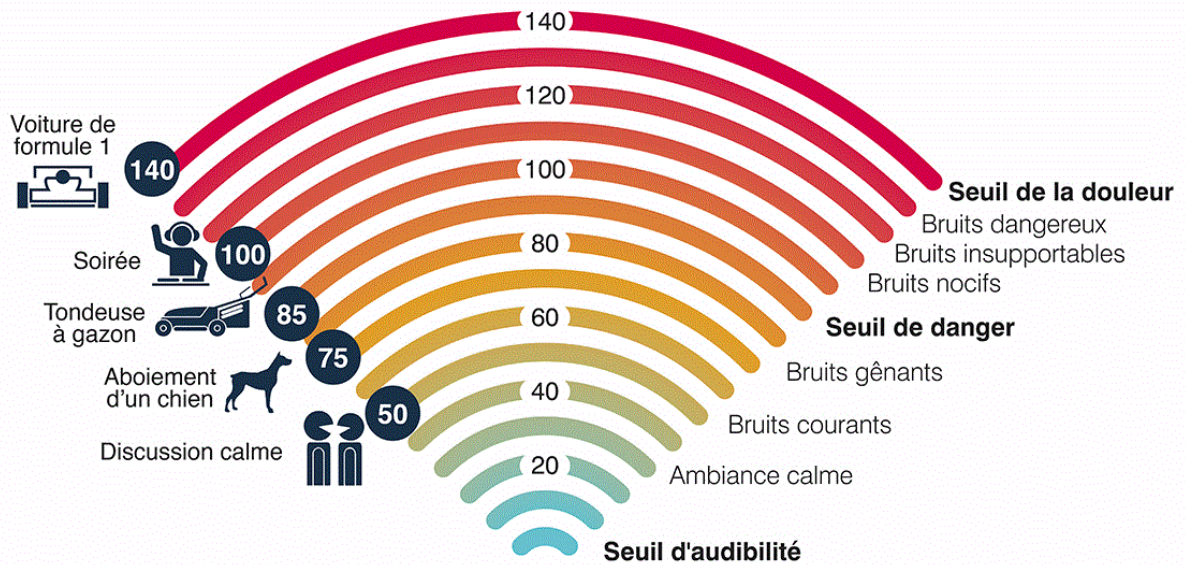


Figure 7 : Échelle des niveaux sonores [25]

Dans cette section, les fondements des ondes sonores ont été explorés, ainsi que les différentes sources de bruit pouvant générer des ondes sonores indésirables. La prochaine section examinera les diverses techniques utilisées pour localiser avec précision les sources de bruit.

2.2 TECHNIQUES CONVENTIONNELLES DE LOCALISATION DES SOURCES DE BRUIT :

Au fil des années, plusieurs techniques de recherche et de mesure ont été proposées afin de mesurer et de localiser les sources de bruit. Un résumé de ces méthodes est présenté dans les références [26 - 27].

Jung et Ih [28] ont introduit une approche globale de réseau de microphones pour localiser avec précision les sources sonores grâce à l'intensimètre acoustique. Leur étude s'est concentrée sur la création de techniques d'intensimètre tridimensionnelle (3D) pour la localisation précise de sources sonores compactes. L'analyse a mis l'accent sur les erreurs de biais spatial découlant de l'irrégularité de la directivité, ce qui a conduit à l'étude de méthodes

de compensation potentielles. Botteldooren et al [29] ont procédé à la localisation de sources de bruit industriel à l'aide de réseaux de microphones dans des conditions météorologiques difficiles. Leur étude a mis en évidence la nécessité d'une surveillance à long terme du bruit industriel. L'étude a identifié des conditions météorologiques difficiles, caractérisées par une atténuation sonore très variable, comme étant des défis importants.

De même, Cherif et Atalla [30] ont mis au point une méthode hybride pour mesurer l'efficacité de rayonnement de structures complexes sur une large gamme de fréquences. Cette technique combine des mesures directes dans une salle anéchoïque et une approche indirecte utilisant l'analyse statistique de l'énergie (SEA) dans une salle réverbérante. La validation a été effectuée sur deux types de constructions : métalliques (panneaux d'aluminium plats et raidis) et composites en sandwich (âme en nid d'abeille). Les résultats expérimentaux ont été comparés aux prévisions analytiques basées sur les formules asymptotiques de Leppington. Leurs études ont démontré que la technique identifie avec précision l'efficacité du rayonnement et fait la distinction entre l'amortissement intrinsèque et l'amortissement par rayonnement.

D'autres études se sont penchées sur divers aspects de la mesure de la pression acoustique, notamment la mesure du niveau de pression acoustique dans la voix et la parole (Jan G et Svante) [31]. La recherche contribue à améliorer la précision et la reproductibilité des mesures du niveau de pression acoustique dans le domaine des études sur la voix et la parole, tandis que (Yunus, M et al.) [32] proposent une méthode avancée pour utiliser la mesure du bruit comme un outil efficace d'analyse avant ou après les efforts de contrôle du bruit pour les industries utilisant des machines mécaniques.

L'objectif principal de la localisation de sources de bruit est de déterminer la position spatiale des sources de bruit afin de pouvoir prendre des mesures appropriées pour les réduire ou les éliminer. Cela peut être particulièrement important dans les domaines où le bruit est considéré comme une nuisance.

Cette section présente les techniques de localisation de source de bruit. L'accent y est mis respectivement sur les différentes méthodes de cartographie acoustique.

2.2.1 La cartographie acoustique :

La cartographie acoustique [33] est une méthode de visualisation des niveaux de bruit dans un environnement donné. Elle permet de déterminer la répartition spatiale des niveaux de pression acoustique en fonction de la fréquence et du temps. Elle est utilisée dans de nombreux domaines tels que l'industrie, la recherche et l'environnement pour évaluer les niveaux de bruit et prendre des mesures de prévention et de réduction des nuisances sonores.

Il existe diverses méthodes pour réaliser une cartographie acoustique, telles que la méthode des faisceaux de rayonnement, celle de l'intensité sonore, celle de la pression acoustique, et bien d'autres encore. Chacune de ces approches présente ses avantages et ses limites en termes de précision, de coût et de complexité [33].

La plupart de ces méthodes impliquent l'utilisation de microphones. Les données enregistrées sont ensuite traitées à l'aide de logiciels spécialisés pour produire des cartes de bruit. Dans la suite, examinons de plus près certaines des méthodes couramment utilisées dans la cartographie acoustique.

a. La méthode de microphone à réseau fixe :

La cartographie acoustique peut également être réalisée à l'aide d'un réseau de microphones fixes placés à différents endroits de l'espace, ce qui est appelé la méthode de microphone à réseau fixe. Cette méthode permet de mesurer la pression acoustique en plusieurs points de l'espace en même temps, ce qui permet d'obtenir une cartographie acoustique plus précise et plus détaillée.

Un exemple détaillé de cette méthode est présenté dans l'article de Ambrosini et al. [34]. Dans cette méthode, les microphones sont généralement placés à des hauteurs différentes pour tenir compte des variations de la pression acoustique en fonction de la hauteur, et sont

synchronisés pour garantir une mesure simultanée de la pression acoustique en différents points de l'espace comme indique la figure 8.

Les mesures de pression acoustique enregistrées par les microphones sont ensuite traitées pour créer une représentation visuelle de l'environnement sonore, généralement sous la forme d'une carte en couleurs ou d'un graphique tridimensionnel. Cette représentation visuelle peut fournir des informations détaillées sur différents endroits de l'espace, les directions de propagation des ondes sonores, les sources de bruit, etc.



Figure 8 : Méthode de microphone à réseau fixe [35]

b. Sonde d'intensité avec un système de guidage robotisé :

Les sondes d'intensité sont des instruments de mesure utilisés pour effectuer des mesures précises dans des environnements où les interférences électromagnétiques peuvent rendre les mesures difficiles.

Un système de guidage robotisé peut être utilisé pour automatiser le processus de mesure en guidant la sonde d'intensité à travers le circuit. Les systèmes de guidage robotisés sont couramment utilisés dans l'industrie pour effectuer des tâches répétitives ou dangereuses, ou pour accroître l'efficacité et la précision des processus de fabrication.

L'étude de R. Bjelic et al. [36] présente une procédure de mesure de l'intensité sonore à l'aide d'un système robotisé. Dans cette étude, la sonde d'intensité sonore est montée sur un bras robotisé, qui se positionne automatiquement dans des points de mesure définis. Les résultats des mesures sont comparés pour celles effectuées à l'aide du bras robotisé et pour deux autres mesures réalisées manuellement par des personnes portant la sonde d'intensité à la main.

Le système de guidage robotisé, présenté dans la figure 9, peut être programmé pour suivre un itinéraire prédéfini dans le circuit, en s'assurant que la sonde d'intensité mesure les valeurs de courant à chaque point spécifique. Les données collectées peuvent être stockées et analysées pour détecter les variations de courant et d'autres anomalies dans le circuit.



Figure 9 : Sonde d'intensité avec un système de guidage robotisé [37]

c. « Beamforming » a l'aide d'une antenne multi microphonique :

Le Beamforming est une technique utilisée pour améliorer la qualité du signal dans les systèmes de communication sans fil, tels que les téléphones portables et les réseaux sans fil. Cependant, cette technique peut également être utilisée dans le domaine de l'acoustique pour améliorer la qualité des mesures de bruit.

Cette technique peut être utilisée pour améliorer la précision des mesures de bruit en utilisant une antenne multi-microphonique. Cette antenne est composée de plusieurs microphones placés à des positions différentes pour capturer des signaux sonores provenant de différentes directions comme le montre la figure 10.

Christensen et J. Hald [38] abordent le concept d'imagerie par formation de faisceaux. Ils mettent en lumière les principaux paramètres essentiels aux performances de l'antenne tels que la résolution et le niveau de lobe latéral. Dans leur étude, diverses conceptions d'antennes, dont l'antenne circulaire Brüel & Kjær, sont présentées et comparées.

Le signal capturé par chaque microphone est traité de manière individuelle pour compenser les différences de temps d'arrivée et d'amplitude des signaux sonores capturés. Ensuite, les signaux traités de chaque microphone sont combinés pour créer une image globale de la source sonore, ce qui permet de localiser plus précisément la source du bruit. En utilisant cette technique, il est possible d'obtenir une cartographie acoustique plus précise en identifiant plus précisément les sources de bruit dans un environnement donné.

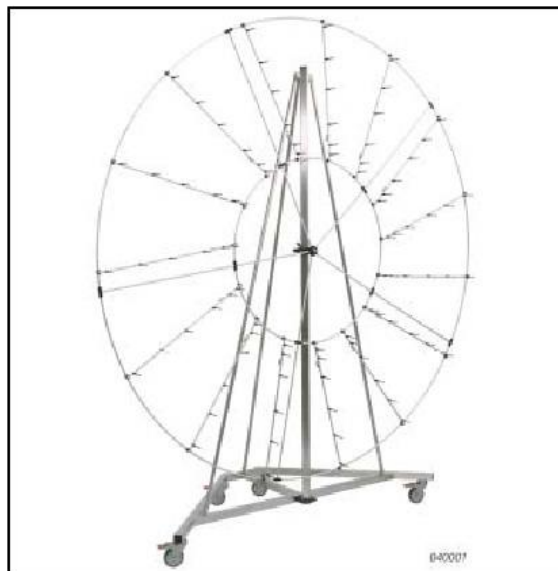


Figure 10 : Antenne multi microphonique pour le « Beamforming » [38]

d. La méthode NAH (Nearfield Acoustic Holography) :

La méthode NAH est une technique de cartographie acoustique qui permet de visualiser les sources sonores dans l'espace proche d'une surface, en utilisant des mesures de pression acoustique. Cette méthode est particulièrement utile pour les situations où les sources sonores sont proches de la surface d'un objet, telles qu'un mur, une paroi ou une machine.

Thomas J. et al. [39] ont contribué à un article décrivant la Nearfield Acoustic Holography (NAH) comme un outil efficace pour visualiser les sources acoustiques à partir de mesures de pression réalisées dans le champ proche des sources à l'aide d'un réseau de microphones.

La méthode NAH peut être utilisée dans de nombreux domaines, tels que l'industrie, l'environnement et la santé. Elle peut être utilisée pour localiser les sources de bruit dans une usine de production, pour évaluer les niveaux de bruit dans un environnement de travail ou pour étudier les effets des sources sonores sur la santé. En utilisant cette méthode, il est possible de déterminer la position et l'intensité de chaque source sonore, ce qui permet de créer une cartographie acoustique en 3D. La figure 11 illustre le système d'acquisition de la méthode NAH.

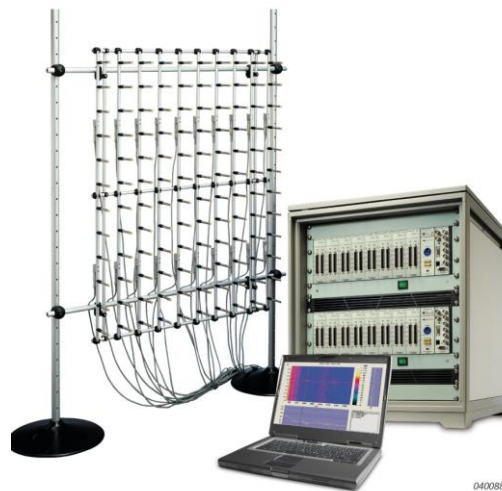


Figure 11 : Système d'acquisition NAH [40]

e. Sonde d'intensité et repérage manuel par caméra :

Le repérage manuel par caméra est une méthode de mesure utilisée en cartographie acoustique. Elle consiste à utiliser une caméra pour repérer les différentes positions de mesure sur une surface donnée. Les positions de mesure sont préalablement déterminées à l'aide d'un logiciel de cartographie acoustique. La caméra permet de repérer ces positions sur le terrain, ce qui facilite la mesure et permet de s'assurer de la précision des mesures effectuées.

Dans ce contexte, Emiel et al. [41] introduisent les techniques de visualisation sonore qui ont joué un rôle clé dans le développement de l'acoustique. Leur article explore non seulement les fondements théoriques de la méthode, mais aussi ses applications pratiques telles que l'analyse du chemin de transfert par balayage avec la caméra et la cartographie des champs vectoriels d'intensité acoustique.

Cette technique peut être utilisée pour identifier les zones où le niveau de bruit est le plus élevé dans un environnement donné. Elle peut également être utilisée pour déterminer la position exacte d'une source sonore, ce qui peut être utile pour l'atténuation du bruit.

L'utilisation de la sonde d'intensité et du repérage manuel par caméra pour la cartographie acoustique présente plusieurs avantages. Elle est relativement facile à mettre en œuvre et peut fournir des résultats précis pour la localisation des sources sonores. Elle peut également être utilisée pour mesurer la puissance acoustique dans des environnements complexes où d'autres techniques de cartographie acoustique peuvent ne pas être pratiques telles que les aéroports ou les usines [41].

2.2.2 Comparaison des méthodes de cartographie acoustique :

Chaque approche de cartographie acoustique présente ses propres avantages et inconvénients, influençant le choix selon les besoins spécifiques de l'application. Ci-dessous, une comparaison détaillée des méthodes couramment utilisées.

Méthode	Avantages	Inconvénients
La méthode de microphone à réseau fixe	Surveillance continue sur une zone spécifique.	Nécessite un grand nombre de capteurs pour une couverture optimale.
Sonde d'intensité avec un système de guidage robotisé	- Collecte de données précise - Peut être utilisé dans des environnements complexes.	- Nécessite une planification minutieuse du mouvement du robot - Coût potentiellement élevé.
« Beamforming »	Précision accrue dans la localisation des sources sonores.	- Coût élevé - Sensible aux interférences et aux conditions atmosphériques
La méthode NAH	Précis dans les applications à proximité des sources sonores.	- Requier une connaissance précise - Coût potentiellement élevé.
Sonde d'intensité et repérage manuel par caméra	- Flexibilité de localisation des sources sonores - Peut être utilisé dans des espaces complexes.	La précision dépend de l'exactitude du repérage manuel.

Tableau 2 : Avantages et limites des méthodes de cartographie acoustique

Dans cette section, les différentes techniques classiques de localisation de sources de bruit ont été passées en revue. La suite sera consacrée pour présenter notre approche automatisée de la localisation des sources de bruit.

2.3 TECHNIQUES DE LOCALISATION AUTOMATIQUE DE SOURCES DE BRUIT

Les méthodes classiques de cartographie acoustique présentées précédemment fournissent des informations précieuses sur les différentes facettes de la mesure de la pression acoustique. Cependant, elles reposent souvent sur l'utilisation de réseaux de microphones multiples, ce qui présente plusieurs limites importantes. Ces limites comprennent la nécessité de procédures d'étalonnage complexes, l'augmentation des coûts et le temps nécessaire à la collecte des données, ce qui entrave parfois l'identification en temps réel des sources de bruit.

Pour surmonter les limites des méthodes traditionnelles, l'automatisation et la robotique ont suscité un intérêt croissant pour les mesures de pression acoustique. Plusieurs études récentes ont exploré l'utilisation de systèmes robotiques dans divers contextes.

Par exemple, Wang et al. [42] ont mis au point un système automatisé capable de mesurer le niveau de puissance acoustique des systèmes CVC. Par ailleurs, Yang et al [43] ont mis au point une plateforme robotique pour mesurer la puissance et l'intensité sonores dans les espaces ouverts. Néanmoins, ces méthodes nécessitent toujours l'intervention d'un opérateur pour définir l'étalonnage précis afin d'obtenir la meilleure cartographie, ce qui peut conduire à un processus de mesure semi-automatique.

Dans ce contexte, plusieurs chercheurs comme M. Blazek et al [44] présentent une étude de cas sur la cartographie sonore dans un environnement urbain à l'aide d'un système de microphones à balayage. Les auteurs ont utilisé un système de microphones à balayage monté sur un véhicule pour mesurer les niveaux sonores le long d'un itinéraire prédéfini à travers la ville. Aussi C. Mansouri et al [45] présentent une étude expérimentale de la cartographie de la puissance sonore d'une machine vibrante à l'aide d'un microphone à balayage et d'un robot. Les chercheurs ont utilisé une méthode de demi-sphère pour mesurer l'intensité sonore en différents points de la surface d'un réseau hémisphérique entourant la machine. Le microphone de balayage et le robot ont été utilisés pour automatiser le processus de mesure et obtenir un balayage entièrement automatique de la machine. Les résultats ont montré que la méthode proposée pouvait cartographier avec précision la puissance sonore de la machine vibrante, ce qui pourrait être utile dans les industries pour identifier et atténuer les sources de bruit.

Dans les articles mentionnés, les auteurs présentent diverses méthodes expérimentales pour les mesures acoustiques à l'aide de systèmes robotiques dans différents contextes. Ces méthodes reposent sur des instructions préprogrammées qui guident les robots dans l'exécution de tâches répétitives. Il est à noter qu'aucune de ces méthodes n'a encore intégré l'intelligence artificielle pour des mesures autonomes.

Ce travail vise à étudier et à améliorer la mesure de la pression acoustique dans les machines vibrantes à l'aide d'un robot Doosan. L'objectif est d'automatiser le processus de mesure, en permettant un balayage entièrement automatisé à l'aide d'un système de vision robotique Doosan et d'un seul microphone, ce qui permet une localisation précise de la source. De plus, le robot est synchronisé avec le système d'acquisition de données, garantissant ainsi que les mesures sont prises et enregistrées de manière autonome, et ne nécessitent aucune intervention humaine. La prochaine section détaillera l'application de la méthode de microphone à réseau fixe sélectionnée dans ce cadre de projet.

2.3.1 Méthode de microphone adoptée :

Le choix de la méthode de mesure acoustique dépend de plusieurs facteurs tels que l'objectif du test, l'équipement disponible, le niveau de précision souhaité, le niveau de bruit de fond ou encore l'environnement de test, il est donc important de prendre en compte ces éléments lors du choix de la méthode de mesure pour garantir des résultats précis et de qualité.

Selon l'ISO 3745 [46] et ISO 3740 [47], la méthode de microphones à réseau fixe est moins rigoureuse en ce qui concerne les exigences de l'environnement d'essai et de la configuration de mesure.

Pour cette méthode, tous les types de sources de bruit sont pris en charge (continus, intermittents, fluctuants, rafales isolées) et il n'y a aucune limitation quant à la taille de la source, à condition que les conditions de mesure soient respectées. Les mesures peuvent être effectuées à l'intérieur et à l'extérieur, avec un ou plusieurs plans de réflexion sonore présents (par exemple, le sol). Des procédures supplémentaires sont suggérées pour appliquer des corrections si l'environnement n'est pas idéal. L'influence de l'environnement doit être déterminée soit à l'aide d'une source sonore de référence (préférable) soit par des mesures d'absorption en salle. La figure 12 illustre la méthode de microphone à réseau fixe utilisée.

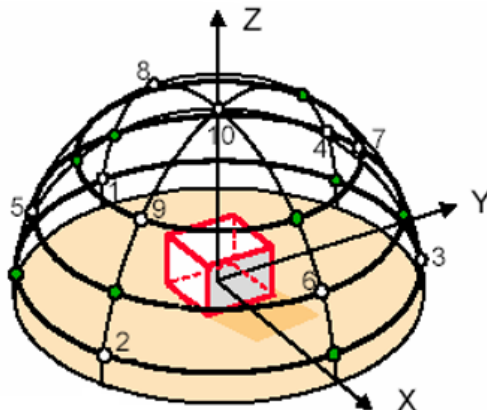


Figure 12 : Méthode de microphone à réseau fixe [47]

La norme décrit différentes dispositions de microphones autour d'une source sonore comme illustre la figure 13. Le rayon de mesure, r , doit satisfaire à toutes les conditions suivantes :

- $r \geq 2d_0$ ou $r \geq 3h_0$, la plus grande des deux, avec d_0 est la dimension caractéristique de la source de bruit testée, et h_0 est la distance entre le centre acoustique de la source et le sol.
- $r \geq \lambda/4$ où λ est la longueur d'onde du son à la fréquence la plus basse qui nous intéresse
- $r \geq 1\text{m}$

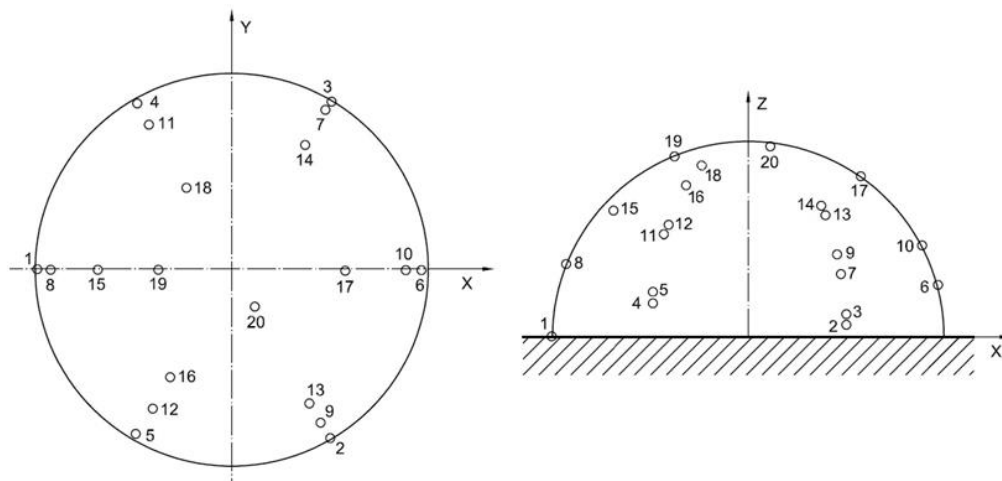


Figure 13 : Positions des microphones pour la surface de mesure hémisphérique [47]

La norme décrit aussi la distance entre les microphones et la source sonore comme indique la figure 14. Lorsqu'il s'agit d'une source à faible bruit, les mesures doivent être effectuées

dans une plage de fréquences limitée, le rayon de mesure peut être inférieur à 1 mètre, mais ne doit pas être inférieur à 0,3 mètre. Toutefois, les deux premières conditions sont remplies.

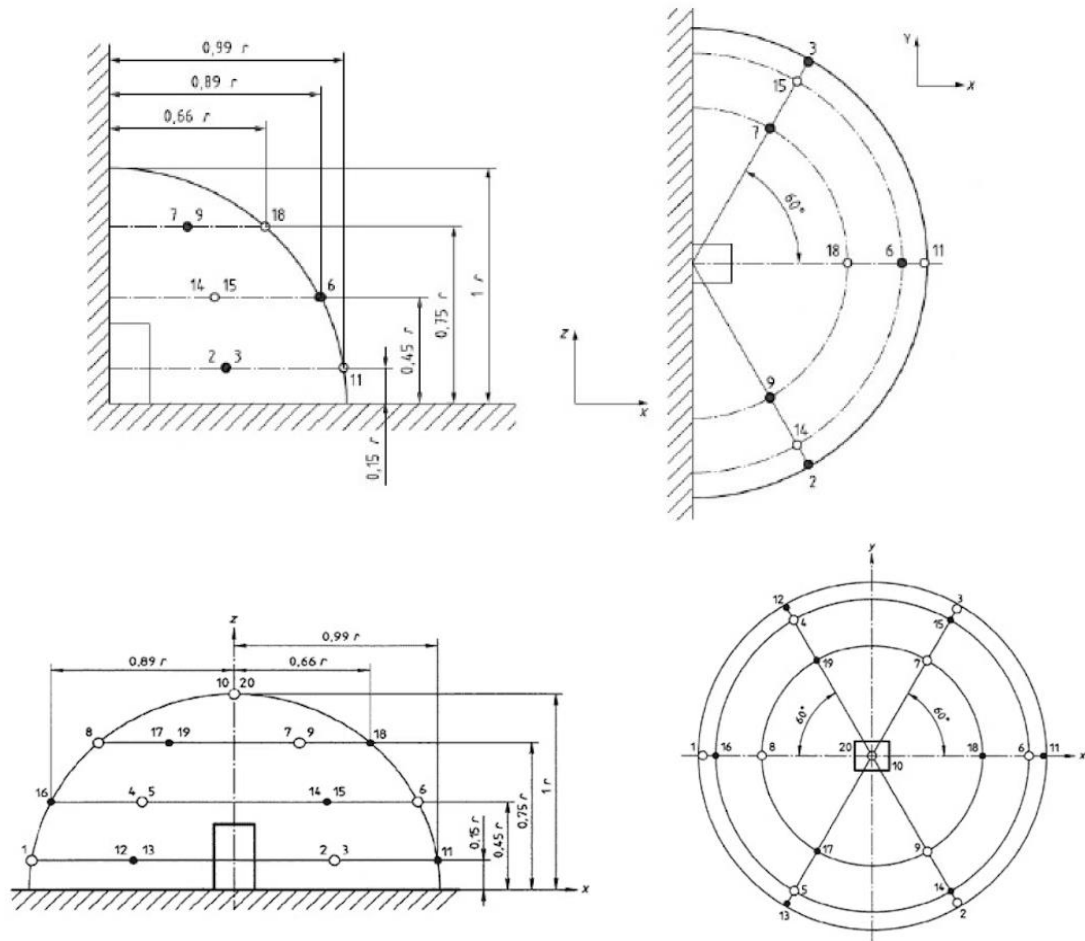


Figure 14 : Positionnement des microphones par rapport à la source et leurs distances [47]

Malgré les progrès dans le domaine de la robotique, il est important de reconnaître que les robots restent encore dépendus de l'intervention humaine pour leur fonctionnement optimal. Actuellement, ils sont principalement capables d'exécuter des tâches préprogrammées. Cette observation souligne l'importance de poursuivre nos recherches dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA), pour améliorer la capacité des robots à prendre des décisions autonomes et à s'adapter à des situations variées.

2.4 LES TECHNIQUES DE DETECTION D'OBJET BASEES SUR L'IA :

Dans le cadre de l'Industrie 4.0, la robotique associée aux caméras est une véritable révolution. Cette combinaison de technologies offre une automatisation avancée et des capacités de prise de décision autonome dans les processus industriels. Dans ce contexte, les techniques de détection d'objets basées sur l'IA sont essentielles. Alors que diverses techniques d'IA sont utilisées dans différents domaines, ici, nous nous concentrons principalement sur la détection et l'imagerie.

La détection d'objets est une tâche de vision par ordinateur qui consiste à identifier et à localiser des objets dans des images ou des vidéos. Il s'agit d'une partie importante de nombreuses applications, telles que la surveillance, les voitures autonomes ou la robotique. Un résumé de ces techniques est présenté dans l'étude [48].

L'une des premières tentatives réussies pour résoudre le problème de la détection d'objets à l'aide de l'apprentissage profond a été le modèle R-CNN (Regions with CNN features), développé par Girshick.R et al. [49] en 2014. Ce modèle utilisait une combinaison d'algorithmes de proposition de régions et de réseaux neuronaux convolutionnels (CNN) pour détecter et localiser des objets dans des images. Cette démarche de segmentation vise à délimiter la zone de chaque objet.

Ensuite, un algorithme de suppression non maximale est appliqué pour identifier les prédictions les plus pertinentes des objets candidats. Le flux de traitement de R-CNN est présenté dans la figure 15.

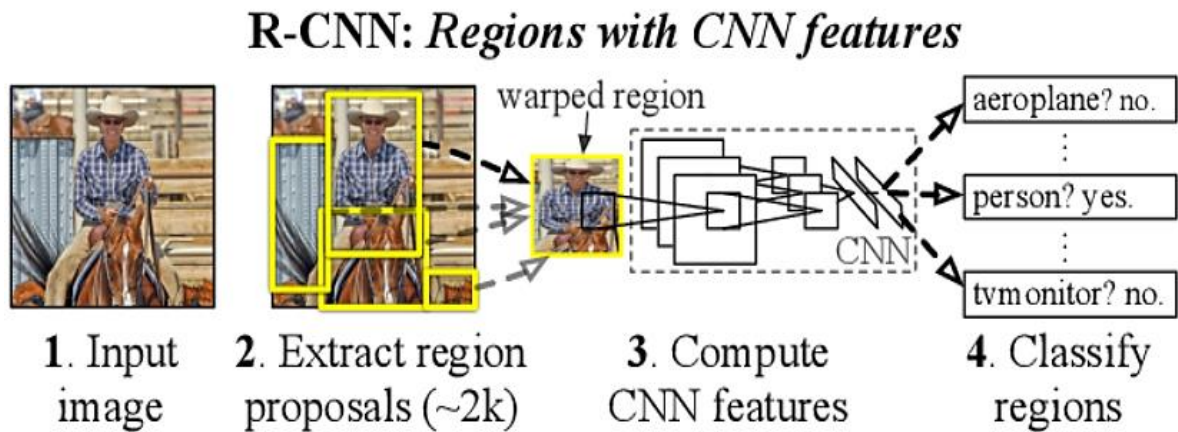


Figure 15 : Flux de traitement de R-CNN [49]

Cet algorithme se caractérise par sa lenteur en termes de temps de calcul et son coût élevé, ce qui a incité l'auteur à proposer une architecture alternative appelée Fast R-CNN, présentée dans Girshick.R (2015) [50]. Le Fast R-CNN permet une significative réduction du temps d'exécution. La principale différence entre cette nouvelle architecture et la précédente est que cette fois-ci, l'entrée du réseau de neurones convolutionnels (CNN) ne consiste pas en 2000 régions, mais en l'image elle-même. Ensuite, le CNN génère une carte des caractéristiques pour toute l'image, à partir de laquelle les régions d'intérêt sont identifiées. Ren et al. [51] ont proposé une architecture légèrement différente appelée Faster R-CNN. Ils ont réussi à réduire encore davantage le temps d'exécution en remplaçant l'algorithme de recherche sélective des régions d'intérêt par un réseau de neurones entraîné à sélectionner ces régions à partir des caractéristiques extraites par le CNN. Cette approche a accéléré le processus de détection jusqu'à dix fois par rapport au Fast R-CNN.

Le flux de traitement de Fast R-CNN est présenté dans la figure 16.

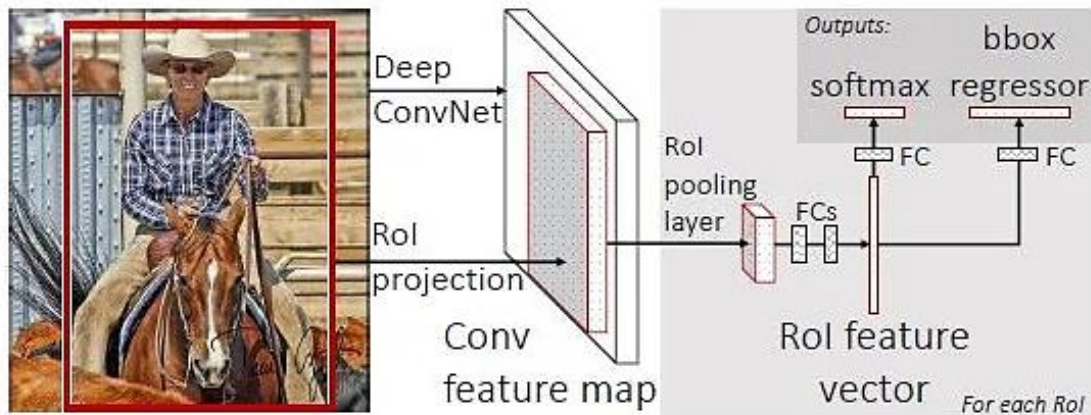


Figure 16 : Flux de traitement de Fast R-CNN [51]

Une nouvelle approche de détection appelée You Only Look Once (YOLO) est présentée dans les recherches de Redmon et al. [52], ce qui a grandement contribué à l'évolution des applications en temps réel grâce à son exécution rapide. YOLO est devenu l'algorithme emblématique des méthodes en une étape. Son fonctionnement repose sur la division de l'image en régions, chacune étant chargée de détecter et de localiser les objets présents dans cette zone spécifique. Chaque région retourne une prédiction concernant le cadre englobant de l'objet connu par (bounding box), ainsi que sa classe et la probabilité de présence de l'objet dans cette portion de l'image. Ce processus engendre souvent des prédictions redondantes dues à plusieurs régions prédisant le même objet avec différents cadres proposés. Dans ce cas, la dernière étape de l'algorithme consiste à appliquer la suppression non maximale pour sélectionner la meilleure prédiction parmi celles obtenues.

You Only Look Once (YOLO) propose d'utiliser un réseau neuronal de bout en bout qui prédit les boîtes englobantes et les probabilités de classe en une seule fois. Cette approche diffère de celle adoptée par les algorithmes de détection d'objets précédents, qui réutilisaient des classificateurs pour effectuer la détection. Alors que des algorithmes tels que Faster RCNN détectent des régions d'intérêt possibles à l'aide du réseau de proposition de régions, puis effectuent la reconnaissance de ces régions séparément, YOLO effectue toutes ses prédictions à l'aide d'une seule couche entièrement connectée.

Les méthodes qui utilisent les réseaux de proposition de régions effectuent plusieurs itérations pour la même image, alors que YOLO se contente d'une seule itération. L'algorithme YOLO prend une image en entrée et utilise ensuite un simple réseau neuronal convolutionnel profond pour détecter des objets dans l'image. L'architecture du modèle CNN qui constitue l'épine dorsale de YOLO est illustrée ci-dessous.

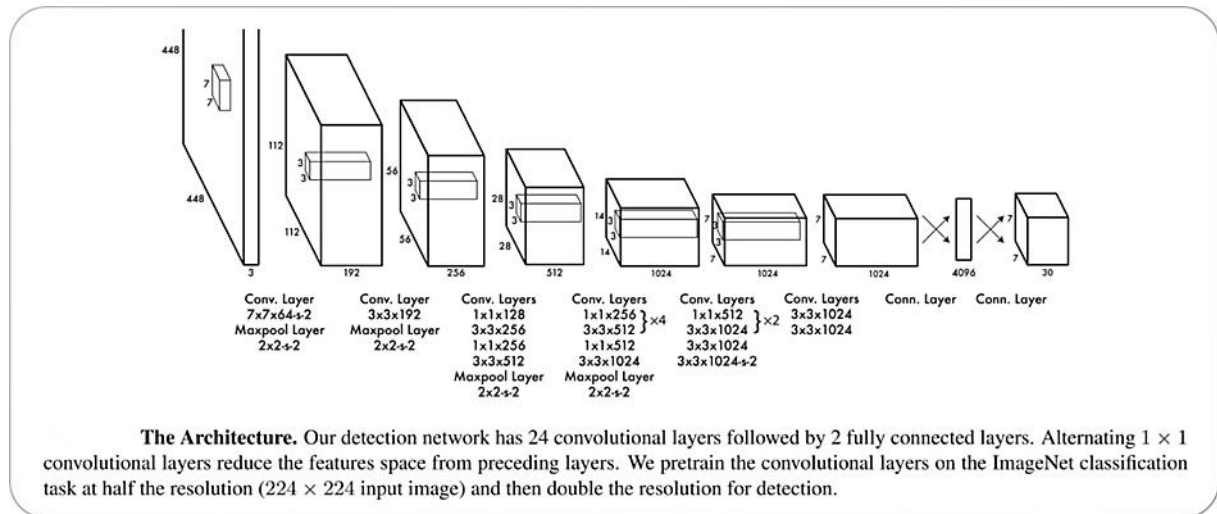


Figure 17 : Architecture de YOLO [52]

Dans la figure ci-dessus, le réseau de détection comporte 24 couches convolutives suivies de 2 couches entièrement connectées. Les couches convolutives 1×1 alternées réduisent l'espace des caractéristiques des couches précédentes. Les couches convolutives concernées par la tâche de classification ImageNet à une résolution deux fois moindre (image d'entrée 224×224), puis à une résolution deux fois plus élevée pour la détection.

YOLO divise une image d'entrée en une grille $S \times S$. Si le centre d'un objet se trouve dans une grille $S \times S$, l'image est divisée en deux. Si le centre d'un objet tombe dans une cellule de la grille, cette cellule est responsable de la détection de cet objet. Chaque cellule de la grille prédit des boîtes de délimitation B et des scores de confiance pour ces boîtes. Ces scores de confiance reflètent le degré de confiance du modèle dans la présence d'un objet dans la boîte et le degré de précision de la boîte prédite.

L'une des principales techniques utilisées dans les modèles YOLO est la suppression des maxima (NMS). La NMS est une étape de post-traitement utilisée pour améliorer la précision et l'efficacité de la détection d'objets. Dans la détection d'objets, il est fréquent que plusieurs boîtes de délimitation soient générées pour un seul objet dans une image. Ces boîtes de délimitation peuvent se chevaucher ou être situées à des positions différentes, mais elles représentent toutes le même objet. Le NMS est utilisé pour identifier et supprimer les boîtes d'encombrement redondantes ou incorrectes et pour générer une seule boîte d'encombrement pour chaque objet de l'image.

Plusieurs nouvelles versions du même modèle ont été proposées depuis la publication initiale de YOLO en 2015, chacune s'appuyant sur son prédécesseur et l'améliorant.

YOLOv2, présenté par Redmon & Farhadi (2017) [53], vise à améliorer le processus de détection en permettant la prédiction de plusieurs objets dans une seule région, contrairement à YOLO qui ne pouvait prédire qu'un seul objet par région. YOLOv3, également proposé par les mêmes chercheurs [54], améliore la détection des petits objets en prédisant sur trois échelles différentes. YOLOv4, introduit par Bochkovskiy et al. (2020) [55], présente plusieurs améliorations, notamment l'utilisation de la technique d'augmentation de données appelée Mosaique et l'adoption de la méthode DropBlock pour réduire le surapprentissage.

YOLOv5, développé par Jocher et al. [56], est une version open source de YOLOv4, construite sur le Framework pytorch. YOLOX (Ge et al.) améliore la précision de YOLOv5 en utilisant un détecteur sans ancre et en séparant les processus de classification et de localisation [57]. YOLOv6 adopte également le concept de la tête découplée et la méthode de détection sans ancre, tout en utilisant la fonction de perte SIOU pour superviser l'apprentissage du réseau [58]. YOLOv7 propose des performances supérieures à YOLOv4 avec moins de paramètres à entraîner, en utilisant le bloc de calcul E-ELAN et en s'entraînant à partir de zéro sur la base de données MS COCO [59].

Enfin, YOLOv8, la dernière version développée par Ultralytics, est conçue comme un cadre prenant en charge toutes les versions précédentes de YOLO, ce qui facilite la comparaison

de leur performance [60]. Une comparaison des performances de YOLOv6 avec les différentes versions de YOLO est illustrée ci-dessous.

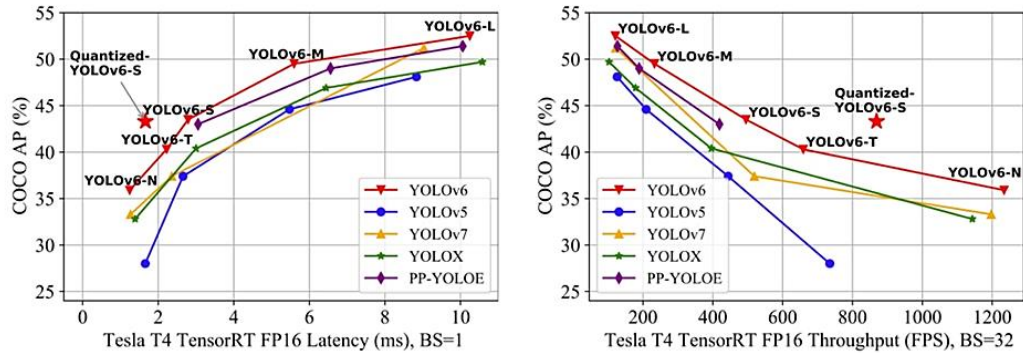


Figure 18 : Comparaison des performances de YOLOv6 avec les différentes versions de YOLO [61]

2.5 CONCLUSION :

Ce chapitre a présenté les généralités sur les ondes sonores et la réglementation, ainsi que les différentes techniques de mesure et de localisation des sources sonores. Nous avons également présenté la robotique dans les mesures acoustiques et enfin les techniques de détection d'objets basées sur l'apprentissage profond.

Dans le cadre de ce projet de recherche, la méthode de microphone fixe a été choisie pour adoption, puis automatisée en fusionnant les technologies de la robotique et de l'IA. L'intérêt porté sur la mesure du niveau de pression acoustique (SPL) a conduit à la conception d'un système autonome capable d'effectuer un balayage automatique.

La troisième partie de cette mémoire s'intéresse au rôle central du robot Doosan dans notre travail. Une description complète des divers mouvements et capacités du robot est fournie, en mettant l'accent sur les moyens de communication tels que l'interface et les commandes qui permettent de le piloter, ainsi que sur la solution utilisée pour la programmation hors ligne de ce robot, le logiciel RoboDK.

CHAPITRE 3 : LE ROBOT COLLABORATIF DOOSAN

Dans le cadre de la révolution industrielle 4.0, l'industrie mondiale est confrontée à des défis d'automatisation croissants, visant à augmenter la productivité, réduire les coûts tout en améliorant la qualité. Les robots industriels étaient déployés pour automatiser des tâches répétitives et dangereuses, opérant souvent isolément des travailleurs humains.

Dans ce chapitre, une présentation détaillée du robot Doosan sera entreprise, en mettant en avant la plateforme de simulation et de programmation des robots industriels RobotDK. Les fonctionnalités de programmation hors ligne seront également examinées en détail.

3.1 HISTORIQUE DE LA ROBOTIQUE :

L'histoire des robots industriels remonte aux années 1950 lorsque les premiers robots ont été développés pour assister les travailleurs dans les processus de fabrication. L'introduction du premier robot industriel programmable, le célèbre Unimate, développé par George Devol et Joseph Engelberger en 1954 a marqué un tournant dans le domaine [62].

Dans les années 1960 et 1970, les robots industriels ont été principalement utilisés dans des applications de soudage, de manipulation de matériaux et de peinture. Ces robots étaient souvent volumineux, lourds et programmés en utilisant des langages de programmation spécifiques.

Au fil du temps, la technologie de la robotique industrielle s'est considérablement améliorée. Dans les années 1980, l'introduction des robots à commande numérique et des systèmes de vision a permis aux robots de réaliser des tâches plus complexes et de s'adapter à des environnements de production variés. Les robots sont devenus plus précis, plus rapides et plus polyvalents.

Les années 1990 et 2000 ont été marquées par des avancées majeures dans la robotique industrielle, notamment l'intégration de capteurs avancés pour la détection et l'interaction avec l'environnement, l'amélioration des systèmes de contrôle et la miniaturisation des

composants. Ces avancées ont permis l'émergence de la robotique collaborative, où les robots travaillent en étroite collaboration avec les humains [62].

De nos jours, la robotique industrielle continue de progresser rapidement. Les robots collaboratifs, tels que le robot Doosan, sont devenus de plus en plus sophistiqués, sûrs et faciles à programmer. Ils sont capables de réaliser une grande variété de tâches, de la manipulation précise à l'assemblage complexe, en passant par l'inspection de qualité.

3.2 ROBOT DOOSAN :

3.2.1 L'évolution des bras robotiques industriels Doosan :

Doosan Robotics est un leader du marché des robots collaboratifs (cobots), proposant des solutions d'automatisation inégalées.

Fondée en 2015, Doosan Robotics répond aux efforts de la société mère Doosan Group pour redéfinir un nouveau moteur de croissance et de nouveaux domaines d'activité. Après trois années de recherche et de développement recrutant les meilleurs chercheurs et développeurs de l'industrie, l'entreprise a développé avec succès une gamme de quatre modèles de cobots en utilisant sa technologie brevetée [63].

Fin 2017, un site de production d'une capacité annuelle de 10 000 unités a été mis en place à Suwon, Gyeonggi-do, en Corée du Sud, et la production de masse bat son plein depuis lors.

Après avoir dévoilé pour la première fois la série M de Doosan Robotics à RobotWorld 2017 en Corée, l'entreprise a commencé à se frayer un chemin sur le marché mondial en participant à des événements majeurs dans le domaine de la robotique, tels qu'Automatica 2018 en Allemagne et Automate 2019 aux États-Unis. Avec le lancement de six modèles de cobots supplémentaires en 2020, Doosan Robotics est devenue une entreprise unique qui détient la plus grande gamme de cobots sur le marché. Forte de sa diversité, l'entreprise se concentre sur le développement de solutions pour dominer non seulement le secteur de la fabrication, mais aussi celui de la robotique de service.

Grâce à une technologie exceptionnelle et à des offres de solutions largement applicables, Doosan Robotics a atteint un record de ventes cumulées de 2000 unités en 2021. Grâce à ce résultat, l'entreprise est devenue le plus grand fabricant sur le marché national et s'est classée parmi les cinq premiers à l'échelle mondiale. Une reconnaissance positive dans des régions telles que l'Europe, les États-Unis et l'Asie a donné un élan à l'expansion de l'entreprise sur le marché mondial.

Doosan Robotics a remporté l'un des trois plus grands prix de design au monde, le Red Dot Design Award, pendant deux années consécutives.

En 2017, l'entreprise a été récompensée dans la catégorie "Expérience utilisateur (UX)" et en 2018, dans la catégorie "Product Design", recevant ainsi une reconnaissance non seulement pour son confort d'utilisation, mais aussi pour son design. En outre, lors de la remise des prix de l'innovation CES 2022 organisée par la Consumer Technology Association (CTA), Doosan Robotics a été récompensé pour son système de robot-caméra "New Inspiration New Angle (NINA)" dans la catégorie robotique [63].

3.2.2 Caractéristiques techniques du robot Doosan M1013 :

Doosan Robotics a investi dans des fonctions avancées pour rendre les robots plus performants et faciliter l'interaction homme-robot. Leurs bras robotiques sont équipés de capteurs spéciaux qui leur permettent d'ajuster leurs mouvements en temps réel selon la situation, assurant ainsi une collaboration plus sûre avec les travailleurs humains. De plus, les bras robotiques Doosan sont simples à programmer, ce qui les rend faciles à intégrer dans les chaînes de production et à utiliser par des employés qui ne sont pas des experts dans ce domaine. Dans le cadre de ce projet, le modèle de bras robotique Doosan M1013 sera utilisé pour sa performance et sa compatibilité.

- Caractéristiques techniques :

Le robot industriel Doosan M1013 (figure 19) est reconnu pour sa haute performance et est largement utilisé dans diverses applications industrielles.

Voici un aperçu de ses caractéristiques techniques avancées :

- **Charge utile** : Le Doosan M1013 peut supporter une charge utile maximale de 10 kg.
- **Portée maximale** : Le Doosan M1013 peut atteindre une portée maximale de 1420 mm.
- **Précision de positionnement** : Le robot Doosan M1013 a une précision de positionnement de $\pm 0,02$ mm.
- **Répétabilité** : La répétabilité du robot Doosan M1013 est de $\pm 0,01$ mm.
- **Vitesse de mouvement** : Le robot Doosan M1013 peut se déplacer à une vitesse maximale de 6 000 mm/s.
- **Axes de mouvement** : Le robot Doosan M1013 est équipé de six axes de mouvement, qui permettent une grande flexibilité et une précision de mouvement.
- **Poids** : Le robot Doosan M1013 présente un poids compris entre 60,6 lbs et 78,3 lbs (27,5 kg à 35,5 kg), ce qui le rend à la fois robuste et maniable pour s'adapter à différentes configurations industrielles.



Figure 19 : Robot Doosan Serie M1013 [63]

- **Architecture mécanique du robot Doosan :**

L'architecture mécanique du robot Doosan M1013 est soigneusement conçue pour assurer une performance optimale. Doté de six axes de mouvement, ce robot industriel offre une grande flexibilité et une précision de mouvement exceptionnelle. Chaque axe est fabriqué

avec soin et possède des moteurs puissants qui permettent au robot de se déplacer en douceur dans toutes les directions.

La structure mécanique du Doosan M1013 est également robuste, ce qui lui confère une excellente stabilité et une capacité de charge maximale. Grâce à ces caractéristiques, le M1013 peut être utilisé dans différentes industries et fournir des performances constantes et fiables, même dans des environnements exigeants.

La figure 20 montre clairement l'architecture mécanique du bras robotique Doosan M1013

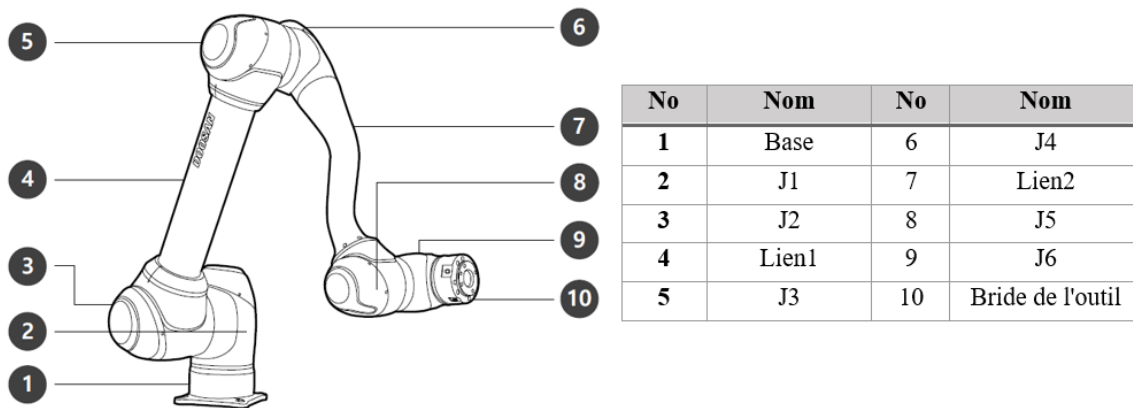


Figure 20 : Architecture mécanique du robot Doosan M1013 [63]

3.2.3 Interface de programmation et système de contrôle du robot Doosan :

Le robot Doosan M1013 est équipé d'un "Teach pendant", une interface qui permet aux utilisateurs de programmer facilement le robot. Cette interface permet aux programmeurs de définir des trajectoires, de modifier des programmes et de contrôler le robot pendant son fonctionnement. De plus, elle offre la possibilité aux programmeurs d'effectuer des tests et des simulations de programmes avant de les exécuter sur le robot. Cette fonctionnalité facilite grandement la programmation et l'utilisation du robot Doosan [64].

Le contrôle du manipulateur du robot Doosan M1013 est assuré par le Doosan Robot Control (DRC), un système sophistiqué de commande et d'asservissement. Le DRC garantit une

communication efficace entre le robot et les systèmes d'automatisation industriels. Équipé d'un microprocesseur haute performance, le DRC permet un contrôle précis et efficace des mouvements du robot. Il offre plusieurs modes de contrôle, tels que la programmation hors ligne, la commande manuelle et la commande à distance. De plus, le DRC intègre des fonctions de sécurité avancées, telles que la détection d'obstacles et la surveillance de l'état du robot, assurant ainsi un fonctionnement sûr et fiable du robot. La figure 21 présente le Teach pendant ainsi que l'interface de programmation du robot.

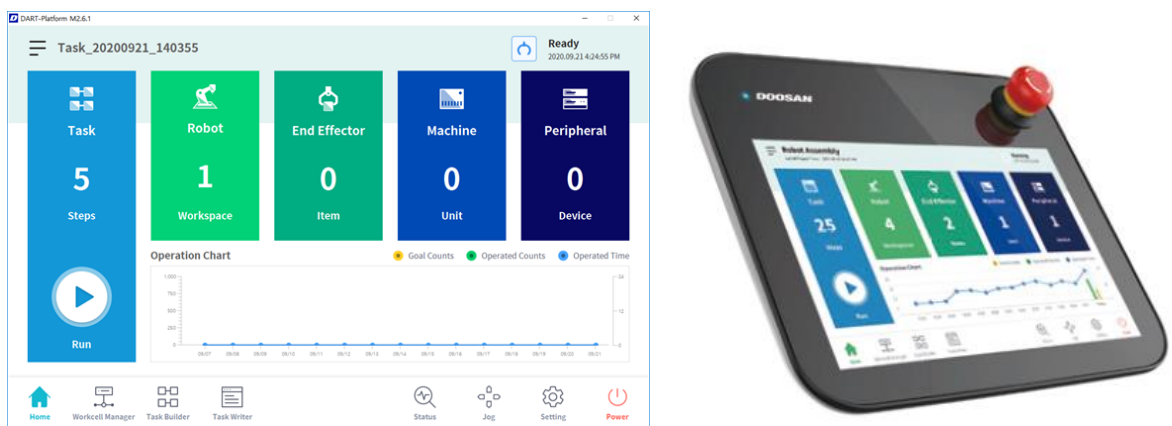


Figure 21 : Teach pendant et Interface de programmation [64]

3.2.4 Sécurité :

La sécurité du robot Doosan est une priorité essentielle et est garantie par plusieurs éléments clés. Tout d'abord, des capteurs de force sont intégrés dans chaque axe du robot, ce qui permet de détecter et de réagir aux changements de force pendant son fonctionnement. Cette fonctionnalité assure la sécurité des opérateurs en minimisant les risques de blessures ou de collisions potentielles.

De plus, la forme du bras du robot Doosan est conçue de manière à prévenir tout pincement lors de ses déplacements. Cela réduit considérablement les dangers pour les opérateurs et les autres éléments présents dans l'environnement de travail.

En outre, le robot propose des fonctions de sécurité totalement personnalisables, permettant d'ajuster les paramètres de force, de vitesse, d'accélération et de limites angulaires des axes du robot. Cette adaptabilité répond aux besoins spécifiques de chaque application et assure une adaptation aux exigences de sécurité particulières.

Enfin, Doosan propose également un "Recovery mode", présenté dans la figure 22, qui permet de reprendre facilement son fonctionnement après un arrêt d'urgence ou une interruption, contribuant ainsi à minimiser les temps d'arrêt.

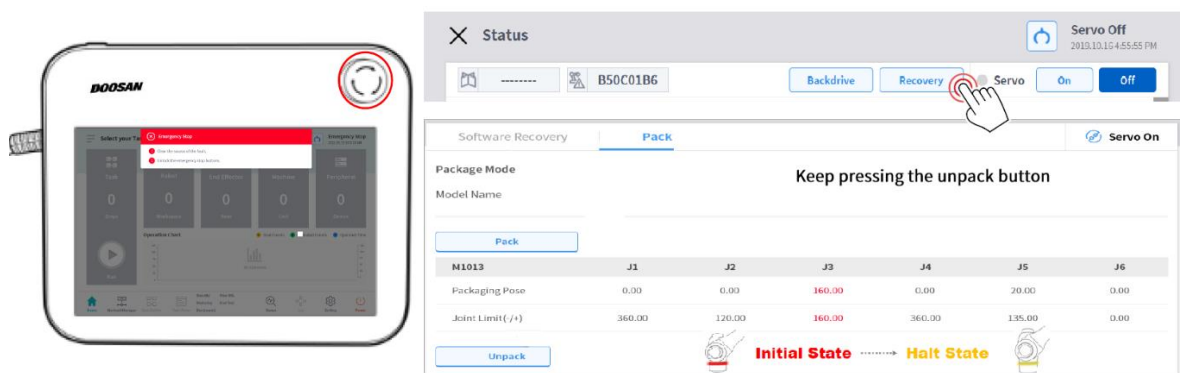


Figure 22 : "Emergency Stop" et "Recovery mode" du robot Doosan

3.2.5 Caractéristiques des capteurs et des actionneurs du robot :

Le robot Doosan M1013 est équipé d'une gamme de capteurs et d'actionneurs avancés qui lui permettent d'interagir avec son environnement de manière précise et efficace.

a. Capteurs et actionneurs :

Les capteurs du robot comprennent des capteurs de position, des capteurs de force, des capteurs de couple et des capteurs de vision. Les capteurs de position fournissent des informations en temps réel sur la position et l'orientation du robot, ce qui permet un contrôle précis de ses mouvements. Les capteurs de force mesurent les forces exercées par le robot lorsqu'il interagit avec des objets, ce qui lui permet d'ajuster sa force en conséquence. Les

capteurs de couple surveillent le couple appliqué aux articulations du robot, garantissant ainsi une gestion efficace de la charge et de la résistance.

Les actionneurs du robot incluent des moteurs électriques de haute performance qui entraînent les articulations et les mouvements du robot. Ces moteurs assurent un mouvement fluide, rapide et précis, offrant une grande agilité au robot dans ses opérations. Les actionneurs permettent également un contrôle précis de la force et de la vitesse du robot, adaptées aux exigences spécifiques de chaque tâche.

Grâce à ces capteurs et actionneurs sophistiqués, le robot Doosan M1013 est capable d'interagir avec son environnement de manière intelligente et précise, offrant ainsi des performances optimales dans diverses applications industrielles

b. Accessoires du robot :

Le robot Doosan M1013 est compatible avec une gamme d'accessoires qui étendent ses fonctionnalités. Parmi ces accessoires couramment utilisés figurent les pinces, les outils de soudage ou de découpe et les changeurs d'outils.

OnRobot, une entreprise danoise spécialisée dans les outils de préhension de fin de bras (EOAT) pour les robots collaboratifs, propose une large gamme d'accessoires compatibles avec le robot Doosan M1013. Leurs produits peuvent être facilement montés sur différentes marques de cobots, y compris le Doosan M1013.

L'objectif d'OnRobot est de simplifier la mise en œuvre des cobots dans la fabrication en offrant des outils compatibles et faciles à utiliser. Ainsi, en utilisant les accessoires OnRobot, le robot Doosan M1013 peut améliorer sa polyvalence et ses capacités dans une variété d'applications industrielles. Parmi les accessoires proposés par OnRobot, on peut citer :

- Le préhenseur parallèle 2FG7 :

La 2FG7 est une pince électrique de préhension développée par OnRobot pour être utilisée avec les robots Doosan. Cette pince peut manipuler des objets pesant jusqu'à 11 kg et est

conçue pour être facilement intégrée en utilisant une interface standard pour la programmation et le contrôle de la pince [65]. Elle est équipée d'un capteur de force et peut être utilisée pour manipuler une large gamme de pièces dans des applications industrielles telles que la fabrication et la logistique. Le préhenseur parallèle 2FG7 est présenté dans la figure 23.



Figure 23 : Le préhenseur parallèle 2FG7 [65]

Dans le cadre de cette étude, le préhenseur parallèle 2FG7 a été utilisé pour maintenir le microphone en position avec le bras robotique pendant les mesures, garantissant ainsi une stabilité optimale.

- **Le OnRobot Eyes :**

Le OnRobot Eyes est un système de vision 2.5D flexible et adaptable très polyvalent qui peut être utilisé dans diverses applications industrielles, telles que la logistique, la fabrication et l'assemblage. Ce capteur de vision peut être utilisé pour inspecter les objets en utilisant la détection des couleurs et des contours, vérifier les dimensions et guider le robot pour la prise et la dépose de pièces, ou encore effectuer des tâches d'assemblage complexes [66].

De plus, l'OnRobot Eyes est conçu pour être facile à utiliser et à intégrer avec les robots Doosan, ce qui permet aux utilisateurs de mettre en place rapidement des applications de vision sophistiquées sans nécessiter de compétences spécialisées en vision ou en programmation. Les utilisateurs peuvent programmer le OnRobot Eyes directement depuis l'interface utilisateur du robot Doosan, ce qui permet de simplifier le processus de

programmation et de réduire les temps d'arrêt de production. Le système de vision OnRobot est présenté dans la figure 24.



Figure 24 : Le système de vision 2.5D [66]

Le OnRobot Eyes a été utilisé pour la détection en temps réel des objets et la localisation précise de la source sonore. Des informations plus approfondies seront abordées dans les sections à venir.

3.3 AVANTAGES ET LIMITES DE L'UTILISATION DU ROBOT DOOSAN :

L'utilisation des robots industriels, tels que le robot Doosan, offre de nombreux avantages aux entreprises dans divers secteurs. Ces cobots sont spécialement conçus pour automatiser des tâches répétitives et contribuer à une productivité accrue. Toutefois, il est essentiel de prendre en compte les limites associées à leur utilisation. Dans cette section, nous explorerons en détail les avantages significatifs offerts par l'utilisation du robot Doosan, ainsi que les considérations et les limites à prendre en compte lors de sa mise en œuvre.

Tout d'abord, le robot Doosan offre des avantages significatifs grâce à sa précision exceptionnelle et à sa répétabilité, garantissant une exécution fiable des tâches répétitives et

contribuant ainsi à la qualité et à la cohérence des résultats. Sa polyvalence lui permet de s'adapter à diverses applications, offrant une précieuse flexibilité opérationnelle et améliorant l'efficacité et la vitesse de production, réduisant les temps d'arrêt et augmentant la capacité de traitement. De plus, les caractéristiques de sécurité intégrées du robot Doosan, telles que la détection d'obstacles et les fonctions de sécurité avancées, assurent une collaboration sécurisée entre les opérateurs humains et le robot.

Cependant, il est important de prendre en compte certaines limites associées à l'utilisation du robot Doosan. Le coût initial peut constituer un obstacle financier pour certaines entreprises, nécessitant une analyse approfondie du retour sur investissement. De plus, une utilisation efficace du robot Doosan nécessite une formation spécialisée pour la programmation et la maintenance, entraînant des coûts et des délais supplémentaires. Étant donné que c'est un robot collaboratif et non autonome, sa capacité d'adaptation peut également être limitée dans des tâches complexes qui requièrent une flexibilité et une adaptabilité extrêmes.

Dans la suite, la solution de programmation hors ligne du robot Doosan, ainsi que l'algorithme qui lui est associé, seront détaillés.

3.4 PROGRAMMATION HORS LIGNE A L'AIDE DU LOGICIEL ROBOTDK AVEC PYTHON :

Face aux difficultés rencontrées lors de l'utilisation de l'interface de programmation du robot Doosan seule, tels que les fonctionnalités limitées, une complexité dans le développement de programmes sophistiqués, ainsi que ces modules payants, nous avons pris la décision stratégique d'intégrer le logiciel RoboDK [66] et le langage de programmation Python dans notre projet. Cette approche présente plusieurs avantages importants. Tout d'abord, RoboDK nous offre un environnement de simulation avancé qui facilite le développement, la vérification et la validation des programmes robotiques avant leur utilisation sur le robot Doosan réel. En combinant cela avec Python, un langage open source de programmation polyvalent et puissant, une large gamme de bibliothèques et d'outils est mise à disposition, simplifiant ainsi le processus de développement de logiciels pour le robot Doosan. De plus,

L'utilisation de Python offre une grande flexibilité et une facilité d'intégration avec d'autres technologies et systèmes, permettant ainsi l'exploration de plusieurs possibilités pour répondre aux besoins spécifiques du projet, notamment en ce qui concerne la détection de la source sonore à travers la caméra et le scan automatique du robot.

RobotDK est spécialement conçu pour la robotique industrielle, offrant aux ingénieurs, programmeurs et concepteurs un environnement virtuel dédié à la création, la simulation et la programmation des mouvements de robots industriels avant leur mise en application en production réels. En d'autres termes, il fournit un moyen de tester et de valider le comportement des robots sans avoir besoin de les connecter physiquement au robot réel [67].

Grâce à l'utilisation de RobotDK, la programmation du robot Doosan a pu être effectuée directement depuis un ordinateur, comme le montre la figure 25, ce qui a permis d'éviter les temps d'arrêt de production liés aux opérations sur le terrain tout en réduisant les risques associés à la programmation en direct sur le terrain.

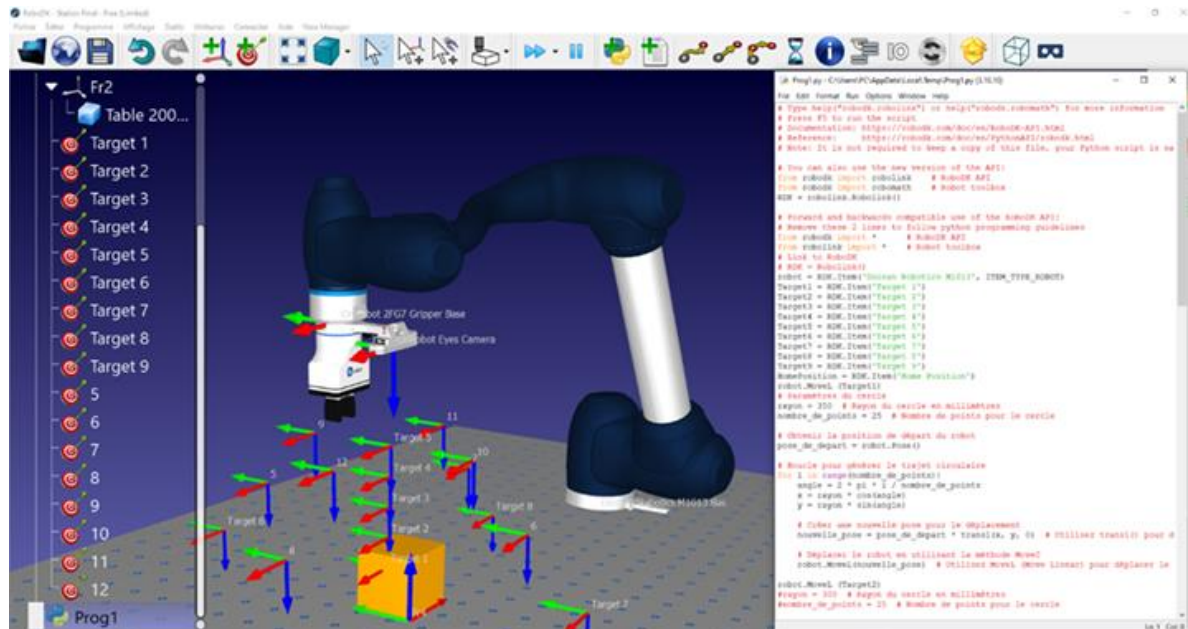


Figure 25 : Programmation en Python du robot avec la caméra sur RobotDK

3.5 CONCLUSION :

L'adoption de la robotique industrielle est devenue une tendance importante dans l'industrie. Elle permet aux entreprises d'augmenter leur productivité, d'améliorer leur compétitivité et de créer des environnements de travail plus sûrs pour les employés.

Dans ce chapitre, le robot Doosan a été introduit avec sa programmation hors ligne à l'aide du logiciel RoboDK utilisé dans le projet. La diversité de ces techniques offre la possibilité de combiner différentes approches pour répondre aux besoins spécifiques du projet.

Le chapitre suivant portera sur l'étude et la mesure de la pression acoustique près de la source sonore. Ensuite, nous aborderons la cartographie du rayonnement acoustique, en mettant l'accent sur les sources de bruit problématiques.

CHAPITRE 4 : MESURE ACOUSTIQUE AUTOMATISÉE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre a pour but d'introduire une étude de cas des mesures acoustiques automatisées prises à proximité de la source sonore. Ensuite, une carte de rayonnement sonore sera créée pour visualiser la zone d'émission sonore de cette source.

4.1 METHODE DEVELOPPEE :

La méthode développée dans ce projet consiste à combiner la robotique et l'intelligence artificielle pour l'automatisation des mesures. À l'aide du robot Doosan, du microphone et de la caméra, l'accent est mis sur la mesure de pression acoustique proposant ainsi un système autonome capable de réaliser un scan automatique.

La mesure automatisée à l'aide de robot Doosan implique une combinaison d'approches matérielles et logicielles. Le matériel comprend une caméra de balayage et un microphone, qui sont utilisés pour capturer les signaux acoustiques de l'environnement. Ces signaux sont ensuite traités et analysés à l'aide d'algorithmes qui extraient des informations significatives sur la pression acoustique de la source sonore. Ces informations trouvent des applications dans la surveillance du bruit, le contrôle de la qualité, l'évaluation de la sécurité et la surveillance de l'environnement, contribuant ainsi à la certification des produits pour leur conformité aux normes acoustiques.

Les robots collaboratifs de Doosan Robotics, également appelés cobots, se distinguent par leur conception intégrant des composants avancés, une variété de degrés de liberté et un processeur puissant. Leur architecture permet une précision exceptionnelle, une polyvalence et une facilité d'utilisation remarquable, ce qui en fait des solutions idéales pour ce projet ainsi que pour d'autres applications industrielles.

Ces robots sont complétés par les solutions avancées d'OnRobot ainsi que par la caméra et les capteurs intelligents du système EYE. Cette intégration étend leurs capacités, les rendant ainsi bien adaptés à une variété d'éventail d'applications dans les domaines de la fabrication, de la logistique et des soins de santé. La figure 26 illustre de plus près le processeur intégré dans le robot Doosan utilisé.

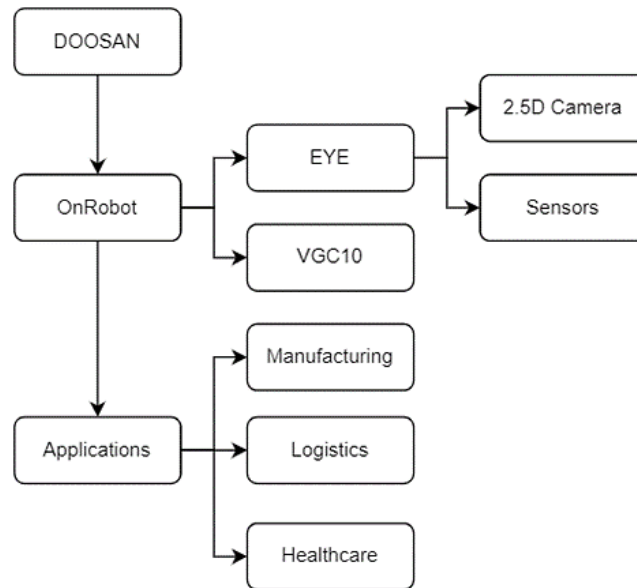


Figure 26 : Processeur intégré au robot Doosan

4.1.1 Norme de mesure :

Selon la norme ISO 3740 [68], certaines exigences doivent être respectées pour les composants et conditions suivants : le niveau de bruit de fond ne doit pas dépasser certains niveaux ; la température de l'air dans la salle d'essai doit être comprise entre 15°C et 30°C ; et le champ sonore dans l'environnement d'essai doit être exempt de réflexions sonores indésirables provenant d'objets proches ou de limites de la pièce.

De même, l'objet testé doit être inclus dans l'une des quatre surfaces de mesure : un hémisphère, demi-hémisphère ou quart d'hémisphère ; un parallélépipède droit ; un cylindre, demi-cylindre ou quart de cylindre ; ou une combinaison de deux segments, hémisphériques, rectangulaires ou cylindriques [68].

Et pour obtenir la configuration de mesure sphérique ou hémisphérique, l'une des configurations suivantes peut être utilisée : un seul microphone ou des ensembles de microphones déplacés le long d'au moins 10 trajectoires circulaires (tour complet de 360°) ou la source placée sur un disque rotatif ; un seul microphone déplacé le long d'au moins huit arcs méridiens ; ou un seul microphone déplacé le long d'au moins cinq trajectoires circulaires, créant une spirale. La figure 27 montre un exemple d'une trajectoire en spirale dont un microphone avec un bras robotisé pourrait se déplacer.

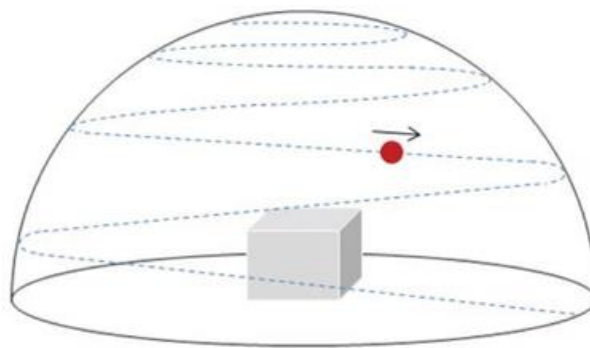


Figure 27 : Illustration d'une trajectoire en spirale pour le microphone en mouvement [68]

Les positions de mesure sont celles des microphones pour la méthode de mesure traditionnelle avec plusieurs microphones fixes. Notre méthode utilise un seul microphone qui se déplace autour de ces positions, d'où la création de la trajectoire.

Pour cela, le robot doit être configuré avec le matériel et le logiciel nécessaires pour effectuer les mesures acoustiques souhaitées, et être programmé pour suivre un trajet prédéterminé.

4.2 ÉTUDE DE CAS :

Contrairement aux méthodes traditionnelles de mesure sonore, qui exigent une inspection manuelle laborieuse et sont sujettes à des imprécisions, cette section présente une étude de cas qui met en œuvre une approche innovante de mesure automatisée.

Notre solution exploite la puissance de robot Doosan équipé d'une caméra Eye Tool en association avec le microphone de mesure Brüel & Kjaer, programmé pour effectuer automatiquement des mesures sonores dans un environnement donné.

La caméra Eye Tool offre une vision 2,5D d'une résolution élevée, permettant la capture d'images d'une clarté et d'un niveau de détail exceptionnels. Parallèlement, le microphone de mesure est utilisé pour capturer les signaux acoustiques. Le robot a été entraîné à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique pour analyser et détecter des objets et prendre des décisions éclairées en fonction de l'emplacement et de l'orientation de l'objet.

Pour la réalisation du projet, plusieurs étapes ont été définies. Tout d'abord, l'acquisition et le traitement de l'image sont effectués à l'aide de la caméra. Ensuite, la détection et la localisation de la source sonore sont entreprises. Une fois la source sonore détectée, le bras robotique se déplace vers la position identifiée pour une intervention ciblée. Après, le balayage automatique est déclenché pour couvrir la zone d'étude. Durant ce processus, des mesures autonomes sont prises à différents points pour recueillir des données. La figure 28 illustre les étapes de la réalisation du projet.

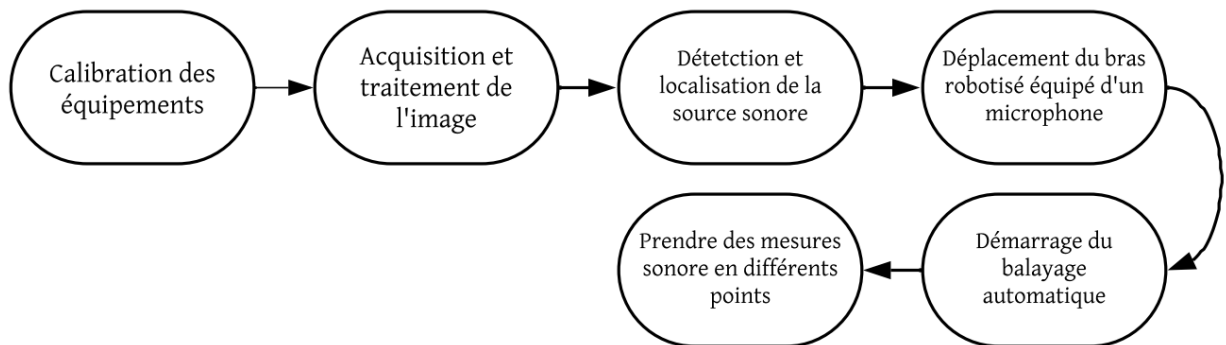


Figure 28 : Diagramme de la solution proposée

La méthode de mesures proposée doit impérativement tenir compte d'une gamme variée de facteurs susceptibles d'influencer les mesures. Voici quelques éléments essentiels à considérer :

- La position du microphone : Il est important de choisir une position optimale pour le microphone afin de capturer les niveaux sonores les plus précis. La distance et l'orientation du microphone par rapport à la source de bruit peuvent avoir un impact significatif sur les mesures. Ces paramètres spécifiques sont présentés dans la section 2.3.1 conformément aux normes ISO.
- L'étalonnage du microphone : Il est important de s'assurer que le microphone est étalonné de manière précise avant de réaliser les mesures. Il garantit que les mesures sont cohérentes.

Ces choix seront effectués conformément aux normes en vigueur pour garantir la fiabilité des résultats.

4.2.1 Liste d'équipements :

Dans cette section, les équipements utilisés dans ce projet seront examinés. Après avoir détaillé le robot Doosan, l'attention se portera sur la présentation du microphone et du système d'acquisition, en détaillant leurs caractéristiques et leurs fonctionnalités.

a. Microphone de mesure :

Dans le cadre de ce projet de mémoire, nous avons choisi d'utiliser un microphone hautement spécialisé, le microphone 4189-A-021 à champ libre de ½ pouce avec préamplificateur de type 2671 pré-polarisé de la société Brüel & Kjør leader mondial de l'instrumentation pour la mesure en acoustique.

Grâce à ses caractéristiques, présentées dans la figure 29, ce microphone est conçu pour les mesures de haute précision, nécessitant une sensibilité élevée et une réponse en fréquence de 20 Hz à 20 kHz.



Figure 29: Microphone TYPE 4189-A-021 utilisé pour les mesures [69]

b. Module d’acquisition et logiciel de traitement utilisés :

Le module LAN-XI, plateforme matérielle modulable, se distingue par sa flexibilité et sa polyvalence exceptionnelles dans la configuration des voies. Fonctionnant de manière autonome avec une alimentation par batterie, ces modules peuvent être assemblés dans des châssis de 5 ou 11 unités, intégrant même des modules de batterie pour une alimentation autonome. La modularité de ces systèmes permet l’assemblage rapide de plusieurs châssis, créant ainsi des configurations stables capables de gérer plus de 1 000 voies de mesures [70].

Pour ce travail, nous avons utilisé le module générateur du Type 3160, un outil remarquablement polyvalent et complet. Grâce à la combinaison de voies d’entrées et de sorties dédiées aux générateurs, le Type 3160 a constitué une solution autonome essentielle pour l’analyse des signaux en acoustique et vibrations. Disponible en deux versions de base, avec 2 entrées / 2 sorties ou 4 entrées / 2 sorties, ce module offre une flexibilité exceptionnelle, couvrant une gamme de fréquences allant à 51,2 kHz. Il s’est avéré idéal pour des applications variées telles que les essais électroacoustiques, les mesures audios, et les mesures générales en acoustique et vibrations [70].

De manière cruciale, ce module Type 3160 a joué un rôle central dans la réussite de notre projet, offrant une connectivité sans fil. De plus, son interface de programmation

d'application (API) ouverte LAN-XI a permis une programmation légère et indépendante de la plateforme. Cette fonctionnalité a été particulièrement précieuse, car elle a autorisé la programmation du matériel d'acquisition de données avec Python, offrant ainsi une grande adaptabilité et une intégration transparente avec d'autres logiciels tiers. La figure 30 présente clairement le module d'acquisition de données LAN-XI TYPE 3160.

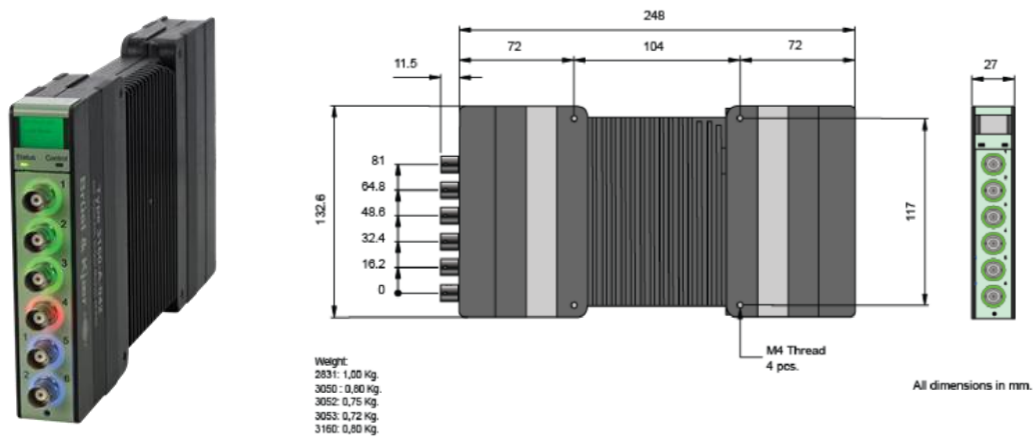


Figure 30 : Module d'acquisition de données LAN-XI TYPE 3160 [70]

Le LAN-XI TYPE 3160 sera accouplé avec le logiciel de traitement de données, BK Connect [71], assurant ainsi une intégration fluide et efficace entre la collecte des données et leur traitement ultérieur.

Le logiciel BK Connect est conçu pour répondre aux besoins complexes des ingénieurs et des chercheurs pour la collecte, de l'analyse et de la visualisation des données acoustiques. Grâce à ses fonctionnalités avancées, il permet de configurer avec précision les paramètres d'acquisition, d'organiser efficacement les données collectées, et de réaliser des analyses approfondies. Les principales applications BK Connect sont illustrées dans la figure 31.

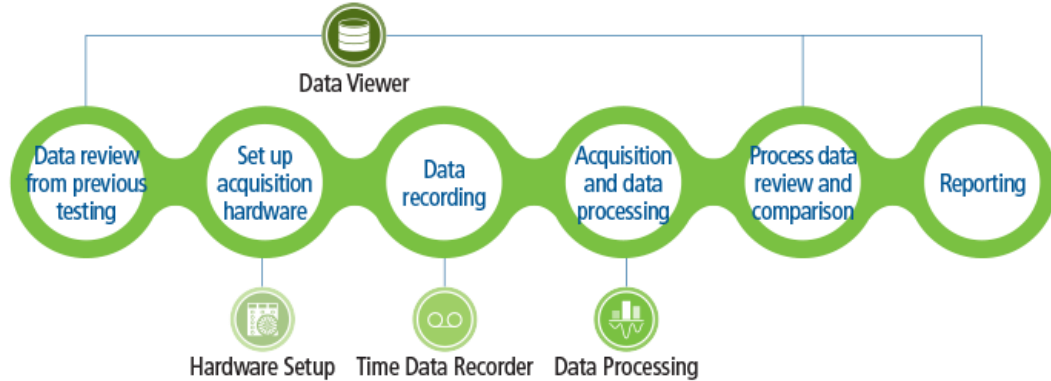


Figure 31: Les principales applications BK Connect [71]

L'ensemble de ces applications fournit un pack complet d'outils dans ce projet. Il sera utilisé pour par la configuration du microphone et sa calibration ainsi que pour la mesure en temps réel et le traitement de données.

Dans la section suivante, les principales démarches, présentées dans la Figure 28, entreprises pour relever ces enjeux seront détaillées.

4.2.2 Calibration des équipements :

a. Calibration du microphone de mesure

Le processus d'étalonnage des microphones revêt une importance capitale. Avant de se lancer dans la planification et le positionnement précis de microphone autour de la source vibrante, l'étape initiale de configuration est cruciale comme la montre la figure 32.

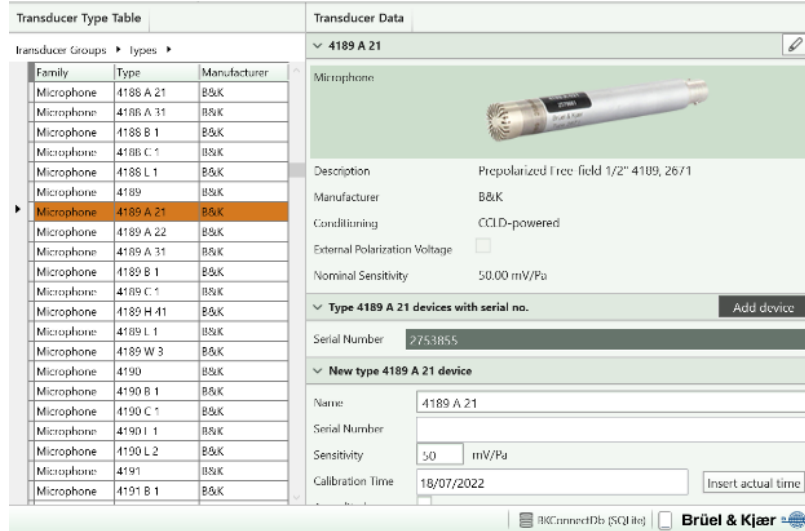


Figure 32 : Configuration du microphone sur BK Connect

Au cours de l'étalonnage, les paramètres critiques tels que la fréquence d'échantillonnage et la sensibilité des microphones sont rigoureusement validés et ajustés si nécessaire pour optimiser les performances de microphone. Cela garantit que les données acoustiques capturées seront à la fois fiables et précises. Le processus de calibration du microphone à l'aide du module LAN-XI et du logiciel BK Connect est présenté dans la figure 33.



Figure 33 : Calibrage du microphone avec LAN-XI et BK Connect

b. Étalonnage de la caméra Eye Tool :

L'étalonnage est une étape essentielle du processus d'installation du système de vision OnRobot Eye. Son objectif est de s'assurer que la caméra est alignée avec précision sur le bras du robot et que l'image capturée par la caméra reflète précisément l'environnement réel.

La figure 34 présente l'étape de configuration de la caméra sur l'interface OnRobot.

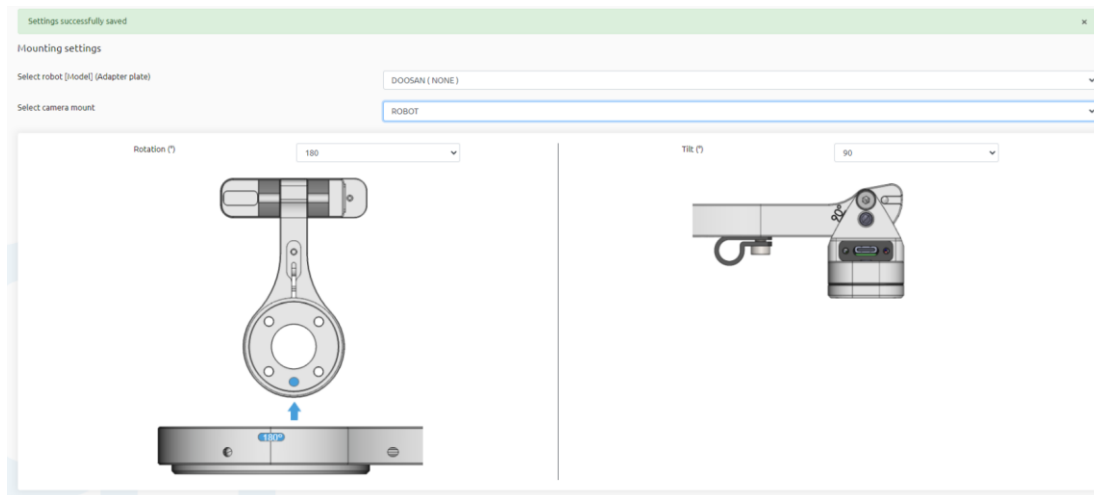


Figure 34 : Configuration de la caméra sur l'interface OnRobot

Le processus d'étalonnage, illustré à la figure 35, consiste à placer un objet d'étalonnage devant la caméra et à capturer des images sous différents angles à l'aide du logiciel OnRobot Eye. Le logiciel utilise ensuite ces images pour déterminer la position et l'orientation de la caméra par rapport au bras du robot. Une fois l'étalonnage terminé, OnRobot Eye peut détecter et localiser des objets dans l'espace de travail du robot avec une précision inégalée, ce qui lui permet d'exécuter des tâches de manipulation complexes avec une précision et une efficacité exceptionnelle.

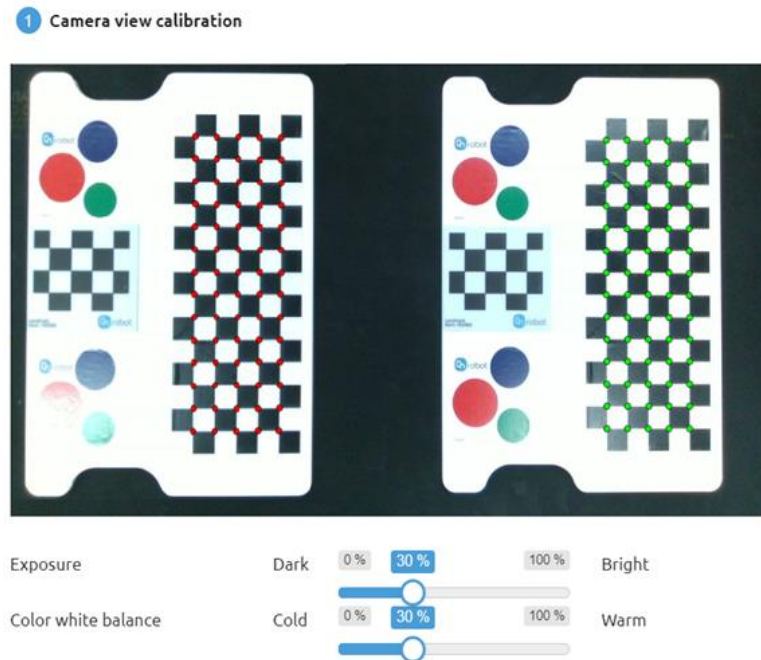


Figure 35 : Étalonnage de la caméra externe Eye Tool

L'étalonnage, en fin de compte, constitue une étape critique pour garantir les performances et la précision de l'OnRobot Eye. Il est essentiel pour obtenir des résultats optimaux dans les applications d'automatisation avancées.

L'interface OnRobot WebClient (Devices) pour la configuration et l'étalonnage de la caméra est présentée dans l'annexe 1.

4.2.3 Localisation de la source sonore :

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser des haut-parleurs comme source sonore pour focaliser sur la génération de bruit et simuler les conditions de fonctionnement des machines vibrantes.

Cette décision repose sur plusieurs considérations essentielles. Tout d'abord, les haut-parleurs offrent un contrôle expérimental supérieur, nous permettant d'ajuster avec précision

des paramètres tels que la fréquence, l'amplitude et la durée de la vibration. Ce contrôle précis nous permet de reproduire différentes conditions de fonctionnement des machines, ce qui est crucial pour nos expériences.

En outre, l'utilisation de haut-parleurs garantit un niveau élevé de reproductibilité des résultats, un aspect essentiel pour obtenir des données fiables et comparables, ce qui justifie pleinement notre choix méthodologique. Les haut-parleurs utilisés comme source sonore sont présentés dans la figure 36.



Figure 36 : L'utilisation de haut-parleurs comme source sonore

– **Stratégie de détection :**

Pour la détection, nous avons choisi d'utiliser la version YOLOv5 de l'algorithme You Only Look Once (YOLO), car elle est actuellement l'une des solutions les plus performantes disponibles sur le marché. Cette version bénéficie d'une bibliothèque mature, ayant été testée et améliorée par ses développeurs, et ayant démontré son efficacité dans de nombreux projets de détection d'objets variés.

L'objectif de l'utilisation de cet algorithme est de fournir deux informations cruciales. Le premier est de détecter la présence d'une source sonore dans l'image. Le second est de localiser précisément cette source en utilisant une boîte englobante définie par ses coordonnées, sa largeur et sa hauteur. Cette boîte englobante, souvent représentée par un rectangle entourant la source sonore, facilite la localisation et l'identification précises.

Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé un modèle YOLOv5 avec un algorithme open source que nous avons entraîné et adapté en ajustant les paramètres spécifiques afin de répondre aux besoins de la détection des haut-parleurs dans l'image.

L'algorithme repose sur des réseaux de neurones convolutifs (CNN) pour prédire à la fois la classe et la localisation d'une source sonore dans une image. Pour entraîner le modèle, nous avons fait utiliser une liste d'images annotées afin de définir les régions contenant les objets à détecter et d'attribuer les étiquettes appropriées. Cette démarche implique l'identification des objets dans les images ainsi que leur marquage en vue du processus d'entraînement du modèle.

Un ensemble de données composé de 100 images d'entrée a été utilisé pour entraîner le modèle. Ces images, représentant une variété des haut-parleurs de différents types et tailles, ont été choisies pour refléter une large gamme de conditions et de configurations. Chaque image a été prétraitée avant d'être utilisée dans l'algorithme de CNN. Ce processus de prétraitement a inclus des étapes telles que la normalisation et le recadrage. Ensuite, ce dernier utilise ces données annotées pour détecter les objets spécifiés dans les images. La figure 37 montre la détection des haut-parleurs comme source sonore.



Figure 37 : Détection de la source sonore

Le fonctionnement de l'algorithme peut être décrit de manière concise suivante : tout d'abord, l'image subit un processus de pré-traitement afin d'être adaptée au modèle, comprenant souvent des opérations telles que le redimensionnement et la normalisation. Ensuite, l'image est divisée en une grille de cellules, chacune étant chargée de prédire la présence et la localisation des sources sonores dans sa zone respective. Pour extraire les caractéristiques pertinentes de l'image, YOLO utilise un réseau de neurones convolutifs (CNN), permettant ainsi d'analyser les informations visuelles de manière efficace et précise.

Une partie de l'algorithme utilisé dans cette étude, destinée à entraîner le modèle et détecter l'objet, est présentée dans l'annexe 3.

4.2.4 Positionnement du bras robotisé :

Après la phase de détection, le système passe à l'étape de la prise de décision. Cette étape cruciale implique des ajustements en temps réel et des stratégies de positionnement basées sur les informations visuelles acquises. Le système robotique évalue de manière autonome les caractéristiques de l'objet et détermine le positionnement optimal pour des mesures précises, en prenant en compte la distance entre la source et le microphone. Il ajuste ensuite

dynamiquement sa position en fonction des besoins, en veillant à respecter les conditions de mesure de la méthode de l'hémisphère.

Sur la base de ces informations, le robot peut être programmé pour lancer le balayage automatique. Cette intégration de l'IA améliore l'efficacité et la précision globales de la stratégie de détection et de positionnement des sources, comme le montre la figure 38. Ce processus adaptatif garantit que le robot est positionné avec précision pour des mesures optimales et réduit le risque d'erreur ce qui permet d'obtenir des résultats cartographiques optimaux adaptés à des bandes de fréquences spécifiques.

Une partie de l'algorithme développé dans cette étude est destinée à la reconnaissance d'objets en temps réel et la prise de décision, est présentée dans l'annexe 4.

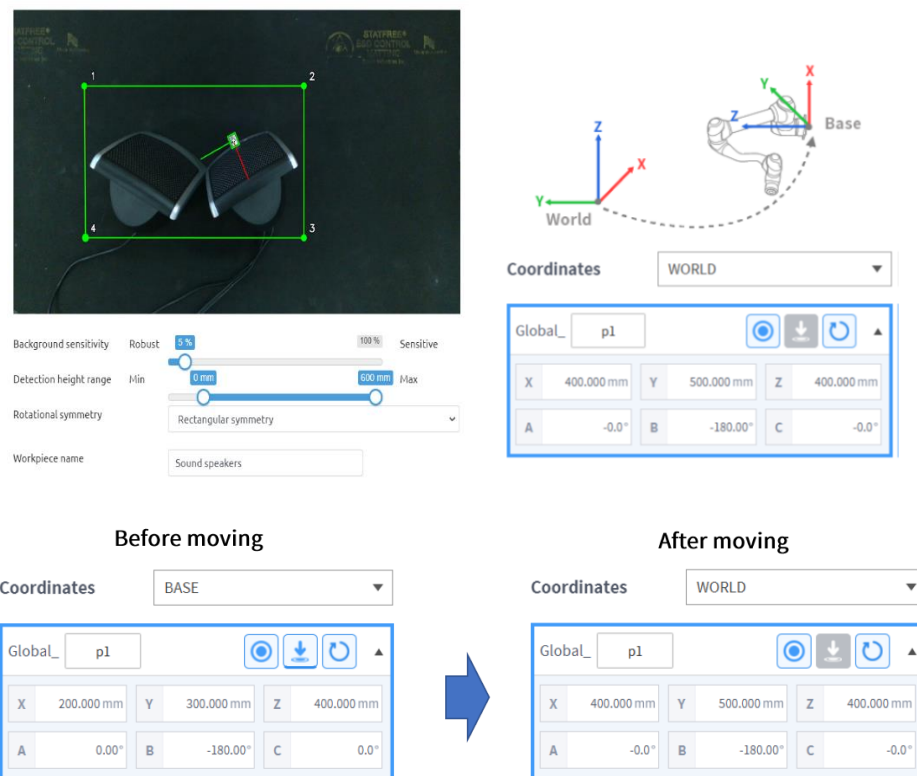


Figure 38 : Localisation de la source sonore et positionnement du robot

4.2.5 Balayage automatique :

a. Communication entre les dispositifs :

La communication efficace entre les dispositifs est un aspect essentiel de ce projet, car elle permet de coordonner et de synchroniser les différentes étapes de l'acquisition, du traitement et de l'analyse des données. Le protocole de contrôle de transmissions (TCP) joue un rôle essentiel en garantissant la fiabilité des connexions de bout en bout, ce qui simplifie considérablement l'établissement de ces connexions.

Par conséquent, si l'un des appareils subit une interruption inattendue de son fonctionnement, la connexion est interrompue. Pour rétablir la connexion, un autre échange de messages de signalisation est nécessaire.

La figure 39 fournit une vue d'ensemble du système complet, illustrant le schéma fonctionnel fondamental des différents dispositifs utilisés connectés les uns aux autres, offrant ainsi une compréhension plus approfondie de l'architecture globale du système.

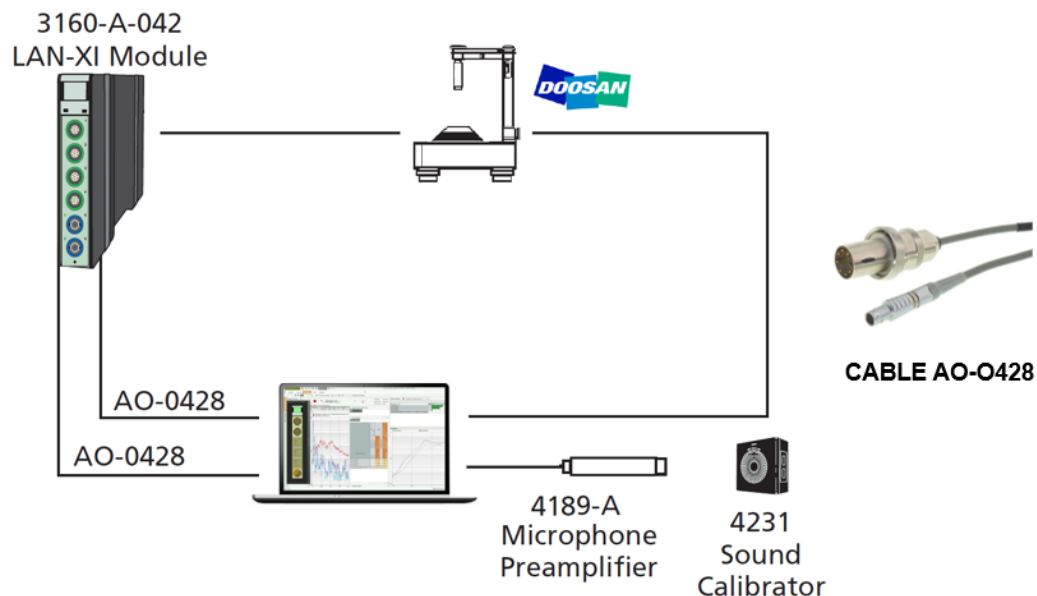


Figure 39 : Schéma de principe des positions des dispositifs dans le système

La communication transparente entre l'ordinateur et le robot est rendue possible par la compatibilité des deux systèmes avec les protocoles TCP/IP. Ce protocole de communication normalisé garantit un échange de données efficace. La connexion elle-même est établie par une liaison directe par câble Ethernet, formant une connexion point à point. Pour assurer le bon fonctionnement de cette connexion directe, il était impératif de configurer les adresses IP de manière à les aligner sur le même domaine de réseau.

La séquence complète des étapes nécessaires à la réussite de l'échange de données entre l'ordinateur et le robot est illustrée à la figure 40. L'interface de configuration de l'adresse IP du protocole TCP/IP et transfert du contrôle de robot Doosan, est présentée dans l'annexe 2.

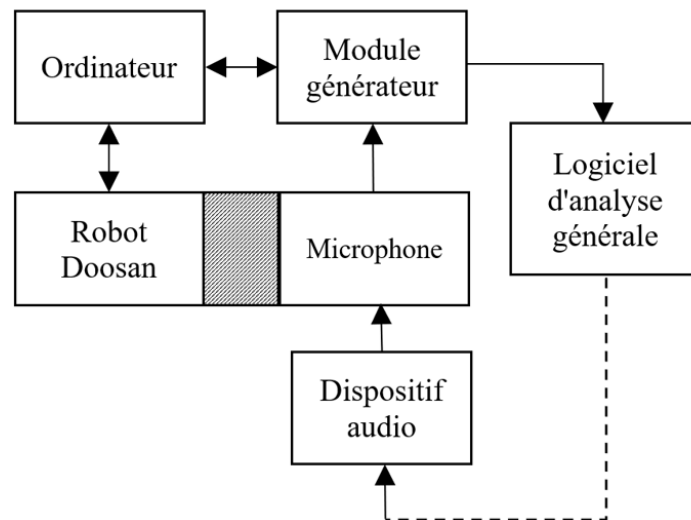


Figure 40 : Communication transparente entre les dispositifs via TCP/IP

b. Scan et mesure automatique :

Une fois que l'algorithme d'apprentissage automatique a classé les objets et détermine la distance entre la source et le microphone de mesure, l'étape suivante consiste à programmer le robot pour mesurer la pression sonore en différents points de l'espace.

Cela peut être réalisé en utilisant le langage de programmation Python, pour contrôler le mouvement du robot et positionner le microphone. La programmation des actions du robot et la collecte des données sont facilitées par la flexibilité de ce langage et ses vastes bibliothèques.

Grâce à la possibilité de programmer les mouvements du robot et la saisie des données, il est possible de demander au robot de se déplacer méthodiquement et de scanner à différents endroits de l'espace pour effectuer des mesures en divers points. Ces mesures peuvent être utilisées ensuite pour générer une carte acoustique à l'aide de la méthode Hémisphère.

– **Programmation hors ligne :**

Au lieu de se limiter à l'interface de contrôle du fabricant du robot, avec ses fonctionnalités limitées et ses modules payants, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel RoboDK.

La programmation hors ligne à l'aide du logiciel RobotDK permet de préparer et de simuler la trajectoire du robot avant sa mise en œuvre, ce qui présente de nombreux avantages en termes de sécurité, d'efficacité et de précision. Cette approche de programmation hors ligne assure une coordination fluide et sécurisée entre l'ordinateur de contrôle et le robot, facilitant ainsi la réalisation de tâches complexes.

Des algorithmes en Python ont été développés pour la planification des trajectoires du robot Doosan, garantissant ainsi des mouvements précis lors des mesures. Cette synergie entre les capacités de collecte et d'analyse de données, alimentée par Python, et l'expertise de RobotDk en matière de programmation, promet de fournir une solution complète et hautement efficace pour le résultat souhaité.

La Figure 41 met en évidence le processus de programmation hors ligne de la trajectoire en hémisphère, montrant le mouvement coordonné du robot Doosan pendant l'étape de mesure du son à l'aide du logiciel RobotDK.

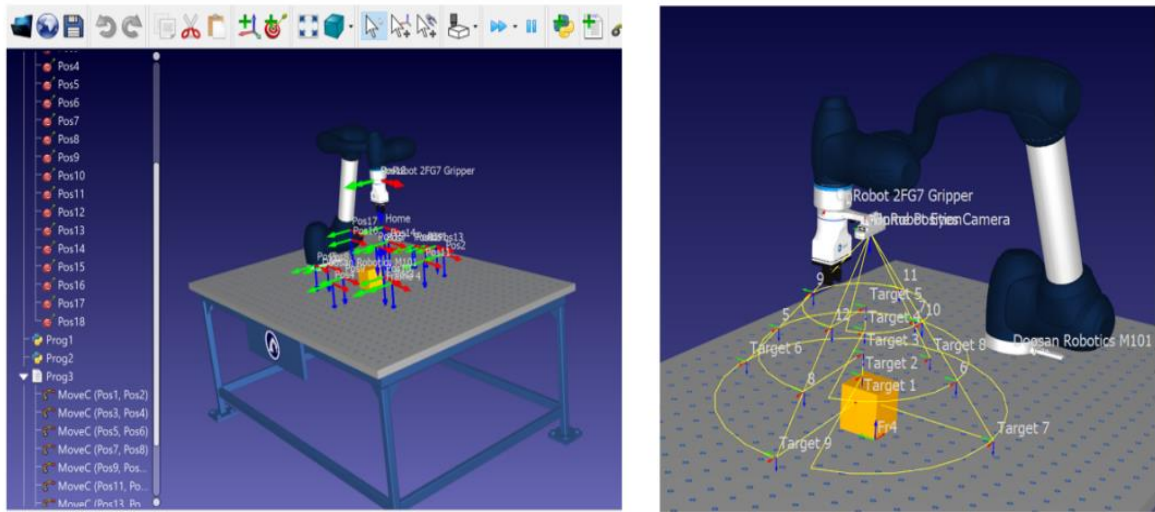


Figure 41 : Programmation hors ligne de la trajectoire en hémisphère du robot Doosan

– **Balayage et scan automatique :**

Une fois la trajectoire définie et optimisée, elle est transférée au robot pour une exécution précise sur le terrain.

Le robot est très polyvalent, car il peut être programmé avec précision pour naviguer et effectuer des mesures sonores à divers endroits de la zone désignée. L'algorithme ne se concentre pas uniquement sur la collecte des données, mais joue également un rôle crucial dans l'optimisation de la trajectoire de mesure du robot, garantissant ainsi une couverture efficace et complète de la zone étudiée.

Ces mesures sont ensuite utilisées comme données d'entrée pour la mise en œuvre de la méthode Hémisphère à l'aide de logiciel de traitement de données BK Connect.

La figure 42 illustre notre étude de cas réel pour la mesure automatique à l'aide du cobot.

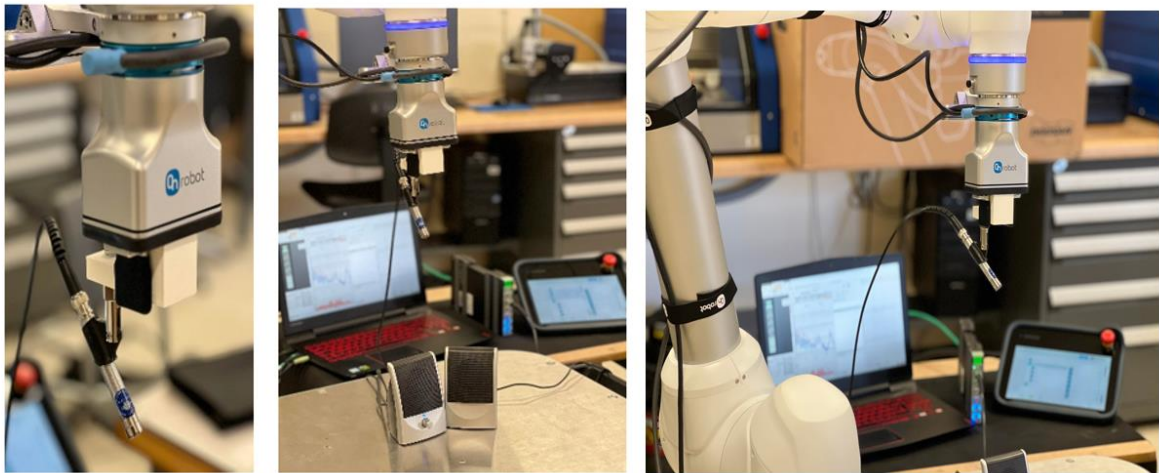


Figure 42 : Robot Doosan équipé d'un microphone qui suit une trajectoire bien définie

4.2.6 Génération de cartes acoustiques :

Pour générer la carte acoustique à l'aide de notre méthode, nous devons d'abord calculer le niveau de pression acoustique (SPL) à chaque point de mesure, qui peut être calculé à l'aide de la pression sonore mesurée et de la distance entre le microphone de mesure et la source de bruit. Une fois le niveau de pression acoustique calculé en chaque point, les données peuvent être reportées sur un système de coordonnées pour créer la carte acoustique. Cette approche peut fournir une vue d'ensemble de l'environnement acoustique d'un espace donné et aider à identifier les zones où les niveaux sonores sont trop élevés ou trop bas. Ces mesures sont effectuées à l'aide de la station d'acquisition Bk Connect.

4.3 CONCLUSION

Ce chapitre a jeté les bases nécessaires pour la mise en œuvre de mesures automatisées dans notre contexte. La méthodologie choisie ainsi que et les étapes de réalisation ont été détaillés.

Le chapitre suivant présentera l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus. Nous examinerons de près les données recueillies au cours des mesures effectuées. Des conclusions éclairées seront formulées.

CHAPITRE 5 : ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES MESURES

Ce chapitre détaille les résultats obtenus par la nouvelle méthode de mesure proposée dans le cadre du projet de recherche. Les paramètres de l'IA ainsi que les performances du modèle de détection sont présentés et discutés.

5.1 MESURES D'EVALUATION DES PERFORMANCES DU MODELE DE DETECTION D'OBJETS

Parmi les différents ensembles de données utilisés dans le cadre de détection d'objets, le paramètre le plus couramment utilisé pour mesurer la précision des détections est la précision moyenne (AP) [72]. Avant d'examiner les variantes de l'AP, il convient de passer en revue certains concepts qui leur sont communs tels que :

- Vrai positif (TP) : Détection correcte d'un objet comme présent
- Faux positif (FP) : Détection incorrecte d'un objet inexistant ou détection mal placée d'un objet existant.
- Faux négatif (FN) : Manque de détecter un objet réellement présent.

Les définitions ci-dessus nécessitent d'établir ce que sont une "détection correcte" et une "détection incorrecte". Une façon courante de le faire est d'utiliser l'intersection sur l'union (IOU) [73]. Il s'agit d'une mesure basée sur l'indice de Jaccard, un coefficient de similarité pour deux ensembles de données. L'IOU mesure la zone de chevauchement entre la boîte de délimitation prédite B_1 et la boîte de délimitation de vérité au sol B_2 , divisée par la zone d'union entre elles, c'est-à-dire :

$$J(B_1, B_2) = IOU = \frac{area(B_1 \cap B_2)}{area(B_1 \cup B_2)} \quad [9]$$

Comme le montre la figure 43 :

$$\text{IOU} = \frac{\text{area of overlap}}{\text{area of union}} = \frac{\text{Image 1}}{\text{Image 2}}$$

Figure 43 : Intersection Over Union (IOU) [73]

La plupart du temps, un seul objet dans une image peut avoir plusieurs boîtes à grille candidates à la prédiction, même si elles ne sont pas toutes pertinentes. L'objectif de l'IOU (une valeur comprise entre 0 et 1) est d'écartier ces boîtes à grille pour ne conserver que celles qui sont pertinentes. La logique sera comme suit : on définit un seuil de sélection des IOU, qui peut être de 0,5 (préférable). Ensuite, YOLO calcule l'IOU de chaque cellule de la grille, qui correspond à la zone d'intersection divisée par la zone d'union. Enfin, il ignore la prédiction des cellules de la grille ayant un $\text{IOU} \leq \text{seuil}$ et prend en compte celles ayant un $\text{IOU} > \text{seuil}$. Une illustration de l'application du processus de sélection de la grille à l'objet est détaillée dans la figure 44.

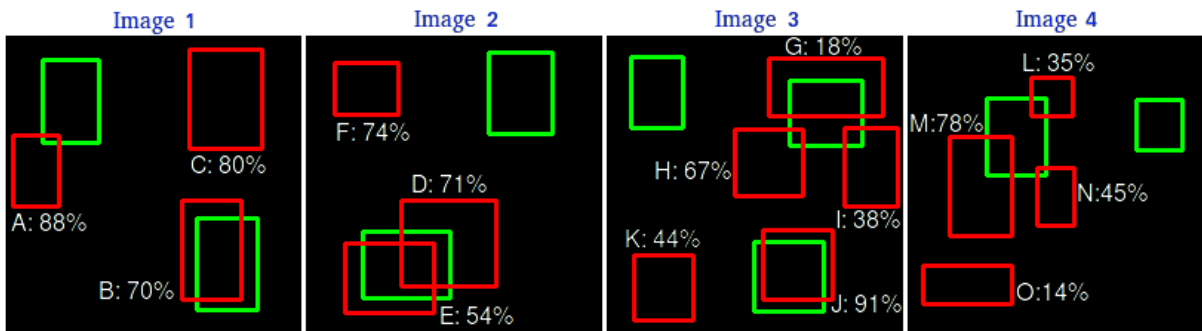


Figure 44 : Exemple de détections (cases rouges) effectuées visant à détecter les objets de référence (cases vertes) appartenant à la même classe [73].

Au lieu de cela, l'évaluation des méthodes de détection d'objets est principalement basée sur les concepts de précision P, de rappel R et du score F1 [74], respectivement définis comme suit :

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad ; \quad R = \frac{TP}{TP + FN} \quad ; \quad F1 = 2 \frac{P \times R}{P + R} \quad [10]$$

La précision est la capacité d'un modèle à n'identifier que les objets pertinents. Il s'agit du pourcentage de prédictions positives correctes. Le rappel est la capacité d'un modèle à trouver tous les cas pertinents. Il s'agit du pourcentage de prédictions positives correctes parmi toutes les vérités de terrain données. Le score F1 est une mesure de la précision d'un test calculé à partir de la précision du rappel.

Pour le développement de notre modèle d'apprentissage, nous avons utilisé une base de données composée d'images représentant différents types de microphones. L'ensemble de données a été divisé selon un ratio 80:20, 80 % étant utilisés pour l'entraînement et les 20 % restants étant réservés à la validation.

Le modèle est entraîné avec Google Colab [75] sur un GPU GTX 1080 et 64 Go de RAM. Le temps de formation est considérablement réduit grâce à la haute performance du GPU.

Le choix d'entraîner le modèle avec Google Colab a été motivé par plusieurs facteurs. Tout d'abord, Google Colab offre un accès gratuit à des ressources de calcul GPU, permettant ainsi un entraînement efficace des modèles d'apprentissage automatique sans nécessiter d'investissement dans des infrastructures coûteuses. Cette plateforme a été reconnue pour sa capacité à fournir de bonnes performances en comparaison avec d'autres modèles [75]. De plus, elle offre un environnement de développement collaboratif, permettant le partage et la collaboration sur le code et les résultats d'entraînement avec d'autres chercheurs, offrant ainsi une puissance de calcul significative pour un large éventail d'applications.

Pour garantir la fiabilité des résultats, environ 15 tests distincts ont été effectués avec la même répartition des données. Chaque test a évalué la cohérence des performances du modèle dans des conditions variées.

Le modèle donne des résultats relativement bons comme détaillés ci-dessous :

<i>Mesures</i>	<i>Valeur</i>
<i>Précision</i>	0.833
<i>Rappel</i>	0.9
<i>Score F1</i>	0.86

Tableau 3 : Résultats des performances du modèle

5.2 DEVELOPPEMENTS DES CODES :

Dans le cadre de cette recherche, trois codes ont été développés pour enrichir les capacités de notre robot. Le premier code Python se concentre sur l'intégration d'un microphone au sein du robot, permettant une navigation autonome pour la détection de la source sonore et le scan selon une trajectoire bien précise. Le deuxième code Python, basé sur le LAN-XI Open API, qui rend le processus de collecte de données autonome, éliminant ainsi les tâches manuelles. Ces deux codes travaillent ensemble de manière efficace, en combinant la robotique intelligente et la technologie LAN-XI pour offrir une solution complète. Le troisième code est associé aux simulations des points de mesures pour la génération de la cartographie acoustique sur MATLAB.

La suite détaille le fonctionnement de chaque code, en soulignant leurs implications dans des applications pratiques.

5.2.1 Robot Doosan et le microphone pour la détection et suivi de trajectoire

Le premier code développé s'adresse à la mise en œuvre d'un système robotique équipé d'un microphone. L'objectif principal de ce code est de permettre au robot de suivre une trajectoire prédéfinie de manière précise, tout en enregistrant les données audios environnementales à l'aide du microphone.

Après la détection de la source sonore par la caméra de balayage, le robot affiche un message à l'opérateur, l'invitant à lancer le processus automatique de scan en appuyant sur le bouton OK comme indique la figure 45. Cela simplifie l'interaction homme-robot, offrant une expérience utilisateur intuitive pour déclencher efficacement le processus de scan.

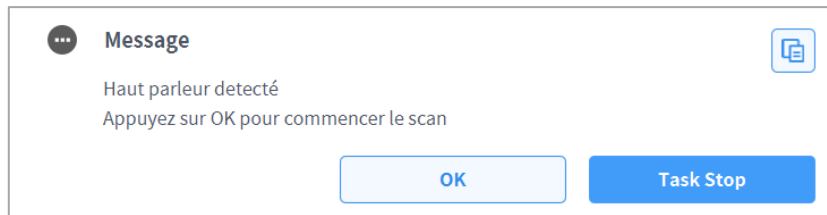


Figure 45 : Message affiché à l'opérateur

Pour vérifier la robustesse de l'algorithme de génération de trajectoire, les expériences ont été répétées en variant la position et l'orientation de la source sonore (haut-parleur).

Le tableau 4 détaille les résultats statistiques des tests. Ce tableau inclut les positions de la source sonore, les positions réellement détectées par le robot, ainsi que les erreurs moyennes observées entre ces positions.

	<i>Position du source sonore (x, y, z)</i>	<i>Position détectée (x, y, z)</i>	<i>Erreur moyenne (mm)</i>
<i>Position 1</i>	(0.171, 105.187, 30.392)	(0.271, 105.287, 30.392)	1.0
<i>Position 2</i>	(-782.783, 376.116, 100.000)	(-782.003, 375.316, 99.200)	0.8
<i>Position 3</i>	(-440.402, 32.008, 97.989)	(-441.102, 32.708, 98.689)	0.7

Tableau 4 : Comparaisons de positions désirées et détectées de la source sonore

Une fois la source sonore est détectée et l'utilisateur confirme, le code orchestre automatiquement le lancement d'un scan complet selon une trajectoire prédéfinie. Le robot Doosan suit cette trajectoire avec une précision remarquable, permettant ainsi une cartographie systématique du rayonnement acoustique de la source.

Un extrait du code en Python, associé à la détection et au scan automatique, est présenté dans l'annexe 5.

5.2.2 Module LAN-XI Open API pour les mesures automatisées :

La synchronisation entre le système d'acquisition B&K avec le robot Doosan pour des mesures entièrement autonomes s'est avérée être une tâche très compliquée. Habituellement, un module de synchronisation est proposé par le fournisseur B&K avec des frais supplémentaires. Cependant, afin de réduire les coûts et de maximiser l'efficacité de notre projet, un algorithme en python a été développé pour répondre à nos besoins spécifiques. Ce processus constitue un défi supplémentaire, exigeant une compréhension approfondie de la communication avec le module LAN-XI et de la programmation en Python. Cependant, cette approche nous a permis de trouver une solution économique et efficace, montrant ainsi notre engagement à surmonter les obstacles et à atteindre nos objectifs de recherche.

Le module LAN-XI Open API représente une interface de programmation d'application (API) puissante qui permet l'interaction programmatique avec les modules tel que le TYPE 3160, offrant ainsi un contrôle étendu et des possibilités de personnalisation. Cette API ouvre un univers d'opportunités en facilitant l'intégration de fonctionnalités avancées dans des scripts et des applications, offrant une flexibilité exceptionnelle pour adapter le système LAN-XI à des besoins spécifiques.

Parallèlement, l'interface web du LAN-XI, présenté dans la figure 46, constitue une interface utilisateur graphique intuitive qui simplifie l'interaction avec ces modules. Cette interface conviviale permet aux utilisateurs de configurer rapidement les paramètres, de visualiser les mesures en cours, et d'accéder à des fonctionnalités avancées. Elle offre ainsi une expérience utilisateur transparente, facilitant la gestion et la supervision des opérations liées aux mesures acoustiques.



Figure 46 : LAN-XI TYPE 3160 Open API

En utilisant ces fonctionnalités, le code développé communique avec le module LAN-XI pour établir une connexion, détecter les transducteurs connectés, configurer les canaux et les paramètres de mesure, et recueillir en continu les données audios tout en éliminant la nécessité d'interventions manuelles.

Lorsque le script est déclenché, le module LAN-XI initie la première mesure de manière automatique. Une fois que la première mesure est terminée, le code surveille l'état du robot, et attend patiemment qu'il atteigne la position suivante préalablement définie. Dès que le robot est positionné, le script déclenche automatiquement la deuxième mesure, procédant ainsi de manière itérative jusqu'à la fin de la séquence de mesures prédéfinie.

Cette synchronisation garantit une collecte de données structurée et cohérente tout en évitant des temps d'attente inutiles entre les mesures successives. La figure 47 montre le processus de mesure et d'enregistrement autonome des mesures.

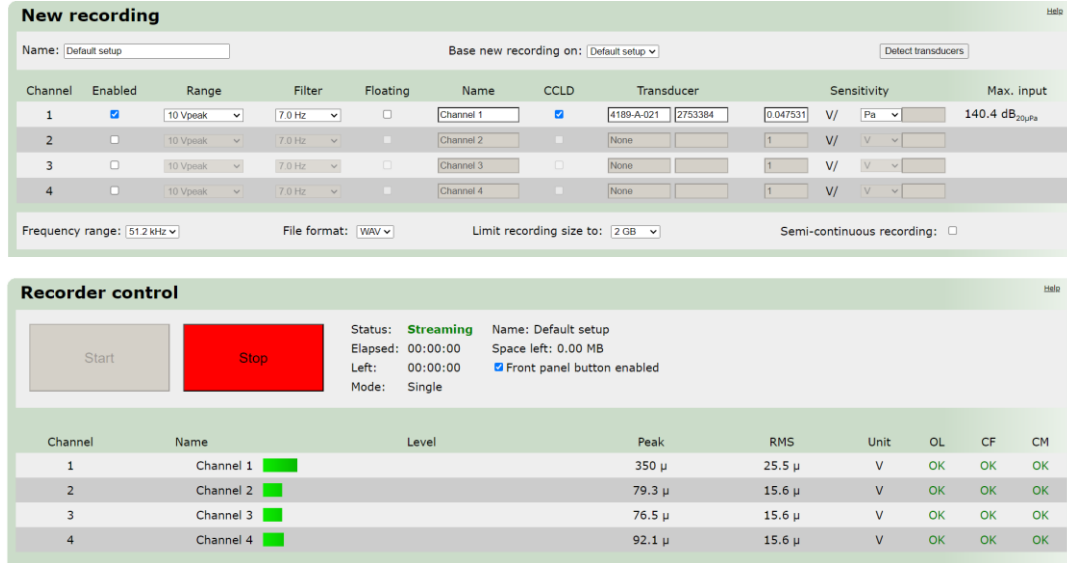


Figure 47 : Processus de mesure et enregistrement automatique des mesures

Les résultats sont ensuite sauvegardés automatiquement pour une analyse ultérieure. Un extrait du code en python associé aux mesures automatisées est présenté dans l'annexe 6.

5.3 RESULTAT DE MESURES

5.3.1 Traitement des mesures à l'aide du BK Connect :

Comme mentionnée dans la section 5.2, l'acquisition se déroule en plusieurs étapes. Premièrement, le robot se positionne au point d'enregistrement. Une fois sa position est confirmée, la source d'excitation est activée et la réponse en pression est enregistrée. Chaque signal enregistré est associé aux coordonnées du point d'enregistrement, et ce vecteur est stocké dans un fichier. Enfin, le nombre actuel de signaux enregistrés est sauvegardé dans un fichier pour le traitement. Figure 48 présente un aperçu des résultats des mesures sur le logiciel Bk Connect.

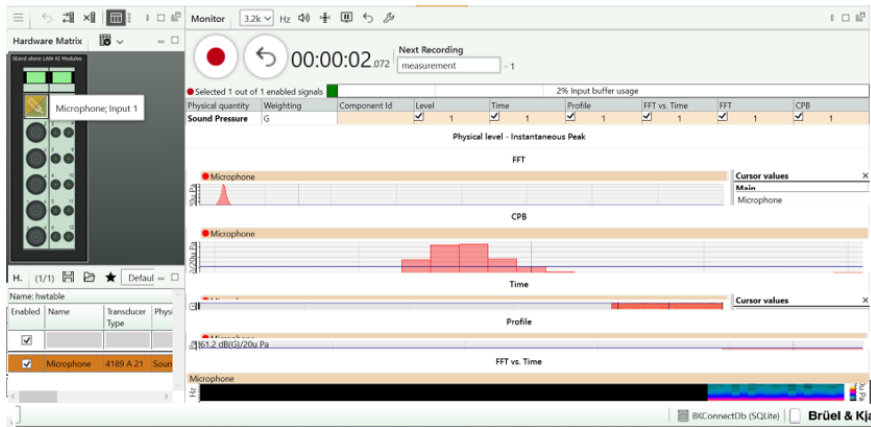


Figure 48 : Mesures et traitement des données à l'aide du logiciel Bk Connect

Les données acoustiques collectées constituent un ensemble complet de relevés de pression enregistrés en divers points de la zone désignée. La figure 49 montre quatre courbes qui décrivent l'évolution du son à différents endroits. La première courbe concerne le point le plus proche de la source sonore, les autres concernent des endroits plus éloignés. Ces courbes révèlent comment la pression acoustique varie dans le temps et dans l'espace, en mettant en évidence d'éventuels changements et schémas significatifs.

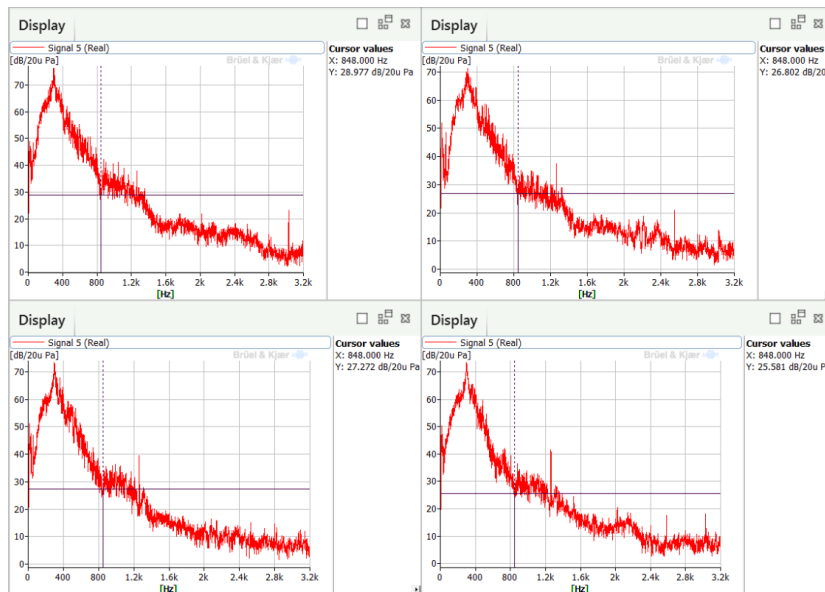


Figure 49 : Analyse acoustique : Variations du signal sonore en fonction de la fréquence

5.3.2 Génération du code Matlab :

L'utilisation du logiciel MATLAB joue un rôle essentiel dans le post-traitement des données acoustiques, offrant une plateforme robuste pour créer des contours de mesures détaillés. Une fois les données brutes acquises à partir du module LAN-XI, MATLAB permet une analyse avancée en extrayant des informations essentielles et en générant des représentations graphiques précises.

Le processus commence par l'importation des données acoustiques dans MATLAB pour la simulation, qui peuvent être appliquées pour extraire les caractéristiques pertinentes. La création du contour de mesures implique souvent l'utilisation d'outils de traitement du signal et de techniques d'analyse spectrale.

Une fois que les contours de mesures sont établis, l'ajout des données acoustiques intervient pour enrichir la cartographie du son comme le montre la figure 50. Cette étape implique l'intégration des informations recueillies par le robot équipé du microphone dans les zones spécifiques. Les données acoustiques sont superposées sur les contours existants, permettant ainsi de créer une cartographie audiovisuelle détaillée des variations de son dans l'environnement étudié. L'interpolation linéaire a été utilisée pour estimer les niveaux sonores entre les points de mesure discrets, créant ainsi une surface continue représentant les variations acoustiques.

Un extrait du code MATLAB associé aux simulations des points de mesures avec la cartographie acoustique est présenté dans l'annexe 8.

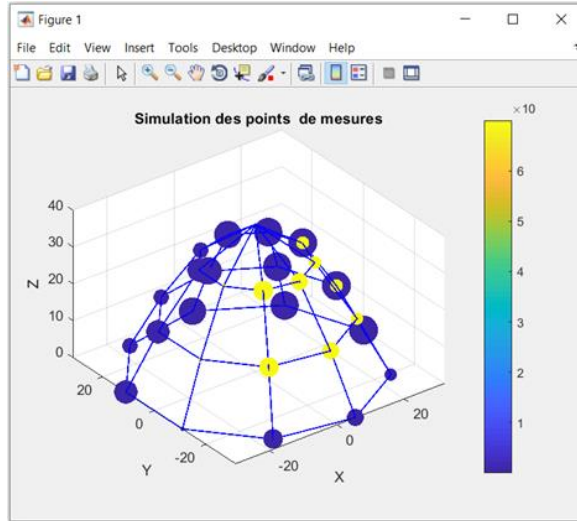


Figure 50 : Trajectoire du robot avec les différents points de mesures

La figure 51 montre la carte sonore en 3D créée par interpolation linéaire des données de mesure. Ce visuel fournit des informations importantes sur la distribution des niveaux sonores dans l'environnement étudié.

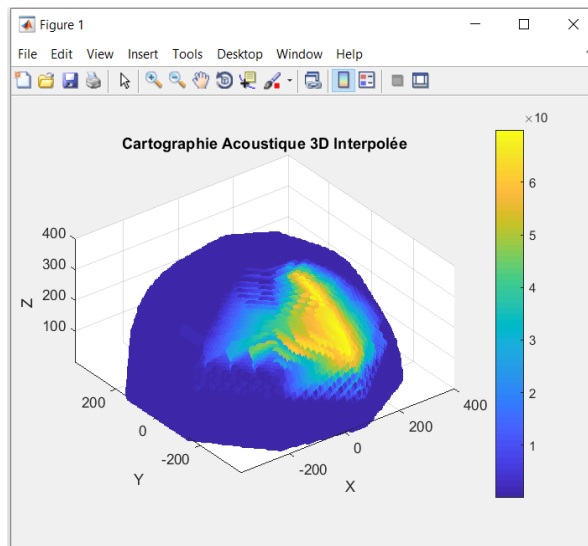


Figure 51 : Cartographie acoustique de mesures

Les variations de couleurs illustrent clairement la dynamique acoustique de la zone. Les zones chaudes indiquent des niveaux sonores plus élevés, tandis que les zones plus froides,

représentées par des couleurs plus claires, signifient des niveaux sonores plus faibles. Cette analyse visuelle permet d'identifier les zones où le bruit est plus intense, ce qui aide à comprendre quelles sont les régions qui subissent les plus fortes perturbations sonores.

5.4 RAPPORT DE MESURE ET INTERPRETATION :

5.4.1 Rapport sur le niveau de pression acoustique :

Description du projet :	Mesure automatisée du SPL des haut-parleurs avec alimentation
Date de la mesure :	2023
Matériels :	Brüel & Kjør
Version du rapport :	1.0
Norme :	ISO 3744 - 3745
Lieu de la mesure :	
Personne responsable :	R.C et O.T (UQAR)
Type de machine :	Haut-parleurs
Description de l'appareil :	
Longueur [m] :	0.07
Largeur [m] :	0.08
Hauteur [m] :	0.15
Nombre de haut-parleurs :	2
Informations complémentaires :	Les haut-parleurs étaient en mode de fonctionnement normal, reproduisant divers types d'audios pour évaluer les niveaux sonores.
Mesureur de haute précision	LAN-XI TYPE 3160
Hémisphère :	Selon l'ISO 3745 - 3740
Microphone :	B&K TYPE 4189-A-021
Logiciel d'enregistrement et d'analyse des données :	BK Connect
Calibrateur acoustique :	Calibrateur B&K TYPE 4231
Position du microphone :	Hémisphère
Nombre de microphones :	1
Durée de la mesure[s] :	5

Tableau 5 : Rapport sur le niveau de pression acoustique

5.4.2 Comparaison entre la méthode utilisée et les autres méthodes :

Pour réaliser une cartographie acoustique, notre approche proposée ne nécessite qu'un seul microphone monté sur un bras robotique avec une caméra de balayage pour des mesures automatisées, tandis que l'autre approche implique l'utilisation d'une méthode d'hémisphère avec plusieurs microphones placés autour de la source de bruit. Le Tableau 6 présente une comparaison entre notre méthode développée et la méthode de mesure d'hémisphère avec plusieurs microphones sur plusieurs paramètres tels que le positionnement des microphones, les coûts, et la précision de mesure.

	Méthode	
	Méthode automatisée développée	Hémisphère avec plusieurs microphones
Positionnement des microphones	Un seul microphone monté sur le bras du robot	Plusieurs microphones placés sur une demi-sphère autour de la source de bruit
Coût	Coût relativement faible grâce à l'utilisation d'un seul microphone	Coût très plus élevé en raison de l'utilisation de plusieurs microphones
Précision des mesures	Les mesures peuvent être plus précises si le microphone est correctement positionné	Les mesures sont précises, car plusieurs microphones sont utilisés à différents points
Environnement des mesures	Utile pour les mesures en champ libre et peut être utilisé pour dans des environnements complexes	Ne peut être utilisé pour effectuer des mesures dans des environnements complexes
Durée des mesures	Les temps de mesure peuvent être plus courts, car une seule mesure peut être prise à la fois.	Les temps de mesure peuvent être plus longs, car plusieurs mesures doivent être prises à différents points
Traitement des données	Les données peuvent être traitées automatiquement et rapidement, car il y a moins de points de mesure.	Le traitement des données peut prendre plus de temps, car il y a plusieurs points de mesure à traiter.
Compatibilité avec d'autres technologies	La combinaison du microphone et de la caméra offre une compatibilité facilitant l'intégration dans des environnements industriels complexes.	L'intégration avec d'autres systèmes pouvait être difficile en raison de protocoles de communication complexes.

Tableau 6 : Tableau comparatif entre les méthodes de mesures

La méthode développée dans le cadre de ce projet présente plusieurs avantages par rapport à la méthode d'hémisphère. En comparant ses résultats avec ceux d'autres études de recherche, elle a démontré une précision accrue dans la détection et la localisation des sources sonores par rapport aux approches traditionnelles. Cette validation renforce la crédibilité et la fiabilité de cette approche, la positionnant comme une référence dans le domaine de la mesure acoustique industrielle. Elle se distingue également par sa simplicité, son coût réduit, sa polyvalence et sa facilité d'intégration avec d'autres technologies, en faisant ainsi une alternative prometteuse par rapport aux méthodes classiques. De plus, la combinaison du microphone et de la caméra rend cette méthode particulièrement adaptée aux environnements industriels complexes, tout en assurant la sécurité des opérateurs.

Conclusion :

La révolution de l'industrie 4.0, avec sa synergie entre l'intelligence artificielle et les robots, a permis l'élaboration de cette nouvelle méthode de mesure automatisée novatrice. Comparée aux méthodes traditionnelles, notre approche se distingue par une performance accrue, notamment en termes de précision, d'automatisation et de répétabilité des mesures.

CONCLUSION GÉNÉRALE

En conclusion de cette étude, il apparaît clairement que les problèmes liés au bruit représentent une préoccupation majeure dans notre environnement, affectant directement la santé, la qualité de vie et le bien-être des individus. Face à ces enjeux, la mesure, l'évaluation et l'atténuation du bruit sont devenues impératives pour la société moderne.

Au cours de cette étude, une nouvelle méthode de mesure novatrice dans le domaine de l'acoustique a été développée en intégrant de manière synergique le robot Doosan, le microphone, la caméra et l'intelligence artificielle (IA). Cette méthodologie avancée représente une rupture significative dans le domaine de l'acoustique, exploitant pleinement le potentiel de la technologie robotique pour une collecte de données plus efficace et précise, tout en bénéficiant des capacités d'analyse et d'adaptation de l'IA.

En outre, ce projet se démarque par sa capacité à répondre au besoin crucial d'améliorer la précision et l'autonomie dans l'identification du niveau sonore des machines vibrantes. Trois contributions principales ont été apportées pour atteindre cet objectif ambitieux. Tout d'abord, l'utilisation d'algorithmes en Python pour la planification des trajectoires du robot Doosan a permis d'assurer des mouvements précis lors des mesures, en exploitant pleinement les fonctionnalités étendues du logiciel RoboDK. Ensuite, l'intégration de l'intelligence artificielle a permis d'améliorer considérablement la détection des sources sonores, en utilisant des modèles CNN pré-entraînés conjointement avec une base de données d'images diverses pour entraîner un modèle personnalisé. Enfin, le développement d'un algorithme en Python pour synchroniser le système d'acquisition B&K avec le robot Doosan a été crucial pour maximiser l'efficacité du projet tout en réduisant les coûts. Ces contributions combinées repoussent les limites des méthodes classiques et tiennent compte de la complexité des structures, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'identification précise des points d'intérêt acoustiques dans les environnements industriels.

Il est possible d'affirmer que cette étude offre une base solide pour l'exploration de nouvelles avenues technologiques et scientifiques, ainsi qu'une perspective prometteuse pour l'avenir

dans ce domaine. Cela ouvre des opportunités pour de futures recherches, des développements technologiques et des applications concrètes qui pourraient avoir un impact significatif sur divers secteurs. Il serait également bénéfique d'explorer des applications spécifiques dans des secteurs variés tels que l'industrie, la santé publique et l'environnement, afin de maximiser l'impact positif de ces avancées sur la société.

ANNEXE -1- INTERFACE ONROBOT WEBCLIENT

Sign in to OnRobot Web Client

USERNAME

PASSWORD

Remember me SIGN IN

[Forgot your password?](#)

OnRobot WEBCLIENT v5.15.1

Devices

Configuration


WebLogic™

Paths

Update


TCP/CoG

Please select from the detected device(s):




Eye Box

SELECT



2FG7

SELECT



Eyes

SELECT

Figure 52 : Interface OnRobot WebClient (Devices) pour la configuration de la caméra

ANNEXE -2- CONFIGURATION DE L'ADRESSE IP DU PROTOCOLE TCP/IPV4

The image shows two screenshots of the DART-Platform GV02090300 software interface. The top screenshot is titled "Select an Robot Serial Number" and shows a table with one entry. The bottom screenshot is titled "Transfer Control" and shows a "Forced Withdraw" button.

Top Screenshot: Select an Robot Serial Number

Select an robot serial number to connect.

Obtain the Controller IP Automatically Refresh

No.	Robot Serial No.	Controller IP	Controller Version
1	XDC3E2-M1013	192.168.1.100	GV02090300

Enter the Controller IP Manually

IP Address: 192 . 168 . 137 . 100 ×

Connect

Bottom Screenshot: Transfer Control

To initialize the DART Platform, control must be obtained from the controller.

Forced Withdraw

Figure 53 : Configuration de l'adresse IP du protocole TCP/IPV4 et transfert du contrôle de robot Doosan

ANNEXE -3-
EXTRAIT DE L'ALGORITHME YOLOV5 UTILISE POUR LA DÉTECTION
DE L'OBJET.

```
----- *train.py -----  
  
import argparse  
import math  
import random  
import time  
from copy import deepcopy  
from datetime import datetime, timedelta  
from pathlib import Path  
try:  
    import comet_ml  
except ImportError:  
    comet_ml = None  
import val as validate # for end-of-epoch mAP  
from models.experimental import attempt_load  
from models.yolo import Model  
from utils.general import (  
    LOGGER,  
    TQDM_BAR_FORMAT,  
    check_dataset,  
    strip_optimizer,  
    yaml_save, )  
  
# Start training  
t0 = time.time()  
nb = len(train_loader) # number of batches  
nw = max(round(hyp["warmup_epochs"] * nb), 100) # number of warmup iterations,  
max(3 epochs, 100 iterations)
```

```

# nw = min(nw, (epochs - start_epoch) / 2 * nb) # warmup to < 1/2 of training
last_opt_step = -1
maps = np.zeros(nc) # mAP per class
results = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) # P, R, mAP@.5, mAP@.5-.95, val_loss(box, obj,)
scheduler.last_epoch = start_epoch - 1 # do not move
scaler = torch.cuda.amp.GradScaler(enabled=amp)
stopper, stop = EarlyStopping(patience=opt.patience), False
compute_loss = ComputeLoss(model) # init loss class
callbacks.run("on_train_start")
LOGGER.info(
    f'Image sizes {imgsz} train, {imgsz} val\n'
    f'Using {train_loader.num_workers * WORLD_SIZE} dataloader workers\n'
    f'Logging results to {colorstr('bold', save_dir)}\n"
    f'Starting training for {epochs} epochs...' )
for epoch in range(start_epoch, epochs): # epoch -----
    --
        callbacks.run("on_train_epoch_start")
        model.train()
def parse_opt(known=False):
    parser = argparse.ArgumentParser()
    parser.add_argument("--weights", type=str, default=ROOT / "yolov5s.pt",
        help="initial weights path")
    parser.add_argument("--cfg", type=str, default="", help="model.yaml path")
    parser.add_argument("--data", type=str, default=ROOT /
        "data/HautParleurs.yaml", help="dataset.yaml path")
    parser.add_argument("--imgsz", "--img", "--img-size", type=int, default=640,
        help="train, val image size (pixels)")
    parser.add_argument("--rect", action="store_true", help="rectangular
        training")
    parser.add_argument("--resume", nargs="?", const=True, default=False,
        help="resume most recent training")
    )

```

```

----- *detect.py -----
import argparse
import csv
from pathlib import Path
import torch
FILE = Path(__file__).resolve()
ROOT = FILE.parents[0] # YOLOv5 root directory
if str(ROOT) not in sys.path:
    sys.path.append(str(ROOT)) # add ROOT to PATH
ROOT = Path(os.path.relpath(ROOT, Path.cwd())) # relative
from ultralytics.utils.plotting import Annotator, colors, save_one_box
def run(
    weights=ROOT / "yolov5s.pt", # model path or triton URL
    source=ROOT / "data/images", # file/dir/URL/glob/screen/0(webcam)
    data=ROOT / "data/coco128.yaml", # dataset.yaml path
    imgsz=(640, 640), # inference size (height, width) )
def parse_opt():
    parser = argparse.ArgumentParser()
    parser.add_argument("--weights", nargs="+", type=str, default=ROOT /
"yolov5s.pt", help="model path or triton URL")
    parser.add_argument("--source", type=str, default=ROOT / "data/images",
help="file/dir/URL/glob/screen/0(webcam)")
    parser.add_argument("--data", type=str, default=ROOT / "data/HautParleurs.yaml",
help="(optional) dataset.yaml path")
    parser.add_argument("--imgsz", "--img", "--img-size", nargs="+", type=int,
default=[640], help="inference size h,w")
def main(opt):
    check_requirements(ROOT / "requirements.txt", exclude=("tensorboard",
"thop"))
    run(**vars(opt))
if __name__ == "__main__":
    opt = parse_opt()
    main(opt)

```

ANNEXE -4-
EXTRAIT DE L'ALGORITHME DÉVELOPPÉ DESTINÉ AU
POSITIONNEMENT ET LA PRISE DE DÉCISION

```
# Set values to the tool center point tdVGC10 (x=0.00mm Y=0.00mm, z=170.00mm)
tool_center_point = {'x': 0.00, 'y': 0.00, 'z': 170.00}
# Define function to move to a specific position
def move_to_position(x, y, z):
# Run the Eyes task and return the number of workpieces found
systeme_locate = or_eyes.inspect(5, True)
while systeme_locate != -1:
# Return with the position of the workpiece found
system_wp = or_eyes.get_next_wp(1, 1)
# Return with the inspection result
res = or_eyes.get_insp_res()
if res == 1:
# Place
place_workpiece(system_wp)
elif res == 2:
# Move the robot to the specified position pass
speaker_position = {'x': position['x'] + 5, 'y': position['y'] + 5, 'z':
position['z'] + 10}
# Calculate position and dimensions of speaker relative to robot center
move_to_position(speaker_position ['x'], speaker_position ['y'],
speaker_position ['z'])
# Move to a safe position to replace with speaker
move_to_position(tool_center_point['x'], tool_center_point['y'],
tool_center_point['z'])
# Place robot arm at calculated position place_workpiece(speaker_position)
# Move to the desired position
move_to_position(shoot_position['x'], shoot_position['y'], shoot_position['z'])
```


ANNEXE -5-
EXTRAIT DU CODE PYTHON ASSOCIÉ A LA DÉTECTION ET AU SCAN
AUTOMATIQUE.

```
Documentation : https://robodk.com/doc/en/RoboDK-API.html
# Reference:      https://robodk.com/doc/en/PythonAPI/robodk.html
from robodk import robolink      # RoboDK API
from robodk import robomath      # Robot toolbox

RDK = robolink.Robolink()

# Forward and backwards compatible use of the RoboDK API:
from robodk import *             # RoboDK API
from robolink import *          # Robot toolbox

...

RDK = Robolink() # Link to RoboDK
robot = RDK.Item('Doosan Robotics M1013', ITEM_TYPE_ROBOT)
Target1 = RDK.Item('Target 1')
Target2 = RDK.Item('Target 2')
Target3 = RDK.Item('Target 3')
Target4 = RDK.Item('Target 4')
Target5 = RDK.Item('Target 5')
Target6 = RDK.Item('Target 6')
Target7 = RDK.Item('Target 7')
Target8 = RDK.Item('Target 8')
Target9 = RDK.Item('Target 9')
HomePosition = RDK.Item('Home Position')
robot.MoveL (Target1)

...

rayon = 350
nombre_de_points = 25 # Paramètres de mesure
pose_de_depart = robot.Pose() # Obtenir la position de départ du robot
```

```

for i in range(nombre_de_points): # Boucle pour générer le trajet circulaire
    angle = 2 * pi * i / nombre_de_points
    x = rayon * cos(angle)
    y = rayon * sin(angle)
...
# Créer une nouvelle pose pour le déplacement
    nouvelle_pose = pose_de_depart * transl(x, y, 0) # transl() pour définir
les coordonnées XYZ

    robot.MoveL(nouvelle_pose) # MoveL (Move Linear) pour déplacer le robot
en ligne droite
robot.MoveL (Target2)
    # Créer une nouvelle pose pour le déplacement
    nouvelle_pose = pose_de_depart * transl(x, y, 0)
    # Déplacer le robot en utilisant la méthode MoveC
    robot.MoveC(nouvelle_pose)
robot.MoveL (Target3)
...
rayon = 250
pose_de_depart = robot.Pose()
for i in range(nombre_de_points):
    angle = 2 * pi * i / nombre_de_points
    x = rayon * cos(angle)
    y = rayon * sin(angle)
    nouvelle_pose = pose_de_depart * transl(x, y, 0)
robot.MoveL (HomePosition)
robot.MoveL (Target6)
robot.MoveL (HomePosition)
robot.MoveL (Target9)
robot.MoveL (HomePosition)

```

ANNEXE -6-
EXTRAIT DU CODE PYTHON ASSOCIÉ AUX MESURES AUTOMATISÉES
LAN-XI OPEN API

```
import time
import threading
import selectors
import pandas as pd
def receive_thread(sel):
    """On selector event, reads data from associated socket and writes to file."""
    while True:
        events = sel.select()
        for key, _ in events:
            sock = key.fileobj
            data = sock.recv(16384)
            if not data:
                return
            file = key.data
            file.write(data)
def get_measurement_errors(cs):
    """Given a 'cs' array of channel Status structures, return a collection of error
    strings."""
    err = []
    for i, sts in enumerate(cs):
        s, prefix = "", f"Channel {i+1}: "
        if sts["anol"] != "none":
            s = s + prefix + f'Analog Overload ({sts["anol"]})'
            prefix = ", "
        if sts["cmol"] != "none":
            s = s + prefix + f'Common Mode Overload ({sts["cmol"]})'
```

```

        prefix = ", "
    if sts["cf"] != "none":
        s = s + prefix + f'Cable Fault ({sts["cf"]})'
        prefix = ", "
    if s != "":
        err.append(s)

return err

# Analyse des arguments en ligne de commande
parser = argparse.ArgumentParser()
parser.add_argument("addr", help="IP address of the LAN-XI module")
parser.add_argument("-n", "--name", dest="name", default="My Measurement", \
    help="Name of the measurement")
parser.add_argument("-t", "--time", dest="time", default=10, type=int, \
    help="The time (in seconds) of each measurement")
parser.add_argument("-c", "--count", dest="count", default=5, type=int, \
    help="The number of measurements")

# Générer l'URL de base
ip_addr = args.addr.split("%")[0]
addr_family = socket.getaddrinfo(ip_addr, port=0)[0][0]
base_url = "http://[" + args.addr + "]" if addr_family == socket.AF_INET6 else
"http://" + args.addr
base_url = base_url + "/rest/rec"

args.addr = args.addr.replace("%%", "%") # Fix double per cent sign issue on
Windows

# Créer un DataFrame pour stocker les données de mesure
measurements_data = pd.DataFrame(columns=["Measurement", "TimeElapsed",
"Errors"])

# Boucle pour effectuer plusieurs mesures avec un intervalle
for measurement_number in range(1, args.count + 1):
    print(f"Starting measurement {measurement_number}...")
    now = time.time()
    requests.put(base_url + "/module/time", data=str(int(now * 1000)))

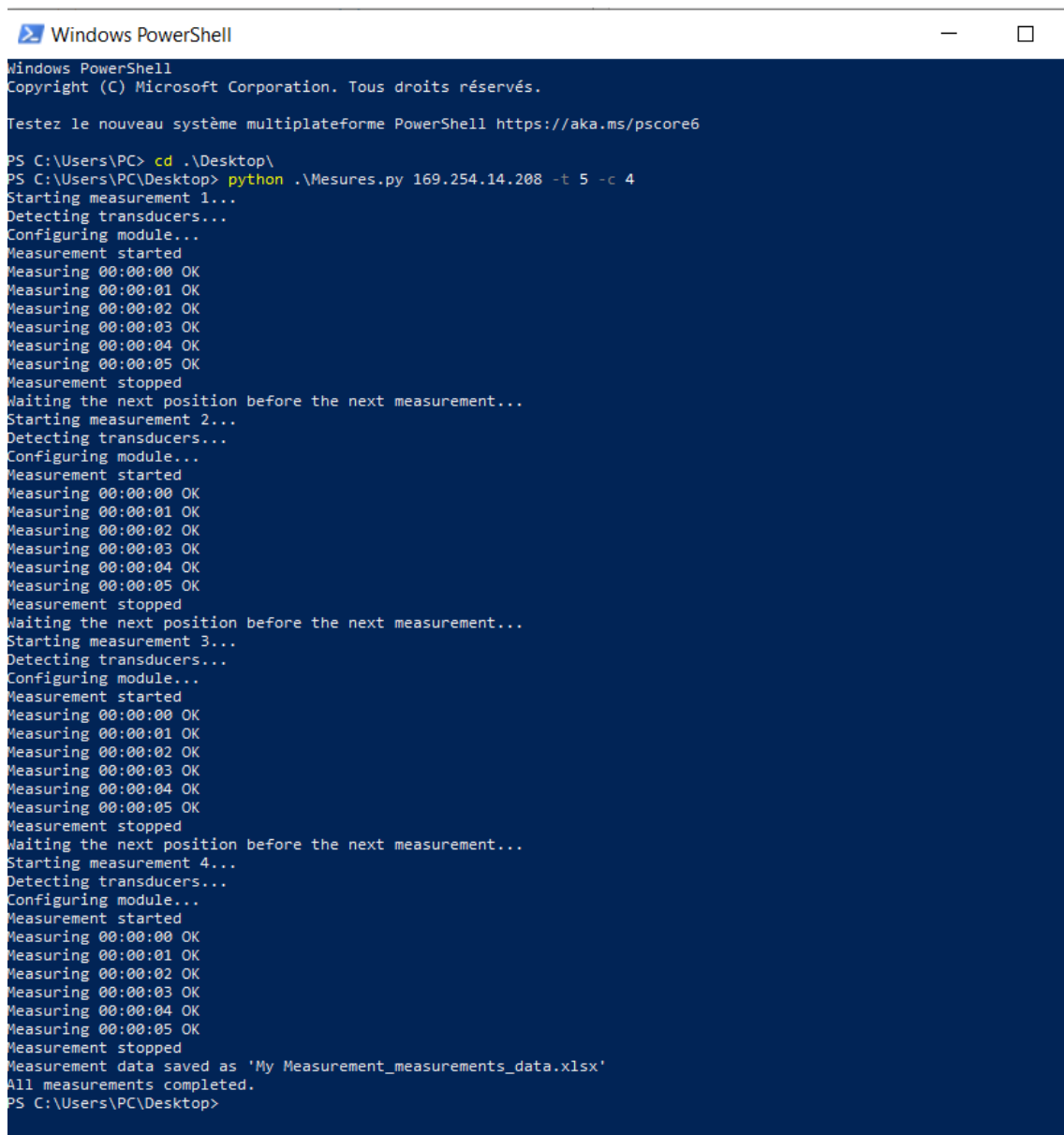
```

```

print("Detecting transducers...")
requests.post(base_url + "/channels/input/all/transducers/detect")
prev_tag = 0
while True:
    response = requests.get(base_url + "/onchange?last=" +
str(prev_tag)).json()
    prev_tag = response["lastUpdateTag"]
    if not response["transducerDetectionActive"]:
transducers = requests.get(base_url +
"/channels/input/all/transducers").json()
    setup = requests.get(base_url + "/channels/input/default").json()
    for ch in setup["channels"]:
        ch["destinations"] = ["socket"]
    for idx, t in enumerate(transducers):
        if t is not None:
            setup["channels"][idx]["transducer"] = t
print(f'Configuring module...')
filename = args.name + f"_measurement_{measurement_number}.stream"
stream_file = open(filename, "wb")
# Ajouter les données de mesure au DataFrame
measurements_data = pd.concat([measurements_data, pd.DataFrame({
"Measurement": [measurement_number], ignore_index=True})
# Attendre l'intervalle entre les mesures
if measurement_number < args.count:
    print("Waiting the next position before the next measurement...")
# Sauvegarder le DataFrame dans un fichier Excel
excel_filename = args.name + "_measurements_data.xlsx"
measurements_data.to_excel(excel_filename, index=False)
print(f"Measurement data saved as '{excel_filename}'")
print("All measurements completed.")

```

ANNEXE -7- EXTRAIT D'ENREGISTREMENT DE MESURES AUTOMATISÉES AVEC LAN-XI OPEN API



```
Windows PowerShell
Copyright (C) Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

Testez le nouveau système multiplateforme PowerShell https://aka.ms/pscore6

PS C:\Users\PC> cd .\Desktop\
PS C:\Users\PC\Desktop> python .\Mesures.py 169.254.14.208 -t 5 -c 4
Starting measurement 1...
Detecting transducers...
Configuring module...
Measurement started
Measuring 00:00:00 OK
Measuring 00:00:01 OK
Measuring 00:00:02 OK
Measuring 00:00:03 OK
Measuring 00:00:04 OK
Measuring 00:00:05 OK
Measurement stopped
Waiting the next position before the next measurement...
Starting measurement 2...
Detecting transducers...
Configuring module...
Measurement started
Measuring 00:00:00 OK
Measuring 00:00:01 OK
Measuring 00:00:02 OK
Measuring 00:00:03 OK
Measuring 00:00:04 OK
Measuring 00:00:05 OK
Measurement stopped
Waiting the next position before the next measurement...
Starting measurement 3...
Detecting transducers...
Configuring module...
Measurement started
Measuring 00:00:00 OK
Measuring 00:00:01 OK
Measuring 00:00:02 OK
Measuring 00:00:03 OK
Measuring 00:00:04 OK
Measuring 00:00:05 OK
Measurement stopped
Waiting the next position before the next measurement...
Starting measurement 4...
Detecting transducers...
Configuring module...
Measurement started
Measuring 00:00:00 OK
Measuring 00:00:01 OK
Measuring 00:00:02 OK
Measuring 00:00:03 OK
Measuring 00:00:04 OK
Measuring 00:00:05 OK
Measurement stopped
Measurement data saved as 'My Measurement_measurements_data.xlsx'
All measurements completed.
PS C:\Users\PC\Desktop>
```

Figure 54 : Extrait d'enregistrement de mesures automatisées avec LAN-XI Open API

ANNEXE -8-
EXTRAIT DU CODE EN MATLAB ASSOCIE AU CARTOGRAPHIE
ACOUSTIQUE

```
try
    % Charger le fichier Excel avec les données
    data = readtable('Mesures.xlsx');
    data = data(1:end, :);
    % Extraire les fréquences et les mesures
    frequencies = str2double(data.Properties.VariableNames(2:end));
    measures = table2array(data(:, 2:end));
catch
    error('Erreur lors du chargement du fichier Excel.');
```

end

...

% Coordonnées des microphones sur la surface d'une demi-sphère

```
radius = 30;
Pos_microphones = 15;
theta = linspace(0, pi/2, Pos_microphones);
phi = linspace(0, 2*pi, Pos_microphones);
[theta, phi] = meshgrid(theta, phi);
...
```

```
for signal = 1:num_signaux
    x = data(:, 1);
    y = data(:, signal + 1);

    for i = 1:length(x)
        [~, index] = min(abs(x(i) - frequence_microphone));
        y(i) = y(i) - reponse_en_frequence(index);
    end

    theta = linspace(0, 2 * pi, nombre_de_points);
    pression_acoustique = 20e-6 * 10.^(y / 20);
end
...
```

```

% SPL pour chaque mesure
spl = 20 * log10(pression_acoustique / 20e-6);
spl_values = (1, nombre_de_points)
x_mics = radius * sin(theta) .* cos(phi);
y_mics = radius * sin(theta) .* sin(phi);
z_mics = radius * cos(theta);
...
% Interpolation des mesures
x_interp = linspace(min(x_mics(:)), max(x_mics(:)), 100);
y_interp = linspace(min(y_mics(:)), max(y_mics(:)), 100);
z_interp = linspace(min(z_mics(:)), max(z_mics(:)), 50);
[x_interp, y_interp, z_interp] = meshgrid(x_interp, y_interp, z_interp);
% Interpolation des mesures pour chaque point de la grille
mesures_interp = griddata(x_mics(:), y_mics(:), z_mics(:), mesures(:), x_interp,
y_interp, z_interp, 'linear');
...
% Tracer la cartographie acoustique 3D interpolée
figure;
scatter3(x_interp(:), y_interp(:), z_interp(:), 50, mesures_interp(:), 'filled');
hold on;
title('Cartographie Acoustique 3D Interpolée');
xlabel('X ');
ylabel('Y ');
zlabel('Z ');
colorbar;
axis equal

```


RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ISO 1996-1:2016(en) Acoustics — Description, measurement, and assessment of environmental noise — Basic quantities and assessment procedures.
- [2] Johnson D., Anderson B. “Noise Reduction in Industrial Environments: A Comprehensive Approach”. The International Conference on Noise Control Engineering, pp. 120-135, 2017.
- [3] Michel P, André E, Louis B, “Development of a system for acoustic intensity mapping and transfer in the workplace”, IRSST Noise and vibration studies, R-714, 2011.
- [4] DEWESOFT, Acoustic sound intensity, sound power determination, sound source location. V2-1, 2020.
- [5] Williams, M. (2021). Fundamentals of acoustics: sound pressure, sound power and sound intensity. *OnScale*. <https://onscale.com/blog/fundamentals-of-acoustics-sound-pressure-sound-power-and-sound-intensity>
- [6] Brüel & Kjær, “Acoustic certification”. Site B&K, Noise Source Identification and Certification
- [7] Wang, H., Li, H., Li, M., Li, Z., & Li, J., “Robotic Sound Power Level Measurement System for HVAC Systems”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70, 1-11, (2020).
- [8] Mansouri, et al. “Experimental Study on Sound Power Mapping of a Vibrating Machine Using a Scanning Microphone and a Robot”. Applied Sciences, vol. 8, no. 11, 2018, p. 2276.
- [9] LE BRUIT, Conseils pour l'évaluation des impacts sur la santé humaine dans le cadre des évaluations environnementales, Santé Canada, 160332, 2017.
- [10] Alloprof (s. d.) | La classification des ondes | Notions avancées - <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/les-types-d-ondes-s1133>
- [11] Jean-Marc Richard, Ondes et Vibrations IUT, Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie – 15 mars 2009
- [12] Les caractéristiques d'une onde | Alloprof. (s. d.-b). <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/les-caracteristiques-d-une-onde-s1141>

- [13] Kinsler E., Frey A., Alan B., “Fundamentals of acoustics : Sound-waves”, 4th Edition, 2000.
- [14] LE SON. (s. d.-b). [https://www.lyc-diderot.ac-aix-marseille.fr/eleves/cours/bts-tp-bat/son.htm#:~:text=3.3\)%20Le%20niveau%20d'intensit%C3%A9,puissance%20acoustique%20de%20la%20source](https://www.lyc-diderot.ac-aix-marseille.fr/eleves/cours/bts-tp-bat/son.htm#:~:text=3.3)%20Le%20niveau%20d'intensit%C3%A9,puissance%20acoustique%20de%20la%20source).
- [15] Lefebvre, J. (1999). “Physical Basis of Acoustics”. Dans Physical Basis of Acoustics. <https://doi.org/10.1016/b978-012256190-0/50002-6>
- [16] Jean-Marc Richard, «Ondes et Vibrations, Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie – IUT, 2009.
- [17] Wikimedia. (2020, 9 mai). Courbe isosonique. https://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe_isosonique
- [18] Hearing loss and deafness: normal hearing and impaired hearing, Institute for Quality and Efficiency in Health Care (IQWiG), NCBI Bookshelf, November 2017
- [19] Marshall L. “Fundamentals of Acoustics, Sound Pressure Level (SPL), in Architectural Acoustics” (Second Edition), 2014
- [20] Sound Intensity - What is Sound Intensity ? (s. d.-b 2022). HBK World. <https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/sound/sound-intensity>
- [21] Williams, M. (2021). “Fundamentals of acoustics: sound pressure, sound power and sound intensity”. *OnScale*. <https://onscale.com/blog/fundamentals-of-acoustics-sound-pressure-sound-power-and-sound-intensity>
- [22] Siemens DISW. (s. d.). <https://community.sw.siemens.com/s/article/sound-pressure-sound-power-and-sound-intensity-what-s-the-difference>
- [23] Noise Measurement Procedures Manual, Environment Division, Department of Environment, Parks, Heritage and the Arts, Second Edition, July 2008
- [24] Au travail, prenez garde à la surexposition au bruit, Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail CNESST, 15 juin 2023. <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/salle-presse/communiqués/au-travail-prenez-garde-surexposition-au-bruit>
- [25] MOREUIL-CITIZEN | Echelle de bruit en décibel et nuisance. <http://moreuil-citizen.over-blog.com/2020/09/echelle-de-bruit-en-decibel-et-nuisance.html>
- [26] ISO 3741:2010(en) Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels emitted by noise sources from sound pressure : <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:3741:ed-4:v1:en>

- [27] Sound Pressure Measurement – Measurement With Microphone – DEWESOFT – Training (2014).<https://training.dewesoft.com/online/course/sound-pressure-measurement#measurement-with-microphone>
- [28] Jung, I.-J., Ih, J.-G. “Combined Microphone Array for Precise Localization of Sound Source Using Acoustic Intensimetry”, *Acoustical Advances, Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol 160:107820, (2021).
- [29] Botteldooren D., Van Renterghem T., Van Der Eerden F., Wessels P., Basten T., De Coensel B. “Industrial sound source localization using microphone arrays under difficult meteorological conditions”, *Griffith University, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, (2017).
- [30] Cherif R., & Atalla N. “Measurement of Sound Pressure Levels at Low Frequencies in Rooms. Comparison of Available Methods and Standards with Respect to Microphone Positions”, *Noise Control Engineering Journal*, 63(4),339-346, (2015).
- [31] Jan G, Švec. & Svante, G. “Tutorial and Guidelines on Measurement of Sound Pressure Level in Voice and Speech”. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, (2018).
- [32] Yunus M., Alsoufi M. S., & Hussain I. H. “Sound Source Localization and Mapping Using Acoustic Intensity Method for Noise Control in Automobiles and Machines”. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, (2015).
- [33] Nichel P., André L., Louis-Alexis B., “Développement d’un système de cartographie d’intensité acoustique et transfert en milieu de travail”, *Bruit et vibrations, IRSST 2021*.
- [34] Ambrosini M., Finn J., Guarnieri A. et Rondelli V., “The uncertainty in standardised sound power measurements: complying with ISO 17025”, *Research Doctorate, Agricultural University Of Bologna*, 2009.
- [35] Peter S. Siemens Sound Power Guide — “A guide to measuring sound power, an overview of international standards”. *Siemens PLM Software 25 June 2021*
- [36] Milos R. Bjelic, Knezevic N. et Jovanovic K., “Automated sound intensity measurement with robot and intensity probe”, *17th International Symposium INFOTEH Conference*, 2018.
- [37] Brüel & Kjær, “Noise Source Identification”. Site B&K, <http://www.bksv.com/pdf/Bp1908.pdf>
- [38] Christensen, J. J. et Hald, J. “Beamforming”. Site B&K, *Technical Review No. 1 (2004)* <http://www.bksv.com/pdf/Bv0056.pdf>

- [39] Thomas J., Jean Claude P., Vincent G. et Christophe J., “Real-Time Nearfield Acoustic Holography (RT-NAH): A technique for time-continuous reconstruction of a source signal”, NOVEM Conference, 2005.
- [40] Brüel & Kjær, “Non-Stationary STSF”. Site B&K, <http://www.bksv.com/pdf/Bp1726.pdf>
- [41] Emiel T, Hans-Elias B et Steltenpool S, “Scan & Paint: a novel sound visualization technique”.
- [42] Wang H., Li H., Li M., Li Z., & Li J., “Robotic Sound Power Level Measurement System for HVAC Systems”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70, 1-11, (2020).
- [43] Yang L., Chen Y., Chen G., & Zhang H., “A Robotic Platform for Sound Power and Sound Intensity Measurements in Open Spaces”, Applied Sciences, 11(6), 2816, (2021).
- [44] M. Blazek et al. “Sound Mapping in Urban Environment Using a Scanning Microphone System”. Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2014), 2014, pp. 1601-1612.
- [45] Mansouri et al. “Experimental Study on Sound Power Mapping of a Vibrating Machine Using a Scanning Microphone and a Robot”. Applied Sciences, vol. 8, no. 11, 2018, p. 2276.
- [46] ISO 3745:2012(en) Acoustics— Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure : <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:3745:ed-3:v1:en>
- [47] ISO 3740:2019(en) Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources — Guidelines for the use of basic standards
- [48] Du L., Zhang R. & Wang X. “Overview of two-stage object detection algorithms”. Journal of Physics: Conference Series, (2020).
- [49] Girshick R., Donahue J., Darrell T. & Malik J. “Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation”. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 580–587, (2014).
- [50] Girshick R. “Fast R-CNN”. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, pp. 1440–1448, (2015).
- [51] Ren S., He K., Girshick R. et Sun J. “Faster R-CNN: Towards real time abject detection with region proposal networks”. Dans Advances in neural information processing systems, 91-99, (2015).

- [52] Redmon J., Divvala S., Girshick R. & Farhadi A. “You only look once : Unified, real-time object detection”. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, (2016).
- [53] Redmon J. & Farhadi A. “YOLO9000: better, faster, stronger”. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 7263–7271, (2017).
- [54] Redmon J. & Farhadi A. “Yolov3: An incremental improvement”. *arXiv preprint arXiv :1804.02767*. (2018).
- [55] Bochkovskiy A., Wang C.-Y. & Liao H.Y. M. “Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection”. *arXiv preprint arXiv :2004.10934*, (2020).
- [56] Jocher G., Chaurasia A. et al. “YOLOv5 SOTA Realtime Instance Segmentation” . (2021).
- [57] Ge Z., Liu S., Wang F., Li Z. & Sun J. “Yolox : Exceeding yolo series in 2021”. *arXiv preprint arXiv :2107.08430*, (2021).
- [58] Li C., Li L., Jiang H., Weng K., Geng Y., Ke Z., Li Q., Cheng M., Nie W. et al. “YOLOv6 : A single-stage object detection framework for industrial applications”. *arXiv preprint arXiv :2209.02976*, (2022).
- [59] Wang C.-Y., Bochkovskiy A. & Liao H.-Y. M. “YOLOv7 : Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors”. *arXiv preprint arXiv :2207.02696*, (2022).
- [60] L, C., Li L., Geng Y., Jiang H., Cheng M., Zhang B., Ke Z., Xu X. & Chu X. “YOLOv6 v3.0:A Full-Scale Reloading”. *arXiv preprint arXiv :2301.05586*, (2023).
- [61] Soumava D., “A guide to the object detection exercise using YOLO model”, Published in Analytics Vidhya, (2020) : <https://medium.com/analytics-vidhya/a-guide-to-the-object-detection-exercise-using-yolo-model-c551f65df637>
- [62] Gwonseon-ro, Suwon-si, and HGyenonggi-do. “Doosan robotics”. External Basic Training Robotics, 2021.
- [63] Doosan Robotics, External_Basic_Training_Doosan Robotics_Eng_2021_May
- [64] Doosan Robotics, Manuels d'utilisation et spécifications techniques des bras robotiques Doosan, Documentation officielle : <https://www.doosanrobotics.com/>
- [65] OnRobot_User_Manual_For_Doosan_Robots_Quick_Changer_2FG7_v1.15.1_2020
- [66] Système de vision robotique | La vision artificielle pour l'automatisation de la détection et du tri. (s. d.). OnRobot. <https://onrobot.com/fr/produits/onrobot-eyes>

- [67] RoboDK. (s. d.). Simulateur de robots industriels et programmation-hors ligne - RoboDK. <https://robodk.com/fr/>
- [68] Siemens PLM Software : A guide to measuring sound power; An overview of international standards : <https://plmsisw.my.salesforce.com/sfc/p/#300000006woe/a/40000000XrQK/DdtaWd32Gc vT0fG772cc7VyzZqAAVrm.fbJYpjjpLL4>
- [69] Type 4189-A-021 1/2-inch Free-field Microphone | Brüel & Kjær. (s. d.). Brüel & Kjær | B&K Sound and Vibration <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/microphones/microphone-set/4189-a-021>
- [70] Module Générateur | LAN-XI Type 3160 | Brüel & Kjær. (s. d.). Brüel & Kjær | B&K | Sound and Vibration. <https://www.bksv.com/fr/instruments/daq-data-acquisition/lan-xi-daq-system/daq-modules/type-3160>
- [71] BK Connect - Logiciel d'Analyses | Brüel & Kjær. (s. d.). Brüel & Kjær | B&K | Sound and Vibration. <https://www.bksv.com/fr/analysis-software/data-acquisition-software/bk-connect>
- [72] Zoumana Keita, YOLO Object Detection Explained, Understand YOLO object detection, its benefits, how it has evolved over the last couple of years and some real-life applications, 2022. <https://www.datacamp.com/blog/yolo-object-detection-explained>
- [73] Rafael P., Lima N., Eduardo A. B. da Silva, “A Survey on Performance Metrics for Object-Detection Algorithms”, International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2020.
- [74] Ajayi G., John A., Guda B., “Performance evaluation of YOLO v5 model for automatic crop and weed classification on UAV images”, Smart Agricultural Technology, vol 5,2023.
- [75] Tiago C., Raul M., Thiago N., Pedro P.et Rebouças F., “Performance Analysis of Google Colaboratory as a Tool for Accelerating Deep Learning Applications” IEEE Access, PP(99),2018.

