

**Titre:** Conception d'un robot mobile semi-autonome pour la prise de  
Title: mesures acoustiques dans les bâtiments

**Auteur:** Émile Gagnon  
Author:

**Date:** 2024

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Gagnon, É. (2024). Conception d'un robot mobile semi-autonome pour la prise de  
Citation: mesures acoustiques dans les bâtiments [Mémoire de maîtrise, Polytechnique  
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/59195/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/59195/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:** Lionel Birglen  
Advisors:

**Programme:** Génie mécanique  
Program:

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Conception d'un robot mobile semi-autonome pour la prise de mesures  
acoustiques dans les bâtiments**

**ÉMILE GAGNON**

Département de génie mécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*  
Génie mécanique

Août 2024

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Conception d'un robot mobile semi-autonome pour la prise de mesures  
acoustiques dans les bâtiments**

présenté par **Émile GAGNON**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*  
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

**Giovanni BELTRAME**, président

**Lionel BIRGLEN**, membre et directeur de recherche

**Jean-Philippe ROBERGE**, membre

## REMERCIEMENTS

Merci à Lionel Birglen, mon directeur de recherche, pour son aide et ses conseils tout au long du projet, ainsi que pour la rédaction de l'article.

Merci à Gabriel Leroux et Nicolas Lévêque, ainsi qu'aux autres membres de l'équipe de MJM conseillers en acoustique pour leur expertise dans leur domaine ainsi que pour leur disponibilité tout au long du projet.

## RÉSUMÉ

La prise de mesures acoustiques est une tâche importante lors de la construction d'un bâtiment afin de s'assurer que le bâtiment en question respecte les normes voulues sur la transmission du bruit entre les différentes pièces. Ces mesures sont généralement très longues et répétitives, ce qui cause une perte de temps en d'efficacité pour les compagnies qui font ce type de mesures. De plus, la nature de cette tâche rend les mesures acoustiques sujettes aux erreurs humaines, ce qui peut avoir un impact sur les résultats obtenus. L'objectif de ce projet est donc de créer un robot semi-autonome capable de prendre des mesures acoustiques dans un bâtiment en construction, et ce avec l'aide de seulement un seul opérateur, alors que des mesures acoustiques doivent normalement être prises par au moins deux opérateurs.

Le robot aura deux modes de fonctionnement, soit un mode téléguidé où l'opérateur situé dans une autre pièce pourra contrôler le robot tout en manipulant l'équipement nécessaire et un mode autonome où le robot naviguera par lui-même aux endroits où il faut prendre une mesure. Le robot devra être en mesure de communiquer avec un sonomètre industriel afin de déclencher la prise de mesures et d'enregistrer les résultats. De plus, le robot devra être capable de fonctionner dans un environnement en construction, ce qui signifie ne pas avoir d'accès facile à internet, être sur des surfaces accidentées et avoir plusieurs obstacles potentiels sur son chemin. De plus, le robot devra être simple à utiliser pour les opérateurs et respecter un budget limité afin de permettre de couvrir les coûts des prises de mesures acoustiques.

La solution proposée est d'utiliser une plateforme robotique mobile à roues programmée avec le système d'exploitation ROS2 et équipée de différents capteurs tels qu'une centrale inertielle (IMU) avec un télémètre laser (LiDAR) pour la navigation autonome, ainsi que d'un routeur WiFi pour la communication avec l'opérateur. L'utilisation de ROS2 permettra également d'utiliser différentes bibliothèques logicielles pour faciliter la programmation d'un véhicule capable de naviguer de façon autonome.

## ABSTRACT

Conducting acoustic measurements is a critical task in building construction to ensure compliance with noise transmission standards between various rooms. These measurements are typically lengthy and repetitive, leading to inefficiencies and wasted time for companies performing this work. Furthermore, the nature of this task makes it prone to human errors, which can affect the accuracy of the results. Therefore, the objective of this project is to develop a semi-autonomous robot capable of taking acoustic measurements in a building under construction with the assistance of only one operator, whereas traditionally, at least two operators are required.

The robot will feature two operating modes: a remote-controlled mode, allowing an operator located in another room to control the robot and manage the necessary equipment, and an autonomous mode, where the robot will navigate independently to the locations where measurements need to be taken. In order to complete these tasks, the robot must be able to communicate with a sound level meter to initiate measurements and record results. Additionally, the robot must be capable of operating in a construction environment, which includes not having internet access, traversing rough surfaces, and encountering numerous potential obstacles. The robot must also be user-friendly for operators and cost-effective to reduce the expenses associated with acoustic measurements.

The proposed solution involves utilizing a wheeled mobile robotic platform programmed using the ROS2 operating system environment, equipped with various sensors such as an inertial measurement unit (IMU) and a laser imaging detection and ranging (LiDAR) instrument for autonomous navigation, as well as a WiFi router for communication with the operator. Employing ROS2 also enables the use of different software libraries to facilitate the programming of a vehicle capable of autonomous navigation.

## TABLE DES MATIÈRES

|   |      |
|---|------|
| REMERCIEMENTS . . . . .                         | iii  |
| RÉSUMÉ . . . . .                                | iv   |
| ABSTRACT . . . . .                              | v    |
| TABLE DES MATIÈRES . . . . .                    | vi   |
| LISTE DES TABLEAUX . . . . .                    | viii |
| LISTE DES FIGURES . . . . .                     | ix   |
| LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS . . . . .      | x    |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION . . . . .               | 1    |
| 1.1 Cadre et objectifs des travaux . . . . .    | 1    |
| 1.2 Plan du mémoire . . . . .                   | 3    |
| CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE . . . . .       | 4    |
| 2.1 Robots mobiles . . . . .                    | 4    |
| 2.2 Robots autonomes . . . . .                  | 4    |
| 2.2.1 SLAM . . . . .                            | 5    |
| 2.2.2 Navigation . . . . .                      | 6    |
| 2.3 Mesures acoustiques . . . . .               | 7    |
| CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE . . . . .               | 9    |
| 3.1 Systèmes de communication . . . . .         | 9    |
| 3.1.1 Communication avec l'opérateur . . . . .  | 9    |
| 3.1.2 Communication avec le sonomètre . . . . . | 11   |
| 3.2 Choix des composants . . . . .              | 13   |
| 3.2.1 Plateforme robotique . . . . .            | 14   |
| 3.2.2 Ordinateur embarqué . . . . .             | 14   |
| 3.2.3 Accessoires . . . . .                     | 16   |
| 3.3 Robot téléguidé . . . . .                   | 18   |
| 3.4 Robot autonome . . . . .                    | 18   |
| 3.4.1 Simulation . . . . .                      | 19   |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 3.4.2   | Application réelle . . . . .                  | 21 |
| CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : Semi Autonomous Ground Vehicle for Acoustic Data |   |    |
|   | Acquisition on Construction Sites . . . . .   | 24 |
| 4.1   | Introduction . . . . .                        | 24 |
| 4.2   | Robot Design . . . . .                        | 26 |
| 4.2.1   | Data Acquisition . . . . .                    | 26 |
| 4.2.2   | User Interface . . . . .                      | 28 |
| 4.2.3   | Remote Control . . . . .                      | 30 |
| 4.2.4   | Autonomous Navigation . . . . .               | 31 |
| 4.3   | Experiments . . . . .                         | 35 |
| 4.4   | Acknowledgements . . . . .                    | 40 |
| CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION . . . . .                            |   |    |
| 5.1   | Robot téléguidé . . . . .                     | 41 |
| 5.2   | Robot autonome . . . . .                      | 42 |
| CHAPITRE 6 CONCLUSION . . . . .   |   |    |
| 6.1   | Synthèse des travaux . . . . .                | 44 |
| 6.2   | Limitations de la solution proposée . . . . . | 44 |
| 6.3   | Améliorations futures . . . . .               | 45 |
| RÉFÉRENCES . . . . .  |   | 47 |

**LISTE DES TABLEAUX**

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tableau 4.1 | Hardware list of the proposed robotic vehicle . . . . .                | 29 |
| Tableau 4.2 | Duration in minutes required to complete the acoustic characterization | 38 |

## LISTE DES FIGURES

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figure 3.1  | Émetteur-récepteur radio HC12 . . . . .   | 10 |
| Figure 3.2  | Routeur WiFi TPlink AC1900 . . . . .  | 12 |
| Figure 3.3  | Sonomètre B&K type 2270 . . . . .   | 13 |
| Figure 3.4  | La plateforme robotique Mini de Roverrobotics . . . . .   | 15 |
| Figure 3.5  | Ordinateur NUC 7 de Intel avec unité de mesures inertielles attachée  | 16 |
| Figure 3.6  | L'IMU BNO055 et le LiDAR A2M8 . . . . .   | 17 |
| Figure 3.7  | Interface Foxglove avec la manette virtuelle . . . . .  | 19 |
| Figure 3.8  | Interface graphique du script python permettant de contrôler le robot   | 20 |
| Figure 3.9  | Le robot dans l'environnement de simulation Gazebo . . . . .  | 21 |
| Figure 3.10 | Visualisation du scan obtenu avec le LiDAR A2M8 dans Rviz2 . . . . .  | 22 |
| Figure 3.11 | Carte créée par le robot dans un laboratoire de Polytechnique Montréal  | 23 |
| Figure 4.1  | Typical construction environment that the robot needs to navigate for<br>measurements . . . . .   | 27 |
| Figure 4.2  | Proposed robotic platform. 1. Sound level meter, 2. USB camera, 3.<br>LiDAR, 4. Rover payload with embedded NUC computer, IMU, and<br>WiFi router, 5. Wheeled robot (Rover Robotics Mini) . . . . . | 28 |
| Figure 4.3  | Graphical User Interface (GUI) for the remote control of the vehicle .  | 30 |
| Figure 4.4  | Isometric view of the simulated robot in Rviz2 . . . . .  | 33 |
| Figure 4.5  | Example of the robot navigating in Rviz2 with the estimated map it<br>generated . . . . .   | 34 |
| Figure 4.6  | Overall vehicle and robotic workstation architecture . . . . .  | 34 |
| Figure 4.7  | Software architecture and ROS2 framework . . . . .  | 35 |
| Figure 4.8  | Example comparing the actual environment and the generated map<br>through SLAM . . . . .  | 36 |
| Figure 4.9  | Example of an ambient sound scan . . . . .  | 37 |
| Figure 4.10 | Airborne sound isolation test for a wall . . . . .  | 38 |
| Figure 4.11 | Airborne sound isolation test for a floor . . . . .   | 38 |
| Figure 4.12 | Impact sound isolation test for a floor . . . . .   | 39 |
| Figure 4.13 | Basement room used for testing . . . . .  | 39 |

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

|       |  |
|-------|--|
| UGV   | Unmanned Ground Vehicle                        |
| UAV   | Unmanned Aerial Vehicle                        |
| SLAM  | Simultaneous Localization and Mapping          |
| LiDAR | Light Detection and Ranging                    |
| IMU   | Inertial Motion Unit                           |
| ASTM  | American Society for Testing and Materials     |
| ISO   | International Organization for Standardization |
| SSH   | Secure Shell                                   |
| dBA   | A-weighted Decibel                             |
| ROS   | Robot Operating System                         |

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les travaux présentés ici ont comme objectif de concevoir un robot mobile facilitant la prise de données acoustiques dans un bâtiment. La prise de données acoustique est généralement faite lorsque les murs et les planchers d'un bâtiment sont terminés afin de tester leurs propriétés acoustiques, mais que la construction du bâtiment n'est pas complète, afin de pouvoir encore modifier quelque détails au cas où certains murs ou planchers ne soient pas conformes aux normes. Ces mesures peuvent aussi être réalisées dans des bâtiments déjà en utilisation lorsque les habitants ou les utilisateurs remarquent un problème. La prise des mesures nécessite normalement deux personnes, soit une pour manoeuvrer l'équipement qui génère du son, situé dans une pièce source et une deuxième équipé d'un sonomètre dans la ou les pièces réceptrices du son. Même dans une pièce unique, la mesure du son reçu est habituellement faite en de multiples endroits. Comme ces mesures sont souvent très longues et répétitives, une demande du secteur industriel existe concernant l'utilisation d'un robot mobile pour aider à la prise de celles-ci afin qu'elles ne demandent qu'un seul opérateur.

### 1.1 Cadre et objectifs des travaux

Ces travaux ont été réalisés en partenariat avec MJM conseillers en acoustique inc, qui ont fourni l'expertise en acoustique pour le projet ainsi que l'équipement nécessaire pour la prise de mesures. L'objectif final du projet est donc que les employés de MJM conseillers en acoustique inc puissent utiliser le robot dans leurs prises de données régulières. La conception acoustique est une partie importante de la conception et de la construction d'un bâtiment. Par exemple, cette étape permet de s'assurer que des résidents d'un immeuble n'entendront pas les voix de leurs voisins, ainsi que les pas de leurs voisins du dessus. La conception acoustique est également importante dans les écoles afin de s'assurer que le professeur puisse être bien entendu dans toute la classe, mais que les classes soient assez isolés pour qu'on n'entende pas ce qui se passe dans les classes adjacentes. L'acoustique d'un bâtiment est un point à considérer dans presque tous les types de bâtiments, des usines jusqu'aux tours à bureaux, en passant par des salles de réception et les amphithéâtres. MJM conseillers en acoustique se spécialisent dans la conception acoustique de bâtiments, en ayant réalisé de grands projets tels que le Centre Bell et le centre de recherche du CHUM. Une partie importante de la réalisation de ces projet consiste à visiter les lieux lorsque la construction du bâtiment est assez avancée afin de prendre des mesures acoustiques. Cette étape permet de vérifier l'acous-

tique du bâtiment et de corriger les erreurs s'il y a lieux. La prise de mesures acoustiques est également utile dans d'autres projets, tels que les projets où des spécialistes tels que MJM conseillers en acoustique sont appelés suite à des plaintes ou problèmes dans des bâtiments déjà construits afin de localiser la source du problème et de suggérer des solutions.

Considérant la nature de la tâche, certaines contraintes peuvent être établies. Le robot doit être capable de se déplacer dans un environnement non structuré et possiblement modérément accidenté puisque les bâtiments seront souvent encore en construction lors de la prise de mesures, ce qui peut engendrer certains obstacles ou des quantités non-négligeables de poussière. Ces obstacles peuvent être assez minimes, comme des fils électriques sur le plancher ou des fissures et des inégalités dans le béton du plancher. Il y aura aussi parfois des obstacles plus grands, comme de l'équipement de construction laissé sur le site par les travailleurs. Cependant, certains obstacles pourront poser des problèmes plus complexes, comme la présence d'escaliers ou même de trous dans les planchers. Ensuite, le robot doit être autonome ou semi-autonome afin de permettre à un seul utilisateur de contrôler le robot à partir d'une autre pièce que celle dans laquelle le robot est situé mais non pas à très longue distance. Le robot doit également être capable de communiquer avec l'opérateur et avec l'équipement nécessaire pour la prise de mesures, soit typiquement un sonomètre B&K type 2250 tel qu'utilisé par MJM.

Ensuite, il est possible d'établir différents objectifs pour afin de déterminer le taux de réussite du projet. Ces objectifs sont les suivants : diminuer les coûts de la prise de mesures acoustiques, augmenter l'efficacité de la prise de mesures, diminuer le risque pour les employés et limiter le potentiel d'erreurs humaines. Les deux premiers objectifs, soit de diminuer les coûts et d'augmenter l'efficacité, peuvent être également vus d'une autre manière, soit de diminuer le nombre de personnes nécessaires pour la prise de mesures. En effet, si une seule personne est nécessaire pour la prise de mesures avec le robot, pour un temps requis similaire, ceci diminue le coût global des mesures d'un facteur deux ou permet à l'autre personne qui devait auparavant prendre ces mesures de se concentrer sur d'autres tâches telles que la création du rapport technique qui se base sur les mesures acoustiques. Pour diminuer le risque pour les employés, malgré que ce risque soit déjà très faible lors des mesures, l'utilisation d'un robot réduit la possibilité d'être exposé à des sons très forts, au-delà de 105 dBA. Malgré l'utilisation d'équipement de protection adéquat, il est en effet préférable de simplement éviter l'exposition à ce risque. Finalement, puisque les mesures acoustiques sont souvent une tâche prenant beaucoup de temps et étant répétitive, il est possible pour un opérateur d'oublier un point de mesure dans une pièce, ou de faire une erreur lors de l'enregistrement des données.

L'utilisation d'un robot permet aussi de diminuer la probabilité de ces erreurs.

## 1.2 Plan du mémoire

Le chapitre suivant du mémoire présentera un bref état de l'art en robotique mobile et sur les robots autonomes, ainsi que sur les mesures acoustiques et l'utilisations de robots pour celles-ci. Le chapitre 3 contiendra la méthodologie des travaux réalisés suivi au chapitre 4 de l'article scientifique réalisé dans le cadre de ces travaux. Finalement, le chapitre 5 présentera d'autres résultats supplémentaires et une discussion sur l'ensemble des travaux réalisés, suivi d'une conclusion finale.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 Robots mobiles

Dans les dernières années, les avancées technologiques et la baisse des coûts des composants utilisés en robotique ont permis aux drones et aux robots mobiles d'être utilisés dans plusieurs nouveaux domaines. Ces drones ou véhicules sans pilote à bord, également connus sous le nom de UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) pour les drones et UGV (*Unmanned Ground Vehicle*) pour les robots mobiles ont en général comme fonction de remplacer les humains afin de compléter des tâches qui sont soit facilement automatisables ou dangereuses pour un être humain et demandent aussi de grands déplacements. Ces véhicules peuvent également permettre de simplifier certaines tâches parfois complexes pour un être humain, mais plus simples pour un robot spécialisé. Par exemple, les drones peuvent être utilisés pour effectuer l'inspection ou la maintenance de structures difficiles d'accès [1], [2], [3], [4] ou même pour le transport de produits dans des zones difficiles d'accès comme le transport d'équipement médicaux en zones éloignées [5]. Pour les robots mobiles terrestres, ils peuvent être utilisés dans le transport d'objets dans les bâtiments tels que des hôpitaux ou des entrepôts, ou même dans la maintenance des routes [6]. Puisque la principale caractéristique de ces véhicules, autant pour les drones que les robots mobiles, est qu'il n'y a pas de pilote à bord, il existe principalement deux méthodes pour les contrôler. Soit de piloter le véhicule à distance ou d'utiliser des méthodes de conduite autonome.

### 2.2 Robots autonomes

Les véhicules autonomes ont été grandement popularisés dans les dernières années, particulièrement dû à l'introduction de voitures complètement ou partiellement autonomes sur les routes. La conception d'un véhicule autonome est une tâche complexe, qui peut être divisée en différentes sous-catégories afin de simplifier le problème. La première étape est de créer une carte de l'environnement du véhicule, une opération qui est souvent désignée sous le nom de *mapping* en anglais. Ensuite, le véhicule doit être capable de reconnaître à quel endroit il se situe dans cette carte, ce qui constitue l'opération de localisation. Finalement, Le véhicule doit déterminer le meilleur chemin afin de se rendre à son objectif et le suivre, une étape appelée la navigation. De plus, la grande majorité des véhicules autonomes doivent répéter ces trois étapes en continu au fur et à mesure du trajet afin de détecter de nouveaux

obstacles qui peuvent s'ajouter et replanifier le trajet en conséquence. Les deux premières étapes, soit le *mapping* et la localisation, sont généralement faites en même temps et appelées SLAM pour *Simultaneous Localization and Mapping*. Le problème de SLAM constitue donc à créer une carte de l'environnement du véhicule tout en connaissant la position du véhicule dans cette carte tout au long de l'opération. Ce problème peut être résolu par différentes techniques [7], [8] et nécessite généralement l'ajout de plusieurs capteurs au véhicule.

### 2.2.1 SLAM

Afin de pouvoir cartographier son environnement, le véhicule a besoin d'un capteur permettant de détecter les objets qui l'entourent. Les deux capteurs les plus communs pour cela sont les caméras 3D ou *depth cameras* et les capteurs LiDAR (*Light Detection And Ranging*). Ces deux méthodes permettent d'obtenir l'information nécessaire pour détecter les obstacles et créer une carte de l'environnement. Les senseurs LiDAR sont des senseurs qui utilisent la lumière réfléchi par les objet afin de pouvoir les détecter. Plusieurs types de senseurs LiDAR existent, mais le type de LiDAR utilisé pour ce projet serait un LiDAR 2D, qui permet de détecter tous les objets dans un plan défini. Le principe de fonctionnement d'un LiDAR est qu'il envoie premièrement de la lumière grâce à un émetteur laser. Ensuite, cette lumière va soit continuer son chemin si il n'y a aucun objet à détecter, ou être réfléchi par un objet dans son chemin. la lumière réfléchi va revenir vers le LiDAR, qui pourra détecter l'arrivée le laser avec un capteur. Afin de déterminer la distance, il suffit de mesurer le temps entre l'émission du laser et la détection du laser à son retour pour pouvoir calculer la distance. Ensuite, afin de détecter des objets dans un plan en deux dimensions, les senseurs LiDAR vont simplement tourner sur eux même à haute vitesse, permettant de faire rapidement plusieurs détections dans différentes directions. De l'autre côté, les *depth cameras* ou caméras de profondeur sont des caméras qui permettent de percevoir en trois dimensions, contrairement aux deux dimensions des caméras traditionnelles. Comme pour les senseurs LiDAR, il existe plusieurs types de caméras de profondeur, mais celui qui est le plus couramment utilisé pour les véhicules autonomes est les *stereo depth cameras*. Ces caméras ont un fonctionnement qui se base sur les yeux des êtres humains pour permettre de détecter la profondeur. En effet, deux caméras régulières distinctes sont positionnés aux extrémités du senseur, ce qui leur permet de voir la même image, mais avec de légères différences dues à la différence de position entre les deux caméras. En détectant le même point dans les deux images, il est ensuite possible de calculer la distance de ce point sachant la distance entre les deux caméras. Contrairement aux LiDAR qui offre donc un scan complet d'un plan en deux dimensions, les caméras de profondeur vont fournir un nuage de tous les points détectés en trois dimensions dans la directions vers

laquelle la caméra est dirigée.

Le problème de la localisation est plus complexe et peut être résolu de différentes manières. Les solutions peuvent être séparées en solutions utilisant les composants internes du robot et celles utilisant des capteurs externes. La solution interne consiste normalement à utiliser l'odométrie des roues du véhicule, soit la mesure du mouvement des roues, en combinaison avec une mesure de l'accélération du véhicule qui est généralement donnée par un IMU (*Inertial Motion Unit*). Ces deux mesures peuvent être combinées en utilisation des techniques de fusion de capteurs dont la plus populaire repose sur le filtre de Kalman [7], [9]. Cette technique est généralement la plus simple et une des moins dispendieuses, ce qui fait qu'elle est souvent utilisée pour les applications qui ne demandent pas une précision extrême ou d'autres contraintes particulières. Les techniques externes au véhicules peuvent prendre plusieurs différentes formes. Certaines se basent sur la détection de certains points dans l'environnement du véhicule et calculent la position du véhicule à partir de ces points de référence [9] ou sur l'utilisation de caméras 3D pour détecter les objets environnants [10], [11]. D'autres techniques utilisent des méthodes sonores, comme des ultrasons [12] ou même des véhicules équipés de plusieurs micros afin de détecter la direction et la distance d'arrivée d'un signal sonore [13].

### 2.2.2 Navigation

Plusieurs techniques de navigation permettent de trouver le chemin optimal permettant au véhicule de se rendre au point désiré. Le choix de la technique à utiliser dépendra donc des contraintes imposées lors de l'utilisation du véhicule. Une des méthodes classiques est la méthode des champs de potentiel, où l'objectif est décrit par un potentiel attractif et les obstacles détectés sont représentés par des potentiels répulsifs. Cette méthode est cependant susceptible aux erreurs alors que le véhicule peut rester piégé dans un minimum local du champ de potentiel. Il existe cependant différent moyen de modifier cette méthode afin de contourner ce problème [14], [15]. Il est ensuite possible d'optimiser le chemin obtenu jusqu'à l'objectif avec certaines techniques comme celle de la bande élastique, qui déforme le chemin obtenu pour s'assurer qu'il passe par le chemin le plus court tout en continuant d'éviter les obstacles. Cette technique peut également être adaptée afin de prendre en compte les limitations spécifiques au véhicule utilisé [16]. Finalement, certains véhicules sont soumis à d'autres contraintes supplémentaires, tels que les véhicules qui vont circuler sur le système routier. Ces véhicules doivent donc non seulement éviter les obstacles, planifier une trajectoire jusqu'à leur objectif, mais également prendre en compte les règlements de la circulation

(panneaux, lumières ou lignes au sol). De plus, ces règlements peuvent également varier selon la situation [17]. Par exemple, le véhicule doit agir différemment lorsqu'il circule dans sa voie sur une route que lorsqu'il est dans un espace de stationnement et qu'il n'y a aucune ligne au sol. Afin d'implémenter facilement la navigation sur différents véhicules autonomes, la librairie Nav2 [18], [19], [20], [21] permet d'utiliser différentes techniques de navigation dans différentes situations et avec plusieurs véhicules. Le problème de navigation est principalement séparé en 4 tâches différentes qui sont résolues par 4 serveurs différents. Le premier est le *planner*, qui consiste à calculer un chemin à partir de la position actuelle du robot et de la carte générée par le SLAM. Il est possible de configurer pour différents objectifs, tels qu'obtenir le chemin le plus court, ou le chemin passant le plus loin possible des obstacles. Le deuxième est le *controller*, qui envoie les commandes au véhicule afin de le conduire sur le chemin calculé par le planificateur. Le troisième est le *behavior*, qui contient tous les systèmes de gestion des problèmes. Par exemple, ce serveur peut décider d'effacer une partie de la carte actuelle si la carte présente des signes d'anomalies qui empêchent le véhicule de suivre le chemin. Finalement, le dernier est le *smoother*, qui s'occupe de l'optimisation de chemin. Autant pour obtenir un meilleur chemin, mais également pour mieux adapter le chemin aux caractéristiques physiques du robot afin qu'il soit plus facile à suivre pour le véhicule. Par exemple, si le *planner* a suggéré qu'un virage à angle droit est le chemin le plus direct, le *smoother* pourrait modifier la trajectoire afin d'obtenir un virage plus doux pour le robot qui serait finalement plus efficace, puisque le robot n'aurait pas à s'arrêter pour effectuer le virage sec à angle droit.

### 2.3 Mesures acoustiques

La prise de mesure acoustiques pour caractériser l'acoustique d'une pièce se doit de respecter certaines normes très précises. Les organisations ASTM et ISO ont chacune développé leurs propres normes permettant de réaliser des mesures acoustiques strictes pour différents scénarios [22], tels que les bruits d'impact d'une pièce à l'autre, le temps de réverbération du bruit dans une pièce, le bruit ambiant d'une pièce et plusieurs autres scénarios. Ces normes imposent plusieurs contraintes telles que la hauteur du micro et la distance minimale entre le micro et un mur lors de la prise de mesures, afin d'assurer une constance entre chacune des mesures. Les normes utilisées dans ce cas seront les normes ASTM E336 - 23 sur la transmission et l'atténuation de bruits aériens [23], ainsi que ASTM E1007 - 21 sur la transmission de bruits d'impact dans les planchers [24]

L'utilisation de robots mobile dans le domaine de l'acoustique est une pratique qui com-

mence à prendre de la popularité dans les dernières années. Certains robots mobiles ont déjà été conçus pour faciliter différentes tâches en acoustique, comme un robot permettant de visualiser les paramètres acoustiques d'une pièce grâce à l'algorithme SLAM du robot [25]. En téléguidant ce robot à travers une pièce dans laquelle un haut-parleur a été installé, le robot peut être déplacé afin de prendre des mesures à différents endroits. Lors de la prise des mesures, ce robot cartographie la pièce avec l'algorithme SLAM, ce qui permet ensuite de créer une carte visuelle de l'acoustique de la pièce. Un autre robot a été créé pour permettre de plus facilement caractériser une chambre anéchoïque [26]. Ce robot avait pour objectif de se déplacer de façon autonome dans une chambre anéchoïque afin de mieux caractériser des haut-parleurs ou autre équipement qui était testé dans cette chambre. Cependant, malgré que ces deux projets soient similaires à ce travail, la littérature ne montre pas de robot permettant de prendre des mesures acoustiques dans un environnement généralement inconnu. Le véhicule présenté ici devra majoritairement fonctionner dans des environnements qui n'ont pas été visités auparavant et qui peuvent présenter plusieurs défis pour un véhicule autonome, tel qu'un manque d'accès à l'internet ainsi que différents obstacles dus à l'environnement en construction. De plus, ce véhicule devra également respecter des normes strictes afin de pouvoir être utilisé dans les opérations de MJM conseillers en acoustique.

## CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

### 3.1 Systèmes de communication

Une des premières étapes de ce projet a été de déterminer quelles méthodes de communication devront être utilisées sur le robot entre ses différents composants, puisque le choix de ces méthodes seront considérés lors du choix des-dits composants. L'ordinateur du robot devra communiquer avec au minimum deux composants externes au robot, imposés par notre partenaire industriel, soit le sonomètre et l'ordinateur de l'opérateur.

#### 3.1.1 Communication avec l'opérateur

Afin de communiquer avec l'opérateur, l'environnement d'utilisation du robot présente l'obstacle principal, soit le fait que le robot sera souvent utilisé dans une pièce différente que celle de l'ordinateur de l'opérateur. Dans la grande majorité des cas, le robot sera utilisé dans une pièce adjacente à celle de l'utilisateur soit sur un autre étage. De plus, puisque les mesures sont souvent prises dans de grands bâtiments, il est très possible qu'il y ait une couche de béton entre les étages, ce qui pose un problème pour plusieurs modes de communication sans fil. Trois modes de communication sans fil ont été étudiés afin de déterminer la meilleure solution pour ce projet.

#### Connection au réseau cellulaire

La première option considérée a été de connecter le robot au réseau cellulaire afin qu'il ait un accès à internet. Cette méthode de connection à internet était la seule option viable puisque la majorité des bâtiments dans lesquels les mesures sont prises ne sont pas complétés, donc n'ont pas encore de réseau WiFi installé. Cependant, cette méthode a été rapidement écartée pour deux raisons. Premièrement, la connection au réseau cellulaire nécessite un abonnement mensuel qui est assez dispendieux, et un des objectifs de ce projet est de diminuer le coût des mesures acoustiques, donc de limiter les coûts de la conception et de l'utilisation du robot. Deuxièmement, Malgré que le réseau cellulaire puisse passer dans la majorité des cas à travers une épaisse couche de béton, il arrive parfois de perdre la connection au réseau dans certains cas, comme dans le sous sol d'un bâtiment ou une salle complètement entourée de béton.

## Communication radio

La deuxième option considérée est d'utiliser des émetteurs-récepteurs radios afin de communiquer entre les deux ordinateurs. Afin de tester cette méthode, deux émetteurs-récepteurs radio HC12 présentés à la figure 3.1, connectés avec des convertisseurs USB CP2102 ont été utilisés. L'utilisation des deux radios a permis d'envoyer des commandes d'un ordinateur à l'autre, et ce à travers un ou même deux étages d'un bâtiment avec des planchers en béton épais. Afin de permettre d'utiliser le robot de façon téléguidée, un vidéo en temps réel a aussi pu être envoyé, mais cette méthode a donné un certain délai pour la réception du vidéo. Ce délai aurait pu être réduit en utilisant des instruments radios plus performantes et en optimisant le code utilisé pour l'envoi et la réception du vidéo. Une autre possibilité est d'utiliser un système de retour vidéo souvent utilisé pour le pilotage en immersion (*First-Person View*) des drones mais cette méthode a également été écartée dû à son coût relativement élevé. De plus, la communication avec le sonomètre requiert un travail considérable pour adapter les équipements usuels des drones comme les contrôleurs de vol aux besoins de notre projet.

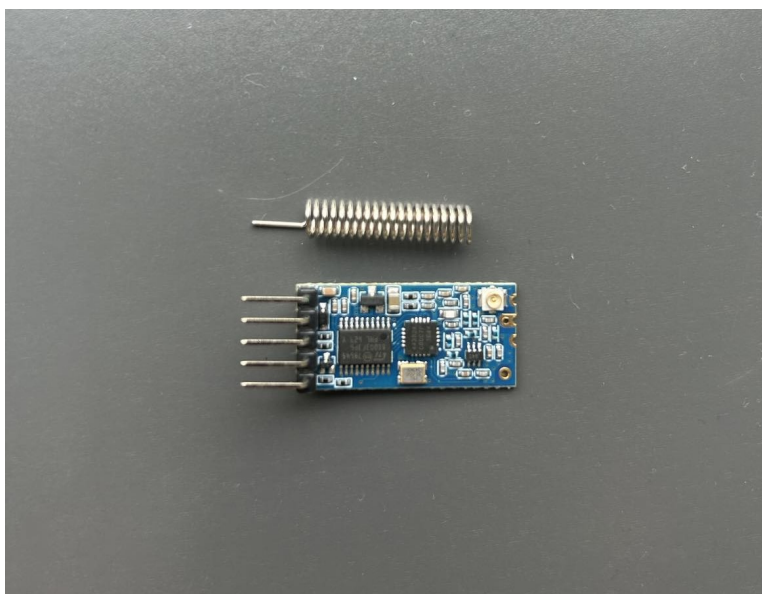


FIGURE 3.1 Émetteur-récepteur radio HC12

## Réseau WiFi local

La troisième option, qui est celle qui a été utilisée pour le projet, est d'installer un router WiFi sur le robot afin de créer un réseau WiFi local sans connection à internet. En utilisant un router wifi particulièrement adapté aux longues distances, il est facilement possible de se

connecter au robot à travers 2 étages d'un bâtiment avec des planchers de béton. De plus, l'accès au protocole de communication du réseau WiFi permet d'utiliser plusieurs autres ressources, tel que l'utilisation du protocole de communication SSH (*Secure Shell*). Ce protocole permet d'envoyer des commandes à l'ordinateur embarqué du robot qui permettront de démarrer le robot, ainsi que commencer le SLAM et la navigation. L'utilisation d'un réseau WiFi permet également d'utiliser le logiciel Foxglove afin de contrôler le robot, ce qui sera détaillé dans la section du choix des composants. De plus, le réseau WiFi facilitera de beaucoup la communication avec le sonomètre. En particulier, il est impossible de se connecter directement au sonomètre avec un ordinateur qui n'utilise pas un système d'exploitation Windows.

Une fois que la décision prise d'utiliser un réseau WiFi local créé par le robot, il reste encore à choisir quel routeur WiFi sera utilisé pour le projet. La contrainte principale sera qu'il faut un routeur avec un signal puissant afin de permettre à l'ordinateur de l'opérateur de se connecter au robot à travers une épaisseur substantielle de béton. Le routeur choisi a donc été le TPlink AC1900, présenté dans la figure 3.2, puisqu'il donne une excellente puissance de signal sans avoir trop des fonctionnalités souvent offertes avec les routeurs haut de gamme (et donc un coût élevé) qui ne sont pas utiles pour ce projet.

### 3.1.2 Communication avec le sonomètre

Afin de pouvoir réaliser les mesures acoustiques, le robot doit être capable de communiquer avec le sonomètre B&K type 2270, présenté à la figure 3.3, qui est utilisé par MJM conseillers en acoustique inc. Ce sonomètre permet de prendre des mesures de différentes manières, soit avec un écran tactile sur le sonomètre, à travers une application ou à travers une page web. La première méthode considérée a été d'utiliser l'application fournie avec le sonomètre, puisqu'elle permet de facilement déclencher des mesures et de les enregistrer dans le sonomètre pour être analysées par la suite. Cependant, cette application n'est disponible que sur un ordinateur fonctionnant avec un système d'exploitation Windows. Ceci cause un problème puisque la plupart de ordinateurs utilisés pour l'opération des robots mobiles reposent sur Ubuntu (un système d'exploitation basé sur linux). Dans notre projet, nous avons décidé d'utiliser ROS2 pour contrôler notre robot et même si ce dernier logiciel peut fonctionner sur Windows son système d'exploitation de prédilection est Ubuntu. ROS2, ou *Robot Operating System* est un logiciel source qui permettra de conduire le robot et facilitera grandement plusieurs autres tâches, comme l'ajout des senseurs, le contrôle téléguidé du robot et la navigation autonome. Ceci nous pousse donc à passer par la page web afin de contrôler le sonomètre.



FIGURE 3.2 Routeur WiFi TPlink AC1900

Afin d'utiliser la page web créée par le sonomètre, il faut premièrement connecter ce dernier à un réseau WiFi, soit par câble ou sans fil. Dans notre cas, comme le sonomètre ainsi que le routeur WiFi seront installés sur le robot, il sera plus simple de connecter le sonomètre avec un câble Ethernet. Une fois que le sonomètre est connecté au même réseau qu'un ordinateur, il suffit d'entrer l'adresse IP du sonomètre afin d'accéder à sa page web. Ceci est possible peu importe si le réseau WiFi a un accès à l'internet ou non. La page web du sonomètre offre deux options, une option *Guest* qui permet d'avoir une vue de l'écran tactile du sonomètre sans pouvoir interagir avec et une option *Admin* qui permet d'avoir une vue de l'écran tactile et une fenêtre représentant les boutons physiques sur le sonomètre. Cette option permet également d'utiliser toutes les fonctions des boutons et de l'écran tactile qui sont normalement



FIGURE 3.3 Sonomètre B&K type 2270

offertes directement sur le sonomètre, mais nécessite une identification pour y accéder. Afin de permettre au robot d'accéder à ces commandes, un script python a été écrit en utilisant la librairie Selenium pour permettre d'automatiser la navigation web. Le script permet donc de se connecter à la page du sonomètre, de s'identifier afin d'accéder à la page administrateur et ensuite d'utiliser les commandes du sonomètre pour commencer une mesure, attendre les 20 secondes nécessaires pour la mesure, enregistrer la mesure dans la mémoire du sonomètre et finalement préparer la prochaine mesure du sonomètre.

### 3.2 Choix des composants

En plus de choisir les méthodes de communication à utiliser, les différents composants du robots ont également été sélectionnés. Ces composants peuvent être divisés dans les catégories

suivantes : la plateforme robotique, l'ordinateur embarqué et les accessoires du robot.

### 3.2.1 Plateforme robotique

Afin de choisir une plateforme robotique, plusieurs contraintes ont été établies. Premièrement, la plateforme doit être silencieuse lorsqu'elle n'est pas en mouvement afin de ne pas influencer les mesures acoustiques. La plateforme doit aussi respecter le budget alloué, ce qui constitue une contrainte importante considérant que la plateforme robotique utilisera probablement la majorité du budget. La plateforme doit également être capable de fonctionner dans l'environnement de la prise de mesures, ce qui signifie avoir une bonne durée de vie, être capable de fonctionner dans un environnement légèrement accidenté et être résistante à la poussière. De plus, la plateforme doit être facile à modifier, afin de pouvoir y ajouter les accessoires voulus ainsi que le sonomètre. En combinant tous ces critères, trois plateformes ont été identifiées, soit le RosBot XL de Husarion, le TurtleBot de Clearpath Robotics et le Rover Mini de Roverrobotics. Après avoir considéré les trois plateformes, le Rover Mini, présenté à la figure 3.4 a été la plateforme sélectionnée, notamment parce que cette plateforme est construite avec des moteurs silencieux qui émettent un minimum de bruit, en plus de remplir toutes les autres exigences établies précédemment.

### 3.2.2 Ordinateur embarqué

Une fois la plateforme sélectionnée, il reste à déterminer quel ordinateur ainsi que quel logiciel seront utilisés pour le contrôle du robot. Comme mentionné précédemment, le logiciel qui sera utilisé pour contrôler le robot est ROS2, qui est un logiciel gratuit et source ouverte, permettant non seulement de contrôler le robot avec une manette ou un ordinateur, mais également de commander le robot à distance, d'intégrer différents capteurs, de rendre le robot autonome et de le tester dans un environnement de simulation. ROS2 fonctionne en créant différents objets ayant chacun des caractéristiques précises, comme les *nodes*, les *topics*, les *services* et les *actions*. Les *nodes* sont responsables de une partie du robot, comme le contrôle des roues ou les données d'un senseur. Les *topics* permettent à différentes *nodes* de publier des messages sur le *topic*, alors que d'autres *nodes* peuvent s'abonner à ce *topic* pour voir tous les messages qui y sont publiés. Les *services* sont un autre mode de communication entre les *nodes* où une *node* peut soumettre une demande à une autre et attendre la réponse. Finalement, les *actions* sont utiles pour les tâches plus complexes. Lorsqu'une *node* démarre une *action*, l'autre *node* qui effectue cette action enverra des messages au fur et à mesure sur



FIGURE 3.4 La plateforme robotique Mini de Roverrobotics

l'avancement de la tâche et enverra également un rapport contenant le résultat final de la tâche. Un important avantage de ROS2 est que dans plusieurs cas, les compagnies fabriquant des plateformes robotiques fournissent également des fichiers ROS2 afin de pouvoir facilement contrôler leurs robots, ce qui est le cas de Rover Robotics. Malgré que les dernières versions de ROS2 sont compatibles avec Windows, la majorité du développement fait en source ouverte est encore uniquement compatible avec Linux donc avec Ubuntu. D'ailleurs, les fichiers créés par Rover Robotics pour contrôler le Rover Mini sont seulement compatibles avec Linux. Il est donc nécessaire d'avoir un ordinateur permettant d'installer un système d'opération tel que Ubuntu afin d'utiliser ROS2. Cependant, il faut également un ordinateur capable de se connecter au réseau WiFi du robot et d'accéder à la page web du sonomètre, donc un ordinateur capable d'avoir accès à un navigateur internet tel que Google Chrome ou Firefox. L'ordinateur choisi est un NUC 7 de Intel, présenté à la figure 3.5, qui permet de remplir toutes ces contraintes tout en restant compact et silencieux.

Afin que le robot puisse réussir tous les objectifs établis, d'autres logiciels complémentaires à ROS2 ont dû être utilisés. Le premier de ces logiciels est Foxglove Studio, qui est installé sur l'ordinateur de l'opérateur du robot afin de pouvoir téléguider le robot. Ce logiciel permet



FIGURE 3.5 Ordinateur NUC 7 de Intel avec unité de mesures inertielle attachée

de fonctionner avec ROS2 afin d'envoyer des commandes au robot et de recevoir un vidéo en temps réel du robot pour le contrôle à distance. Un autre logiciel utilisé est le logiciel de simulation robotique Gazebo, qui a été utilisé surtout afin de rendre le robot semi-autonome de manière sécuritaire, c'est-à-dire afin de tester le plus de scénarios possibles avant de passer au robot réel.

### 3.2.3 Accessoires

Afin d'avoir un robot téléguidé ou un robot autonome, il est nécessaire d'ajouter certains accessoires à la plateforme robotique pour permettre au robot de naviguer son environnement. Pour la partie téléguidée du robot, il a suffit d'ajouter une caméra USB montée à l'avant du

robot. Par contre, pour la partie autonome, il faut au minimum généralement deux accessoires : un permettant de calculer la position du robot et un autre permettant de détecter les obstacles et l'environnement. Une solution efficace et peu dispendieuse pour ces deux problèmes est d'ajouter une centrale inertielle (IMU) ainsi qu'un LIDAR au robot. L'IMU permet de mesurer l'accélération du robot afin de calculer sa position relative à sa position de départ, alors que le LIDAR détecte les objets autour du robot, permettant de créer une carte des alentours du robot. Les capteurs sélectionnés sont l'IMU BNO055 de Bosch et le LiDAR RPLidar A2M8 de Slamtec qui sont présentés à la figure 3.6. Ces capteurs ont été choisis parce qu'ils sont compatibles avec ROS2 et remplissent également les critères de performance voulus. Cependant, le choix d'utiliser un LiDAR 2D tel que le RPlidar A2M8 ne permettra pas de détecter la totalité des obstacles qui peuvent être présents pour le robot. En effet, certains obstacles peuvent passer en dessous ou au dessus du plan de détection du LiDAR. Par exemple, le LiDAR peut détecter les pattes d'une table, mais ne pas voir le dessus de la table qui pourrait bloquer le chemin du robot. Aussi, un objet bas ou des trous dans le plancher, comme une marche d'escalier descendante, ne sera pas détectée par le robot. Cela impose des restrictions sur le type de sites avec lesquels le robot peut être utilisé ou une préparation préalable de ceux-ci.



FIGURE 3.6 L'IMU BNO055 et le LiDAR A2M8

### 3.3 Robot téléguidé

Une fois que toutes les pièces nécessaires pour le robot sont sélectionnées, la première partie est faire fonctionner le robot de façon téléguidée. Cette méthode permettra de premièrement tester le robot sur des chantiers de construction en prenant des données acoustiques et sera également utile pour préparer la version autonome du robot. Une fois que l'ordinateur est fixé sur la plateforme robotique et que les fichiers ROS2 fournis pour contrôler le robot sont installés, il faut maintenant être capable de démarrer le robot à distance, puis envoyer des commandes par ROS2 afin de le contrôler. Comme mentionné précédemment, grâce au réseau WiFi il est possible de se connecter à l'ordinateur embarqué du robot et d'exécuter des commandes dans le terminal grâce à une connection SSH. Afin de simplifier cette connection, un script python incluant une interface graphique a été créé sur l'ordinateur de l'opérateur afin d'interagir facilement avec le robot. Ce même script sera celui qui sera utilisé pour toute communication avec le robot, ainsi que pour la version autonome. Ce script utilise la librairie paramiko de Python permettant de créer une interface SSH avec un autre ordinateur. Cette interface permet donc d'envoyer à distance au robot les commandes nécessaires pour démarrer ROS2.

Ensuite, malgré qu'il soit possible d'envoyer des commandes pour contrôler le robot par SSH, cette méthode est loin d'être optimale. Le logiciel Foxglove permet d'avoir une vidéo de la caméra du robot en temps réel en recevant les messages sur le *topic* ROS de la caméra, en plus de pouvoir contrôler facilement le robot avec une interface sous forme de manette virtuelle qui envoie directement les commandes sous forme de message ROS2 sur le *topic* `cmd\_vel` du robot. L'interface Foxglove avec la manette virtuelle est présentée à la figure 3.7. Ce faisant, il est possible de contrôler le robot à distance, il reste seulement à pouvoir déclencher à distance des mesures sur le sonomètre. Afin d'y parvenir, le script python sur l'ordinateur de contrôle a été complété afin d'ajouter une option à l'interface graphique permettant de déclencher un autre script sur l'ordinateur du robot qui complète une mesure acoustique par l'entremise de la page web du sonomètre. L'interface de contrôle du robot est présentée à la figure 3.8.

### 3.4 Robot autonome

Finalement, la dernière partie de ce projet est de modifier le robot afin qu'il puisse prendre des mesures de façon autonome, avec peu ou pas d'intervention de l'opérateur. Afin de réaliser cette tâche, il a fallu premièrement sélectionner les capteurs nécessaires mentionnés précédemment, simuler le robot afin de tester les algorithmes de navigation et finalement tester le

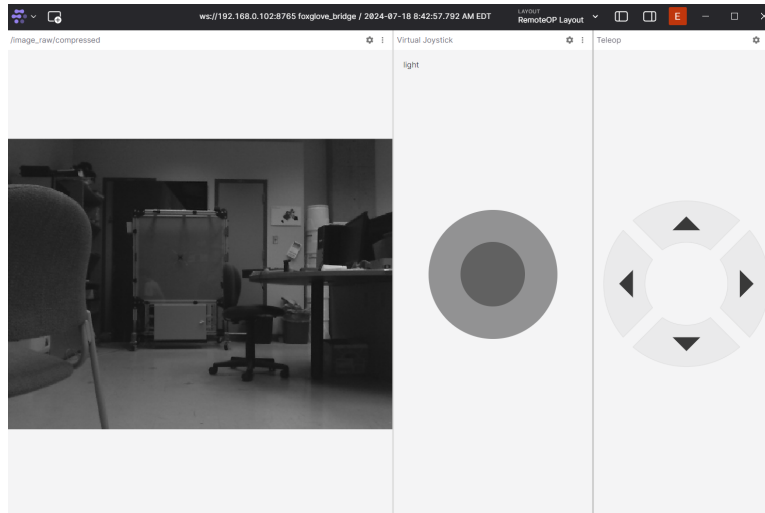


FIGURE 3.7 Interface Foxglove avec la manette virtuelle

tout sur le robot réel.

### 3.4.1 Simulation

Afin de pouvoir simuler le robot, il a fallu créer une version virtuelle du robot dans un fichier URDF. Ce fichier contient les dimensions des différentes parties du robot et permet de recréer le robot dans un environnement de simulation, en plus d'être nécessaire pour connaître les dimensions du robot lors de la navigation autonome. La majorité de ces fichiers étaient fournis par Rover Robotics, mais ont dû être modifiés pour y inclure les capteurs et d'autres modifications apportées au robot. Avec ce fichier, il a ensuite été possible de tester l'environnement de simulation sur le logiciel Gazebo, présenté à la figure 3.9 en bougeant manuellement le robot en lui envoyant des commandes sur ROS2. Le logiciel Gazebo est un logiciel de simulation robotique qui permet d'utiliser les fichiers urdf afin de créer une version virtuelle du robot et de tester différentes commandes sur le robot. Ce logiciel permet donc de tester tous les codes ajoutés à l'architecture ROS2 ainsi que chaque modification de paramètre avant de vérifier avec la version physique du robot. De plus, le logiciel Rviz2 a été utilisé pour visualiser le robot lui-même ainsi qu'avoir un support visuel pour plusieurs topic ROS2 qui seront utilisés dans la navigation autonome. Rviz2 est un logiciel souvent utilisé en complément avec ROS2 pour visualiser le contenu de différents fichiers qui sont généralement difficiles ou impossibles à visualiser. De plus, Rviz2 fonctionne avec ROS2 afin de visualiser certains *topics*, ce qui permet de facilement trouver la source de plusieurs problèmes.

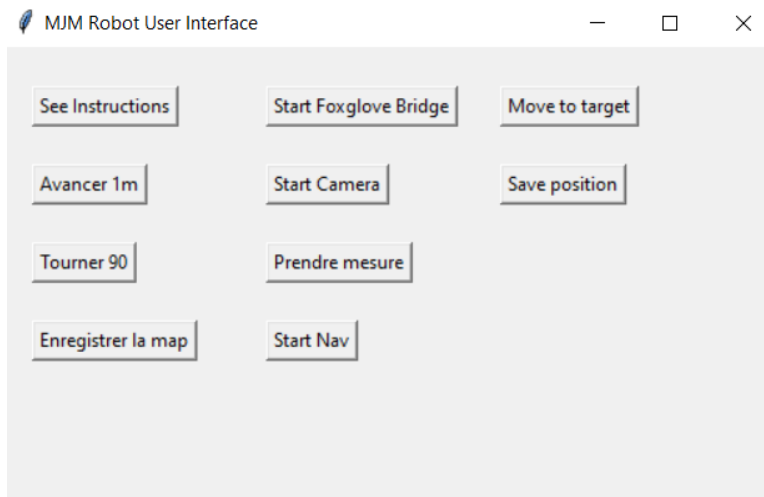


FIGURE 3.8 Interface graphique du script python permettant de contrôler le robot

L'étape suivante de la navigation autonome est d'être capable de créer une carte de son environnement et de connaître la position du robot dans cette carte, soit le SLAM qui est décrit précédemment. Afin de détecter les obstacles, le LiDAR A2M8 a été ajouté au robot et dans la simulation Gazebo. Les données obtenues par le lidar sont envoyés dans ROS2 sur le topic `scan` et peuvent être ensuite visualisés dans Rviz2, comme le montre la figure 4.9. Sur celle-ci, les points rouges représentent les détections d'obstacle du LiDAR. Après s'être assuré que les détections correspondait bien avec l'environnement du robot, la librairie *SLAM toolbox* [27] a été utilisée afin de prendre l'information du topic `scan` et du topic ROS `wheels_odometry` qui contient les données d'odométrie des capteurs sur les roues du robot afin de créer une carte des environnements du robot. Cependant, cette carte était souvent imprécise due à l'imprécision de l'odométrie des roues du robot, ce qui à poussé à ajouter un IMU au robot afin d'avoir des données plus fiables. Après l'ajout de l'IMU, les données d'odométrie sont envoyées sur le topic `odometry_filtered`, qui combine les données du topic `wheels_odometry` et `imu_data` en utilisant un filtre de Kalman. L'ajout de l'IMU a donc permis au robot de créer des cartes fiables, comme illustré à la figure 3.11.

Ensuite, avec le robot maintenant capable de créer une carte en connaissant sa position dans celle-ci, la librairie de navigation Nav2 [18], [19], [20], [21] a été utilisée pour permettre d'envoyer un objectif au robot, de planifier un chemin jusqu'à l'objectif et d'envoyer les commandes nécessaires au robot pour suivre ce chemin. Plusieurs tests ont été réalisés dans l'environnement de simulation Gazebo afin de s'assurer du fonctionnement de la navigation autonome dans différents scénarios, et certains paramètres des algorithmes de navigation

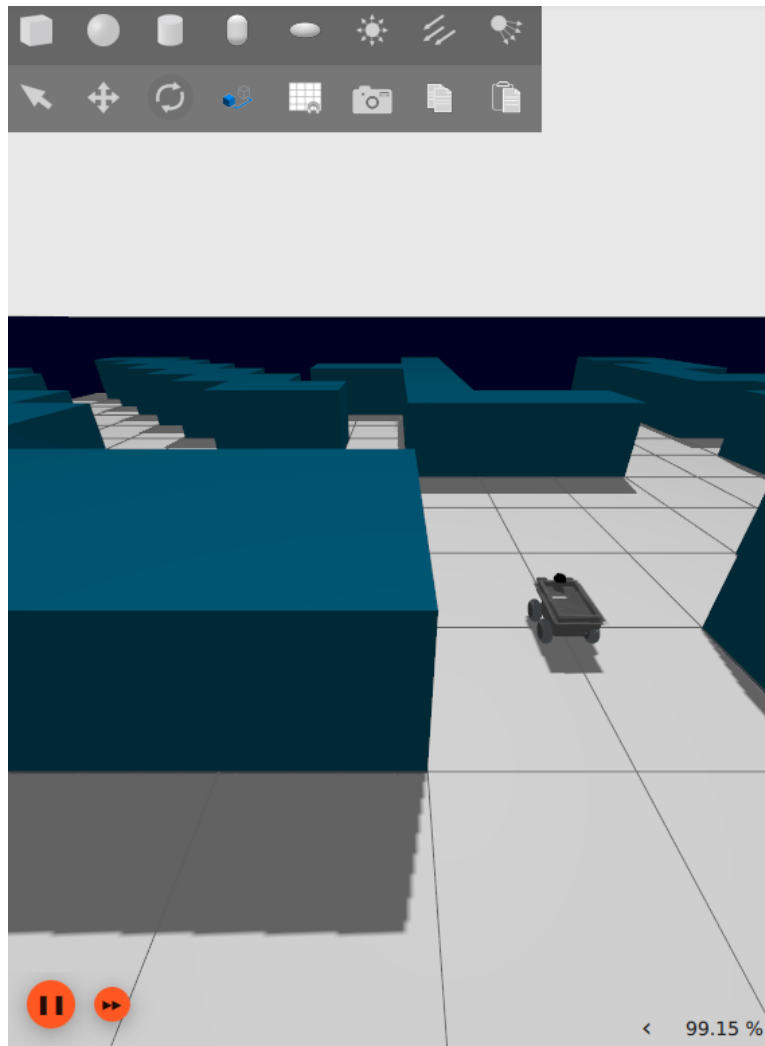


FIGURE 3.9 Le robot dans l'environnement de simulation Gazebo

de Nav2 ont été modifiés pour mieux adapter l'algorithme au robot et aux tâches de ce projet. Finalement, une fois que le robot était capable de constamment naviguer dans des environnements virtuels, les premiers tests de navigation autonome ont débuté sur le robot réel.

### 3.4.2 Application réelle

Afin de pouvoir utiliser la navigation autonome avec le robot, il a premièrement fallu encore une fois modifier le script Python sur l'ordinateur de l'opérateur afin qu'il puisse déclencher le SLAM et Nav2 sur le robot. Ensuite, Après avoir terminé les ajustements nécessaires pour répliquer avec le robot réel les résultats obtenus en simulation, la prochaine étape est d'intégrer la prise de mesures dans la séquence autonome. Avec Nav2, lorsqu'un objectif est envoyé

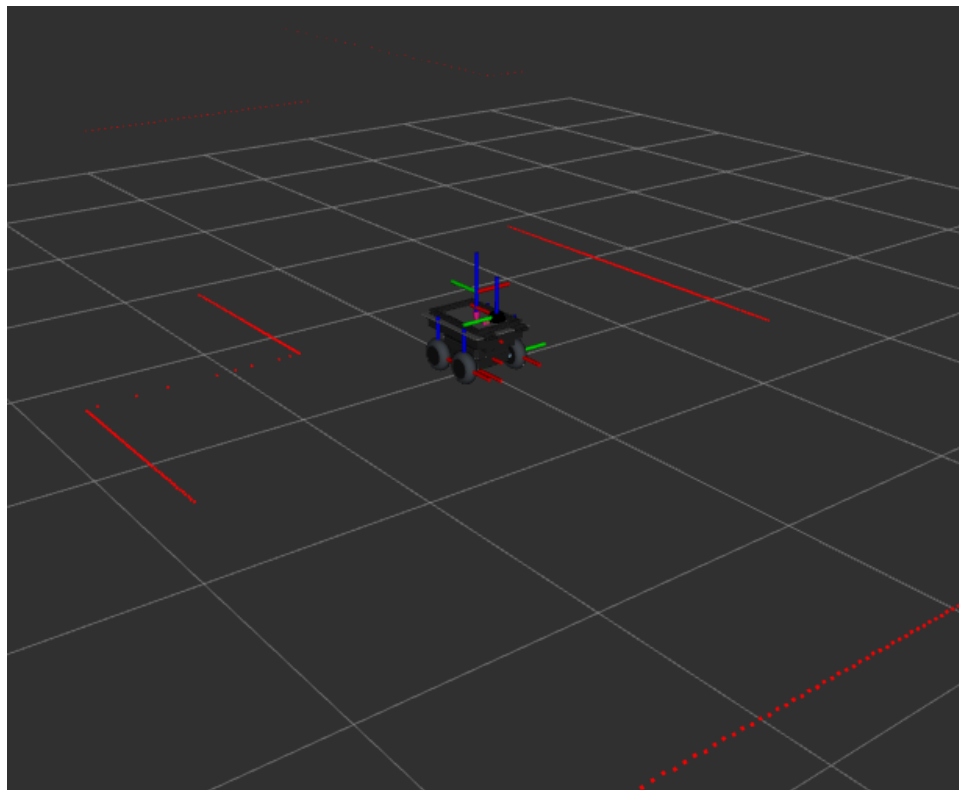


FIGURE 3.10 Visualisation du scan obtenu avec le LiDAR A2M8 dans Rviz2

au robot, une action ROS2 est créée et change son statut seulement lorsque l'objectif est atteint. Le statut de cette action est donc constamment vérifié et lorsque le robot atteint son objectif, une prise de mesures est entamée.

La séquence pour prendre des mesures acoustiques complètes dans une salle est donc la suivante. Premièrement, l'opérateur du robot guide à distance le robot dans la pièce, en enregistrant chaque point où une mesure doit être prise. Ensuite, une fois que ces points sont enregistrés et que le robot a créé la carte de son environnement, l'opérateur peut aller dans la pièce source pour s'occuper du reste de l'équipement. Pour la prise des mesures, il suffit de lancer la navigation autonome sur l'interface utilisateur de l'ordinateur de l'opérateur pour que le robot navigue jusqu'au premier point, commence une mesure lorsque ce point est atteint, puis navigue au prochain point lorsque la mesure est complétée et ainsi de suite.

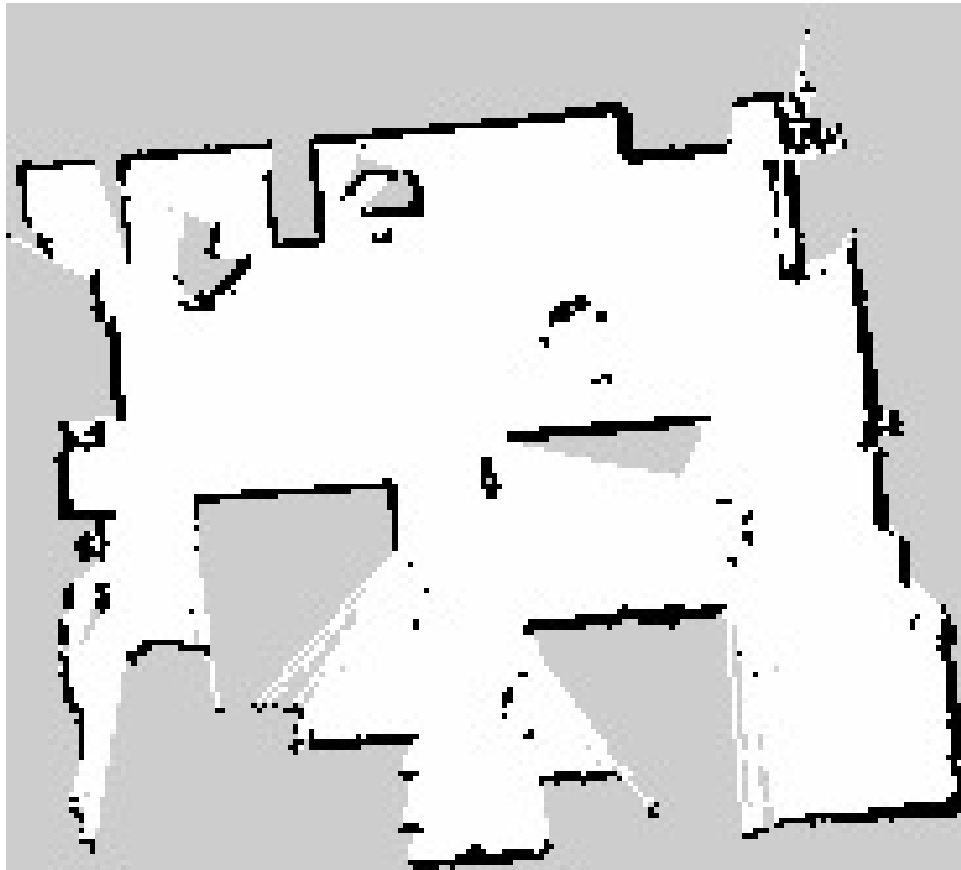


FIGURE 3.11 Carte créée par le robot dans un laboratoire de Polytechnique Montréal

## CHAPITRE 4    ARTICLE 1 : Semi Autonomous Ground Vehicle for Acoustic Data Acquisition on Construction Sites

Cet article a été soumis le 18 juillet 2024 pour publication dans la revue scientifique *Automation in Construction*.

Émile Gagnon, Gabriel Leroux, Nicolas Lévêque, Lionel Birglen

### **Abstract**

This paper describes the design and experimentation of an unmanned ground vehicle (UGV) able to complete acoustic measurements following the norms ASTM E336, ASTM E100 and ASTM E2235 as required by building code for construction sites. To this aim, an off-the-shelf wheeled robotic platform was equipped with a sound level meter, a camera, and a wifi router in order to complete the necessary measurements while being remotely controlled by an operator from a different room. All components are integrated into a realtime software and graphical user interface based on the Robot Operating System version 2 (ROS2) following simulations. This new robotic system allows for more efficient and cost effective acoustic measurements compared to the usual method which requires at least two workers in order to achieve all the steps imposed by the norms. This newly developed vehicle is also equipped with a LiDAR sensor and an inertial motion unit (IMU) to be able to drive autonomously which could even further improve the efficiency and diminish the risk of human errors during those measurements.

### **4.1 Introduction**

In the past decade, the progress made with unmanned vehicles have allowed many industries to take advantage of these robots in order to automate, simplify, or improve the efficiency of many tasks previously incurring heavy costs and delays due to the required manpower. These vehicles are able to complete many operations that are either repetitive and easy to automate, dangerous or complex for humans such as in places that are hard to reach [1]. The robots handling the latter, whether unmanned aerial vehicles (UAV) or unmanned ground vehicles (UGV) are already present in many areas of our everyday lives, such as structure inspection and maintenance [1,2], equipment transportation [5], self-driving cars [17] or road maintenance [6].

One industry in which unmanned vehicles have been the more welcomed to appear because of the danger and rising costs due to labor shortage is the construction industry. In construction, robots are now being used for different tasks amongst which are mortar plastering [4] or the thermal monitoring of buildings [3]. However, there are still many more potential applications, such as acoustic inspection as discussed in this paper, where they could of great help to simplify and improve efficiency. Acoustic measurements is indeed an important aspect of the design of a building since the sound property of a building directly impact the quality of life of its inhabitants or the ability of workers to perform. For example, schools need to have classrooms where the voice of the teacher can easily be heard in the whole room, but not in any neighboring classrooms. New buildings need to consider how sound will travel between different rooms to make sure sound is heard where it is meant to be heard but nowhere else. In order to check the acoustic property of a constructed building, measurements must be taken following very strict norms established by organizations such as the American Society for Testing and Materials (ASTM). These norms generally rely on taking multiple acoustic measurements in a room with a sound level meter while one or many other devices emit a well defined sound in another place and to repeat this process for different configurations. Since acoustic measurements require very repetitive simple tasks to be performed for a long time and at different locations, the use of a mobile robot allows not only to complete those tasks faster, but could also minimize the errors potentially arising during those measurements. Unmanned vehicles have already been used for some applications in acoustics, such as the visualization of a room acoustic properties [25] or to automate measurements in an anechoic chamber [26] but have not yet been designed or used for the specific requirements of acoustic measurements on construction sites.

In order to use unmanned ground vehicles for acoustic measurements, these robots must first comply with the strict norms of acoustic measurements, see [22]. The specific norms that apply in North America and which are considered in this work are ASTM E336 : *Airborne sound attenuation between rooms in buildings* (ASTC) [23], ASTM E1007 : *Impact Sound Transmission through floor-ceiling assemblies* (AIIC) [24] and ASTM E2235 : *Determination of Decay Rates for Use in Sound Insulation*. All three of these norms impose constraints on the design of the vehicle, for instance that the measurements must be taken at a constant height around 1.50m (depending on which type of measures are taken) and that the robot must be completely silent during the measurements in order not to bias the latter. The solution proposed in this paper is to use a wheeled UGV which will be able to function in two different modes, namely as a remote controlled vehicle where the operator

can control the robot from another room, and an autonomous robot where it can drive itself while the operator focuses on other tasks. UAV were also considered as they could fly easily to different measurement locations with a high robustness to obstacles but were discarded because of several issues. First, they are usually noisy and thus, the UAV would need to land in order to use its apparatus. However, as previously mentioned sound levels need to be measured at around 1.50m not on the floor. Designing a deployable boom to reach this height is theoretically possible but seems an unnecessary complex approach to solve this issue and would further increase the required payload (the industry standard sound level meter used in this work weighs around 5 kg) resulting in a very large UAV. Legged machines such as robot dogs or humanoids are possible to use instead of a wheeled vehicles and offer the attractive feature to be able to climb stairs and, sometimes, even operate doors. However, these legged solutions are most of the time cost prohibitive, complex to operate, and also often surprisingly noisy. The task of taking measurements a construction environment also set different specific constraints for the robot, such as being able to function in an unstructured and/or hazardous environment. Indeed, construction sites are often covered in dirt or dust as well as being littered with obstacles of various sizes and they also have uneven floors, see Fig. 4.1 for an example. Another important constraint is that the robot need to be easily transportable and safe to operate around humans. In order to satisfy all these requirements, a wheeled UGV platform was chosen.

The chosen robotic platform is the Rover Mini robot from Rover Robotics Inc., since this mobile robot provides adequately ample battery life (more than two hours), a sufficient ground clearance (approx. 57mm), quiet motors, and a robust frame which is able to function in a hazardous environment as well as an out-of-the-box compatibility with ROS2. ROS2 will be the primary operating system of the robot, since it provides a standard ecosystem of tools to connect different hardware and software components in a practical settings such as all the required elements to the remote control of the system as well as many autonomous driving, localization and navigation tools. The robotic platform with all the accessories are shown in Figure 4.2.

## 4.2 Robot Design

### 4.2.1 Data Acquisition

The acoustic data acquisition following the norms previously listed is usually conducted by one operator using a sound level meter and analyzer while another operator uses different



FIGURE 4.1 Typical construction environment that the robot needs to navigate for measurements

devices such as loud speakers or impacting machines that rhythmically tap on floors to characterize sound transfer. The sound emitting devices is generally in different room than the one under scrutiny with the sound level meter since the goal is to measure how sound propagates through barriers such as walls and floors. Our robot will thus need to be equipped with a sound level meter, which in this case will be the B&K type 2250, a standard tool in the industry. This sound level meter provides an online interface which can be accessed by connecting an Ethernet cable and reaching the IP address of the device from an internet browser. This procedure also works if the WiFi connection provided by the Ethernet cable does not have an internet connection as long as the computer attempting to use the sound level meter is on the same local network. Having an available network connection helps in the choice of the communication mode between the UGV and the operator which will be detailed later. For the robot to be able to easily start an acoustic measurement, a Python script was developed that connects the embedded computer on the robot (Intel NUC7) to the web page of the B&K type 2250 instrument. That script automatically starts the data acquisition and stores the produced result in the internal memory of the sound level meter. When the required measurements have been done, all the data can easily be transferred from the sound level meter to any computer for further analysis. Finally, in order to comply with the norms ASTM E336, ASTM E100 and ASTM E2235 an adjustable support had to be build on top of the robot so that the sound level meter is at the desired height, as can be



FIGURE 4.2 Proposed robotic platform. 1. Sound level meter, 2. USB camera, 3. LiDAR, 4. Rover payload with embedded NUC computer, IMU, and WiFi router, 5. Wheeled robot (Rover Robotics Mini)

seen in Fig. 4.2. A list of all the hardware equipment used in the robot is shown in Table ??.

#### 4.2.2 User Interface

In order to adapt the vehicle to the various conditions it could face during the measurements, two main operations mode will be used, namely either controlling the robot remotely or driving autonomously. In most cases, while gathering acoustic data in a building the robot operator will not be in the same room as the robot and can often be on a different floor. Considering that measurements are often taking place in large buildings, the floors can be made from a thick concrete layer complicating the communication between the robot and the operator. Additionally, unlike most indoor UGV, the robot will not be able to rely on an existing WiFi network to provide an internet access since the building is still in construction and very few of these have an available connection to the internet.

TABLEAU 4.1 Hardware list of the proposed robotic vehicle

| Item            | Designation               |
|-----------------|---------------------------|
| Mobile platform | Rover Robotics Mini       |
| Computer        | Intel NUC7                |
| Sound meter     | B&K 2250                  |
| IMU             | Bosch BNO085              |
| LiDAR           | Slamtec RPLiDAR A2M8      |
| WiFi Router     | TPLink AC1900             |
| Camera          | Microsoft LifeCam HD-3000 |

Three different communication protocols between the UGV and the operator have been considered : a 5G network, a local WiFi router, or a radio transceiver. Communication over a 5G network was first tested but quickly discarded due to its low reliability. Indeed, it often malfunctioned or was unresponsive due to the surrounding concrete structures. Radio and WiFi communications were then both also tested with the robot to see how well they were suited and especially how fast data could be sent and received. Furthermore, since one of the objectives of this robot is to create an affordable framework for acoustic data acquisition, the cost of both methods was also an important consideration when choosing which communication method will be implemented in the final version of the robot. When comparing both methods, radio transceivers offered a typically cheaper option which also allowed to connect the robot to the operator through up to two concrete floors. However, while attempting to send a live video feed through these radio transceivers, there would often be a delay of a few seconds when sending through one or multiple concrete floors which made remote controlled operation of the vehicle almost impossible. This problem could have been solved with specialized equipment as found for first person view unmanned vehicles but this equipment was considerably more costly. The use of a WiFi router on the robot to create a local WiFi network also allowed to connect through two or more concrete floors as it was found out, and live video feeds were transmitted without noticeable delay. A WiFi network was therefore implemented as the primary mode of communication between the robot and the operator since although a consumer level WiFi router with enough range is more expensive than simple radio transceivers it remains an affordable piece of equipment. Additionally, the use of a WiFi router will provide further advantages for the control of the robot as will be discussed further in the following sections.

### 4.2.3 Remote Control

Since video feedback is essential in order for an operator to accurately remote control the robot, a camera compatible with ROS2 was added its chassis. The compatibility with ROS2 of this camera allows its (de)activation by software very easy. The actual remote control system was implemented using the Foxglove Studio software and is accessible through the WiFi network created by the robot. The Foxglove software is compatible with ROS2 and allows to efficiently create a user friendly interface on the computer of the operator to receive live video feed from the robot by subscribing to the camera's ROS2 topic. The Foxglove interface is also used to send commands to remotely operate the motion of the robot using simple control box, sliders, and arrow buttons, see Fig. 4.3.

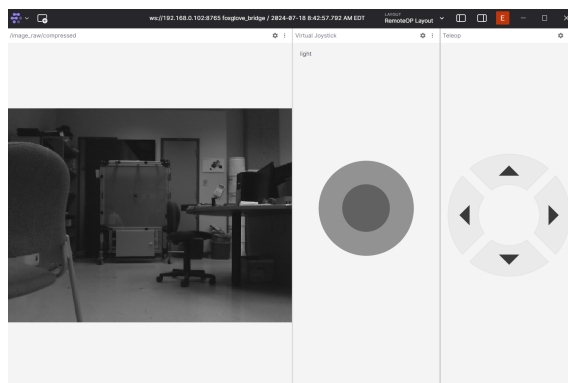


FIGURE 4.3 Graphical User Interface (GUI) for the remote control of the vehicle

To start ROS2 remotely from the control computer, a Python script is used to connect to the computer on the UGV using a secure shell (SSH) protocol and then, send the desired ROS2 command line prompts to sequentially start the robot, start the Foxglove connection, and start the camera. New acoustic data points can also be obtained using this Python script if required since the sound meter is also connected to the onboard UGV computer through the local network.

This control mode of the UGV has been tested in different buildings and has succeeded to take various types of acoustic data while being remotely operated by an operator in a significantly distant room. This operator can then at the same time operate the other necessary equipment for the acoustic data acquisition. This means that the remote control mode of this robot can already allow to take acoustic measurements faster and decrease the overall costs of acoustic inspection since taking these measurements is normally a two-person job :

one with the sound level meter and the other with the sound emitting devices. Using the proposed UGV, the same operator can do both in almost the same time.

#### 4.2.4 Autonomous Navigation

Now that the remote controlled mode of the UGV has demonstrate the potential for a more efficient and cost effective acoustic job, the next step is to add autonomous navigation to the vehicle. Indeed, providing the robot with the capability to move from one measurement location to the next with minimal or even zero human intervention could not only improve even further the efficiency of robotic acoustic inspections but could also significantly reduce the human error aspect of data acquisition, since those very repetitive tasks are prone to human mistakes, such as writing down erroneous data due to repetition or writing data in the wrong place in the report form. These mistakes can seem futile but can have a considerable impact on the data analysis when the measurements are processed.

Implementing autonomous driving on the robot using ROS2 can be done using the Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) toolbox developed by [27]. This toolbox provides all the tools and algorithms required to allow a robot to create a map of its surroundings while also locating itself within this map [7, 8]. The idea behind SLAM is that by knowing the information between two poses from odometry and by knowing the positions of detected features of the environment it is possible to calculate the probability that the robot is in a certain position and that the environment is represented by a certain map. This probability is defined by [7] :

$$p(X_T, m | Z_T, U_T) \quad (4.1)$$

where  $X_T = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_t\}$  is the sequence of the robot positions,  $m$  is the true map of the environment,  $Z_T = \{z_0, z_1, z_2, \dots, z_t\}$  are the sequence of detections made at each of the latter positions, and  $U_T = \{u_0, u_1, u_2, \dots, u_t\}$  where  $u_t$  is the odometry data between time  $t - 1$  and  $t$ . Equ. 4.1 shows the problem known as the full SLAM problem, which refers to calculating the whole path of the robot with all the available data. However, the SLAM problem can also be written in another form, which is known as the online SLAM problem, namely [7] :

$$p(x_t, m | Z_t, U_t) \quad (4.2)$$

Using the latter formulation, only the current position of the robot is estimated instead of the entire path. In order to obtain this probability, one of the most common technique is to use an extended Kalman filter (EKF) [7, 9]. The EKF algorithm calculates this probability

by approximating the estimates of the robot position and map by Gaussian functions :

$$p(x_t, m|Z_t, U_t) = N(\mu_t, \Sigma_t) \quad (4.3)$$

where  $N$  stands for the Gaussian function,  $\mu_t$  is a vector containing the best estimation of the robot position and of the location of the features in the map and  $\Sigma_t$  is the correlation matrix of the estimates of  $\mu_t$ .

The use of an EKF allows for a iterative improvement of the certainty on the variables of the robot position as well as the global map in which it navigates. In order to implement SLAM though, additional sensing is required to produce the map of the environment and detect features. Many technological solutions are possible to this aim such as ultrasonic sensors [12], depth cameras [10, 11], object recognition methods [9] or even microphone arrays to detect the direction of a sound signal [13]. The method employed for the proposed robot is to combine the odometry of its wheels with the data from an added BNO055 inertial motion unit (IMU) using an EKF, which will give two different input sources to combine and obtain a precise estimate of this odometry. Then, a Slamtec RPLiDAR A2M8 LiDAR (Light Detection and Ranging) is used to detect walls and obstacles within the room. Combining the detections from the LiDAR with the filtered odometry using an EKF SLAM creates a map that is updated as the robot moves within the room.

Once the map of the environment is created, it is possible to navigate the robot to a given pose by computing an optimal path and then, driving the robot while updating the path for new obstacles along the way. Once again many methods can be used, such as the potential field method which creates an attractive field where the goal is located and repulsive fields around obstacles to generate a path. This method also has many variations to optimise the path chosen or to avoid problems which can cause the vehicle to get stuck [14, 15]. The path can be optimised for the vehicle used [16] before being followed until the robot reaches its goal. The ROS2 Nav2 framework [18–21] is used here to complete the navigation task as it provides different methods for generating an optimal path as well as driving the robot to its objective. A simulation tool, namely the Gazebo robotics simulation software, was used to verify the performance of the autonomous driving algorithms before actual testing on the robot.

## Simulation

Using Gazebo, a URDF file of the vehicle was first created including the navigation sensors that were added, namely the BNO055 IMU and RPlidar A2M8. The resulting URDF file allows to create a virtual copy of the robot which can be visualized using Rviz2, as illustrated in Fig. 4.4.

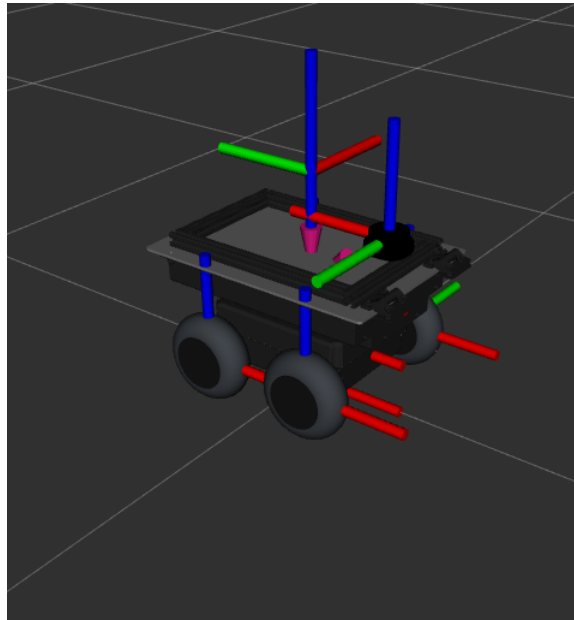


FIGURE 4.4 Isometric view of the simulated robot in Rviz2

Odometry from the robot's wheels is published on the `/odometry/wheels` ROS2 topic while the data from the IMU is published on the `/imu/data` topic. The `/ekf_filter_node` in ROS2 then takes the data from both and combines them to obtain the actual odometry data which is published on the `/odometry/filtered` topic. With the data from the LiDAR published on the `/scan` topic, the ROS2 SLAM toolbox is able to generate a realtime map containing the robot surroundings and that map is constantly updated. Fig. 4.5 shows the robot and the map it is creating in Rviz2 during a Gazebo simulation.

With the robot able to create a map of its surroundings and locate itself in this map, the `nav2` tool can now be used to move the robot to a desired pose within the map. The goal is first published on a ROS2 topic and `nav2` immediately begins to publish on the `/cmd_vel` topic to navigate to this goal. Once the ROS2 action for navigating to the goal is completed, a status message is sent which allows to start the acoustic measurement when the robot has stopped. Fig. 4.6 shows the complete architecture of the vehicle with the remote control and

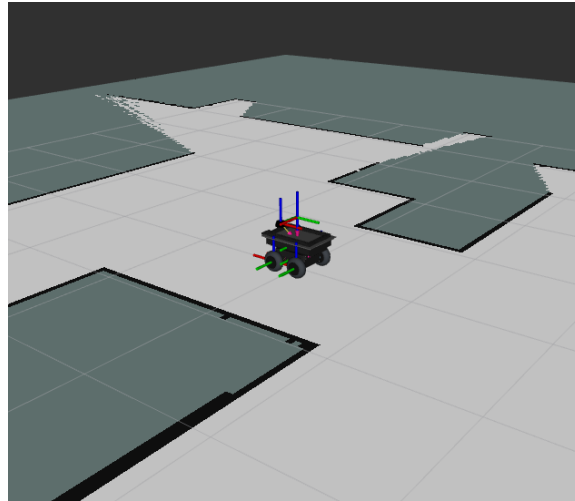


FIGURE 4.5 Example of the robot navigating in Rviz2 with the estimated map it generated autonomous navigation modes while Fig. 4.7 shows the ROS2 software setup of the robot.

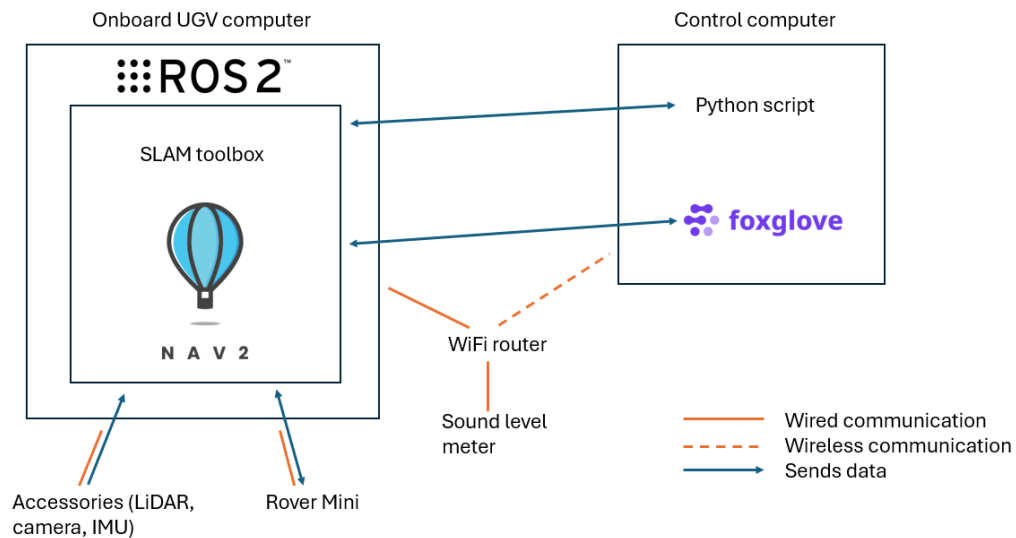


FIGURE 4.6 Overall vehicle and robotic workstation architecture

## Acoustic Mapping

Now that the robot is able to navigate from one pose to the other, it is possible to add the acoustic measurements in the autonomous navigation. Since acoustic measurement in a single

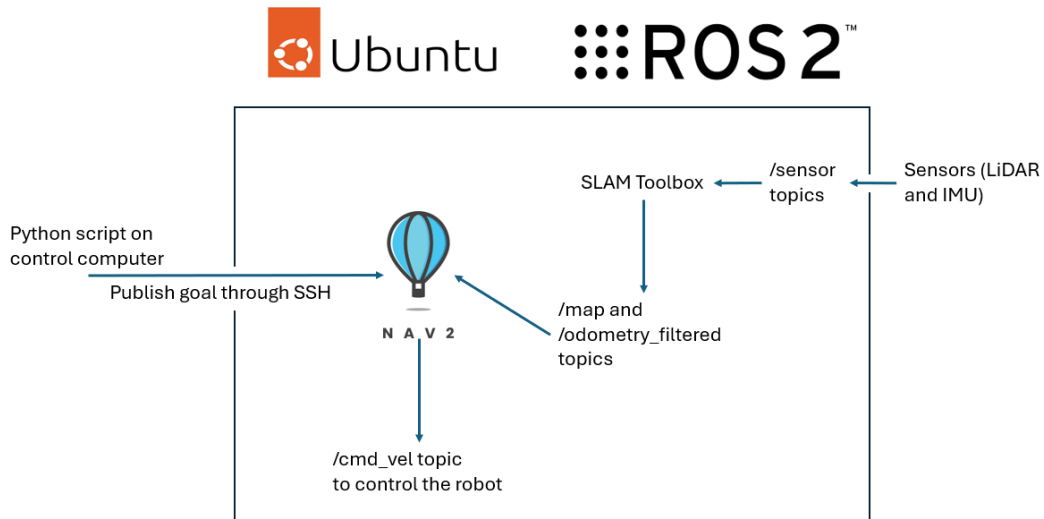


FIGURE 4.7 Software architecture and ROS2 framework

room requires to chose a number of positions in the room and repeatedly take measurements in these spots, the Python script used to communicate and start the robot was extended to also start the SLAM process as well as starting the navigation, and to save predefined positions in the room. The robot can now be remote controlled around the room while saving each position in which the operator wants to take a measurement. Then, the robot will have created the map of its surroundings and stored the positions where measurements need to be made. The operator can subsequently go prepare the rest of the equipment needed for the data acquisition (i.e. the sound generation) and remotely start the autonomous driving when ready. The robot will then drive to the first position saved, and once he has reached its goal, the acoustic data acquisition will be started. This process repeats until the robot has reached every saved position, when the operator can then prepare the equipment for the next set of measurements and start again the same steps. Fig. 4.8 shows a picture taken from the point of view of the robot, with a map the robot has created at the same location. the direction of the picture taken is to the right of the map.

### 4.3 Experiments

Finally, in order to test the complete UGV and software, multiple experiments have been conducted in various environments. Most of these tests have been using the remote controlled version of the robot as it was fully operational before the autonomous version. Fig. 4.9 show



FIGURE 4.8 Example comparing the actual environment and the generated map through SLAM

an ambient sound level scan done with the remote controlled robot following the ASTM norms.

To test the robot in different representative situations, a complete session of acoustic measurements was conducted in a building where two different separations between rooms were investigated : a floor and a wall. The wall was tested for isolation of airborne sounds in order to obtain the noise isolation class (NIC), while the floor was tested for isolation of airborne sounds as well and also for isolation of impact sounds to obtain the impact sound rating (ISR). These three different acoustic measurements require to take multiple acoustic measurements in different rooms, and both measurements for the floor were done three separate times, once with two operators, as normally done ; once with only one operator who had to walk between the two rooms to adjust the equipment ; and finally, once with only one operator using the UGV. The results from all of those measurements are shown in Figs. 4.10, 4.11 and 4.12. In Figs 4.11 and 4.12, the red line is for measurements with two operators, while the black line with circles is for one operator and the black line with diamonds is for one operator and the UGV.

The final results obtained are NIC 39 for the wall, NIC 35 for the floor with all three measurement methods, ISR 40 for the floor when measured with one or two operators and ISR 36 when measured by the robot. The difference when between the ISR ratings when taken with

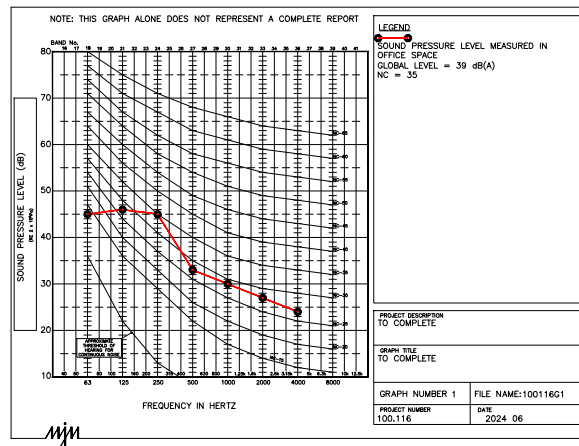


FIGURE 4.9 Example of an ambient sound scan

the robot is conjectured to come from the fact that it is not the same operator that placed the impact sound machine for this specific experiment and by placing it in a slightly different position it can happen to be on top of a structural beam from the ceiling which will affect the sound that is transmitted.

Further experiments were conducted in more difficult situations to test the limits of our robot and establish if it can still be effective in those conditions. For instance, acoustic measurements were carried in a basement with thick concrete walls and ceiling, a situation cellular data coverage was not available at all. This basement room was also very poorly lit and hard to navigate for the robot due to many obstacles, narrow paths, and uneven floors as shown in Fig. 4.13, whereas one should recall that a normal construction site in which the robot would be used looks as Fig. 4.1.

While acoustic measurements are often made in large buildings where it can take minutes to go from one room to the other when they are on different floors, this last series of experiments was made in very close rooms which limited the impact the the robot would have to speed up the process. In order to precisely measure the efficiency of the robot, the acoustic measurements have been timed and the results are shown in Table 4.2.

What was learned in these experiments is that even in difficult conditions, the robot is still able to successfully complete acoustic measurements. However, in these specific conditions using the robot is not faster than with one operator due to the proximity of the rooms and

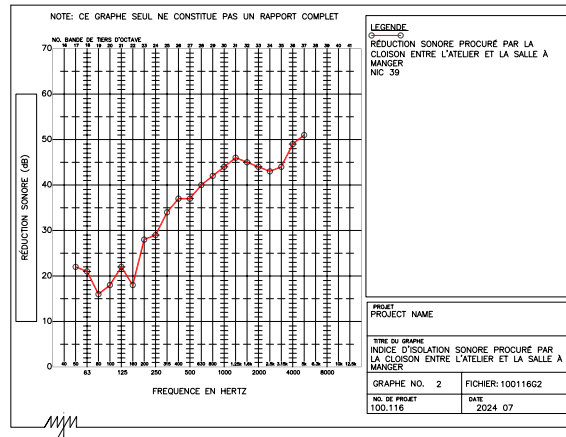


FIGURE 4.10 Airborne sound isolation test for a wall

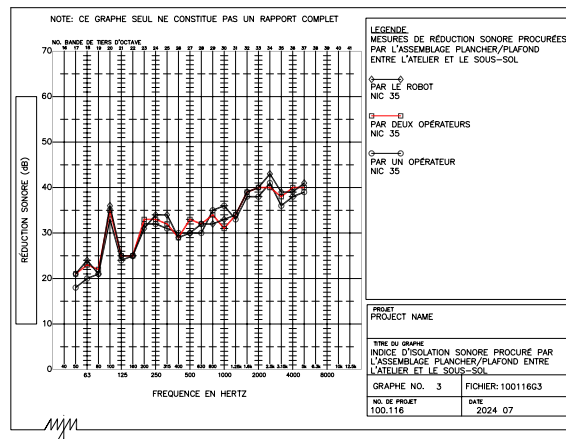


FIGURE 4.11 Airborne sound isolation test for a floor

TABLEAU 4.2 Duration in minutes required to complete the acoustic characterization

| Measurement type         | Two operators | One operator | One operator w/ UGV |
|--------------------------|---------------|--------------|---------------------|
| Airborne sound isolation | 4 :22         | 8 :42        | 9 :42               |
| Impact sound isolation   | 17 :20        | 19 :34       | 23 :28              |

the difficulty of navigation for the robot. However, even in those cases usage of the robot could still prevent operators from needing to often move between floors with heavy equipment, which can become very tiring and incur a range of musculoskeletal issues such as back pain, etc.

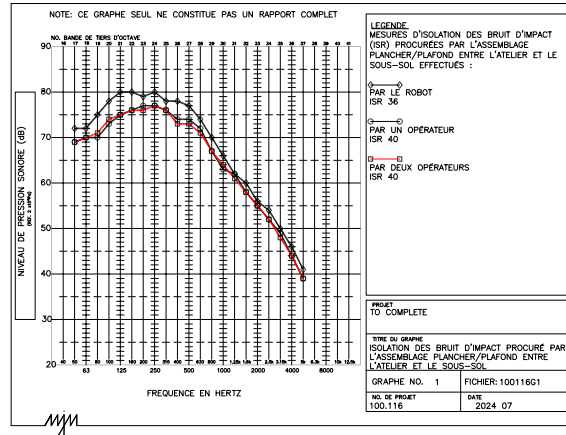


FIGURE 4.12 Impact sound isolation test for a floor



FIGURE 4.13 Basement room used for testing

## Conclusion

In this work, a UGV was designed and built using a RoverRobotics Mini robot and ROS2 software architecture to be able to complete acoustic measurements following established norms. This vehicle has shown that while being controlled remotely it is able to be more efficient and cost effective while taking these measurements since it requires one less person for this task. An autonomous mode of this vehicle was then simulated with Gazebo and implemented on the robot. This version has not yet been tested with on field acoustic measures in actual construction sites, but is expected to further improve the efficiency of the remote controlled version and reduce potential human errors during these measurements.

#### 4.4 Acknowledgements

The support of the Mitacs grant program is gratefully acknowledged.

## CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 5.1 Robot téléguidé

La première version du robot, soit le robot téléguidé, a pu être testée dans différentes conditions lors de la prise de mesures acoustiques avec MJM conseillers en acoustique inc. La majorité des résultats obtenus lors des tests ont été présentés dans la section précédente, cependant il faut préciser que pour les tests présentés au tableau 4.2, ces tests ont été chronométrés seulement une seule fois pour les temps présentés, donc plus de tests devraient être réalisés afin de pouvoir déterminer avec plus de certitude l'efficacité du robot. Par contre, cette version a également pu être testée lors de la prise de mesures dans une école en construction, ce qui a permis de tester différents scénarios. Premièrement, il a été possible de conduire le robot dans une classe presque complète, ce qui impliquait de naviguer entre des rangées de bureaux. Ceci a d'ailleurs été fait avec l'opérateur du robot se situant dans une classe de l'étage au dessus de celle dans laquelle se situait le robot. Le même test a été fait avec l'opérateur se situant deux étages au dessus du robot, mais avec la couche épaisse de béton dans ce bâtiment, le vidéo en temps réel transmis par le robot était assez lent et avait un délai considérable, ce qui rendait le contrôle à distance presque impossible. Cependant, ceci n'est pas un problème pour la prise de mesures puisqu'elles sont très rarement, voire jamais prises dans des salles à deux étages de différence. Cet essai servait seulement à tester les limites du robot. D'ailleurs, malgré que le contrôle à distance était problématique dû à la vitesse de transmission du vidéo, l'envoi de commande au robot était toujours parfaitement fonctionnel, ce qui signifie que la version autonome du robot pourrait fonctionner dans cette situation. Ensuite, la même opération a été réalisée encore, mais cette fois avec l'opérateur dans une salle adjacente au robot. Cette fois, sans la couche de béton séparant le robot et l'opérateur, il a été possible de conduire le robot et de prendre des mesures à trois classes de distance du robot. Ceci démontre non seulement la puissance du routeur WiFi utilisé, mais également à quel point les couches de béton entre les étages de tels bâtiments peuvent nuire à la communication entre le robot et l'opérateur. Finalement, le robot a également été testé dans le gymnase de l'école, puisque des mesures peuvent également être prises dans de très grandes salles comme des gymnases ou de salles de réception. Le robot a encore une fois facilement pu être contrôlé en prendre des mesures sur toute la superficie du gymnase simple alors que l'opérateur se tenait dans un coin du gymnase.

Ces test permettent de démontrer que la version téléguidée du robot développé permet de

remplir l'objectif principal de ce projet, soit d'améliorer l'efficacité et de diminuer le coût des mesures acoustiques en diminuant le nombre d'employés nécessaires à la prise de ces mesures. En effet, un seul employé peut facilement utiliser le robot pour manipuler le sonomètre alors qu'il s'occupe du reste de l'équipement dans les autres pièces. Ceci permettra d'éviter à des employés de MJM conseillers en acoustique inc. à avoir à passer plusieurs heures à prendre des mesures acoustique et permettra de passer plus de temps sur les rapports produits avec ces mesures. Ceci pourrait donc permettre à la compagnie d'augmenter leur productivité à long terme.

## 5.2 Robot autonome

La version autonome du robot a été testée dans différents locaux, tels que dans différents locaux de l'école polytechnique ainsi que dans les locaux de MJM conseillers en acoustique, mais n'a pas encore été testé dans de vraies conditions de prises de mesures acoustiques. Le robot a démontré être capable de naviguer d'un point à l'autre et de s'arrêter pour prendre des mesures, cependant il n'est pas encore capable de réussir à tous les coups. Il reste donc encore certains ajustements à faire avant de pouvoir effectuer les tests finaux et laisser le robot seul prendre des mesures acoustiques dans une salle. Les problèmes qui peuvent survenir sont généralement dans les catégories suivantes : le robot reçoit la commande de naviguer à un certain objectif, mais semble être incapable de calculer un chemin et ne fait que se déplacer un peu et très lentement avant de s'arrêter et de recalculer un autre chemin, ou le robot reçoit mal la commande de l'ordinateur de l'opérateur et ne démarre simplement pas la navigation. Des solutions potentielles pour ces erreurs sont entrain d'être implémentées, tel que d'améliorer le code sur l'ordinateur de l'opérateur afin de vérifier que le robot à bien reçu la commande et de pouvoir renvoyer la commande en cas d'erreur, ainsi que de modifier certains paramètres des fichiers de configuration de Nav2 qui semblent causer certains problèmes avec les détections du LiDAR et causent le robot à ne pas être capable de calculer un chemin adéquat. D'autres travaux seront faits prochainement afin de régler ces problèmes et que le robot puisse être remis à MJM conseillers en acoustique afin qu'ils puissent utiliser pleinement les fonction téléguidées et autonomes lors de leurs prises de mesures.

De plus, les techniques utilisées lors de ce projet sont toutes des techniques existantes et déjà prouvées, comme celles fournies par les bibliothèques SLAM et Nav2. Bien que ces bibliothèques aient justement été choisies parce qu'elles sont robustes, considérant que le robot sera éventuellement utilisé dans les travaux réguliers de MJM Conseillers en Acoustique, il aurait

été intéressant d'explorer l'utilisation de techniques plus récentes qui auraient pu donner de meilleurs résultats. Il aurait également été possible de modifier des techniques existantes ou de développer une nouvelle méthode afin d'apporter une solution personnalisée pour ce problème qui aurait permis de résoudre certains problèmes persistants, tels que la présence de marches d'escaliers descendantes sur les chantiers de construction.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION

### 6.1 Synthèse des travaux

Ces travaux ont permis de développer un robot ayant deux modes de fonctionnement, un mode autonome et un mode téléguidé, afin de prendre des mesures acoustiques dans des bâtiments en construction. Différentes composantes ont dû être sélectionnées selon les multiples contraintes engendrées par la nature des mesures acoustiques et de l'environnement en construction des bâtiments. Ensuite, le robot a été programmé en utilisant le logiciel ROS2 et différentes bibliothèques pour faciliter la navigation autonome. Ce robot développé en partenariat avec MJM conseillers en acoustique pourra être utilisé dans leurs travaux quotidiens afin que moins d'employés soient nécessaires pour la prise de mesures acoustiques, ce qui permettra à la compagnie de concentrer une plus grande partie de son temps sur l'analyse et la création de rapports à partir des données acoustiques recueillies lors de la prise de mesures.

### 6.2 Limitations de la solution proposée

Avec l'état actuel du véhicule, chacune des versions présente des limitations différentes. La version téléguidée du robot est principalement limitée par deux facteurs, soit la difficulté de conduire le robot et la vitesse du routeur WiFi. Dans la majorité des cas lors de la prise de mesure, il est assez simple de conduire le robot dans une grande pièce relativement vide. Cependant, lorsque le robot est utilisé dans des endroits plus encombrés ou avec une mauvaise visibilité, le robot peut devenir relativement difficile à conduire à distance. Cette difficulté a été démontrée dans les tests présentés au chapitre 4, lorsque les tests effectués avec le robot étaient plus lents que les tests effectués avec un opérateur seul. De plus, comme démontré dans les tests effectués dans une école en construction, lorsque le robot est trop loin de l'opérateur ou séparé par une barrière rendant la communication difficile, il est possible que le vidéo en temps réel soit transmis avec un certain retard, rendant la conduite du véhicule téléguidé impossible. Cependant, malgré que le vidéo soit reçu avec un délai, l'envoi de commandes au robot par SSH est encore possible, ce qui fait que la version autonome du robot peut remédier à ces deux problèmes.

Par contre, le mode autonome du robot présente également d'autres limitations. En effet, le robot autonome est très susceptible à des erreurs logiciels qui peuvent faire en sorte que le robot ne trouve pas son chemin vers son objectif ou même prenne un mauvais chemin. Dû à

la complexité des algorithmes utilisés par Nav2 pour générer un chemin et le suivre, il n'est pas toujours possible de déterminer la source de ces erreurs et de les corriger. Malgré que certaines erreurs soient déjà identifiées et corrigées, il reste encore plusieurs problèmes qui surviennent parfois lors des tests de navigation autonome. Alors que des hypothèses sur la cause de certains de ces problèmes ont été émises et n'ont pas encore pu être testées par manque de temps, d'autres problèmes sont encore dus à des causes inconnues. A cause de ces différents problèmes qui peuvent survenir sur le robot, malgré que le robot soit capable de prendre des mesures avec la navigation autonome, il faut quand même une certaine supervision humaine afin de s'assurer qu'aucun problème n'est survenu. La supervision ou l'intervention humaine est également nécessaire pour s'assurer qu'il n'y a pas d'obstacles présents qui ne seraient pas détectés par le robot, tel qu'un escalier descendant ou un objet trop bas pour le LiDAR. Avec la version actuelle du robot l'opérateur doit s'assurer d'enlever ces obstacles, ou de les rendre facilement détectables par le robot, par exemple en plaçant un cône ou un autre objet devant ces obstacles.

### 6.3 Améliorations futures

En considérant les limitations de la solution proposée présentées précédemment, il est plus difficile de remédier aux limitations du mode téléguidé puisque les limitations sont largement dues à des limitations de l'équipement. Ces limitations pourraient être réduites ou même éliminées avec l'ajout d'équipement de meilleure qualité, mais ceci irait à l'encontre d'un des objectifs du projet qui est de respecter un budget pour la création de ce véhicule. Pour le mode autonome du robot, la prochaine étape des travaux consisterait à se pencher sur les problèmes qui peuvent survenir lors de la navigation autonome du véhicule. Bien que certains paramètres des algorithmes de navigation aient déjà été modifiés pour s'adapter à ce projet, une plus grande vérification de tous ces paramètres permettrait d'optimiser la navigation autonome et de diminuer le nombre d'erreurs. De plus, la sélection d'un algorithme plus spécialisé parmi les différentes options offertes par Nav2 pourrait également aider à diminuer la fréquence des erreurs de navigation. De plus, l'utilisation de meilleurs équipements de détection, tel qu'un LiDAR 3D, permettrait de limiter le nombre d'obstacles que le robot ne peut pas détecter. L'utilisation de meilleurs équipements, combiné avec l'utilisation d'un algorithme plus poussé pourrait permettre au robot de fonctionner sans intervention ou supervision humaine de manière sécuritaire et efficace.

Une fois que la navigation autonome du véhicule est terminée et que la fréquence des erreurs

est diminuée au maximum, la prochaine étape afin d'améliorer le véhicule serait probablement l'amélioration de l'ergonomie du robot. Par exemple, la création d'une meilleure interface graphique permettant de tout contrôler dans une seule fenêtre et sans l'intervention du logiciel Foxglove, ou l'ajout d'une option permettant d'obtenir les résultats des mesures acoustiques directement sur l'ordinateur de contrôle de l'opérateur au lieu de les enregistrer dans la mémoire du sonomètre.

## RÉFÉRENCES

- [1] B. Chapdelaine *et al.*, “Simulation and experimental validation of an autonomous perching and takeoff method for a multirotor uav on vertical surfaces using a suction cup,” dans *2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2024.
- [2] J. Zhang *et al.*, “Strategies for guided acoustic wave inspection using mobile robots,” *Proceedings of the Royal Society A*, 2022.
- [3] A. Adan, A. López-Rey et A. Ramón, “Robot for thermal monitoring of buildings,” *Automation in Construction*, vol. 154, p. 105009, 2023.
- [4] Y. Wang *et al.*, “Mortar spraying and plastering integrated robot for wall construction,” *Automation in Construction*, vol. 165, p. 105533, 2024.
- [5] C. A. Thiels *et al.*, “Use of unmanned aerial vehicles for medical product transport,” *Air Medical Journal*, vol. 34, 2015.
- [6] X. Hu et R. H. Assaad, “The use of unmanned ground vehicles (mobile robots) and unmanned aerial vehicles (drones) in the civil infrastructure asset management sector : Applications, robotic platforms, sensors, and algorithms,” *Expert Systems with Applications : An International Journal*, vol. 232, 2023.
- [7] C. Stachniss, J. J. Leonard et S. Thrun, “Simultaneous localization and mapping,” dans *Springer Handbook of Robotics*. Springer Handbooks, 2016, p. 1153–1176.
- [8] C. Cadena *et al.*, “Past, present, and future of simultaneous localization and mapping : Toward the robust-perception age,” *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, vol. 32, n° 6, 2016.
- [9] M. Bloesch *et al.*, “Robust visual inertial odometry using a direct ekf-based approach,” dans *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 28 septembre 2015.
- [10] P.-E. Sarlin *et al.*, “From coarse to fine : Robust hierarchical localization at large scale,” dans *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019.
- [11] R. Raveendran *et al.*, “Development of task-oriented ros-based autonomous ugv with 3d object detection,” dans *2020 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics*, 28-29 septembre 2020.
- [12] P. K. Mvemba *et al.*, “Advanced acoustic sensing system on a mobile robot : Design, construction and measurements,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2018.

- [13] S. Ogiso *et al.*, “Self-localization method for mobile robot using acoustic beacons,” *RO-BOMECH Journal*, 2015.
- [14] J.-H. Cho *et al.*, “A real-time obstacle avoidance method for autonomous vehicles using an obstacle-dependent gaussian potential field,” *Journal of Advanced Transportation*, 2018.
- [15] Y. Koren et J. Borenstein, “Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation,” dans *IEEE Conference on Robotics and Automation*, 7-12 avril 1991.
- [16] C. Rösmann, W. Feiten et T. Wösch, “Trajectory modification considering dynamic constraints of autonomous robots,” dans *ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics*, 2012. [En ligne]. Disponible : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6309484>
- [17] S. Kolski *et al.*, “Autonomous driving in structured and unstructured environments,” dans *Intelligent Vehicles Symposium*, Tokyo, Japan, 13-15 juin 2006.
- [18] S. Macenski *et al.*, “The marathon 2 : A navigation system,” dans *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020.
- [19] —, “Regulated pure pursuit for robot path tracking,” *Autonomous Robots*, 2023.
- [20] —, “From the desks of ros maintainers : A survey of modern & capable mobile robotics algorithms in the robot operating system 2,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 168, p. 104493, 2023.
- [21] S. Macenski, M. Booker et J. Wallace, “Open-source, cost-aware kinematically feasible planning for mobile and surface robotics,” *Arxiv*, 2024.
- [22] S. Girdhar, W. DONG et J. LoVerde, “Evaluation of astm and iso methods for measuring sound levels in building acoustics measurements,” dans *179th Meeting of the Acoustical Society of America*, 7-11 décembre 2020.
- [23] ASTM Standard E336 - 23, Standard Test Method for Measurement of Airborne Sound Attenuation between Rooms in Buildings.
- [24] ASTM Standard E1007 - 21, Standard Test Method for Field Measurement of Tapping Machine Impact Sound Transmission Through Floor-Ceiling Assemblies and Associated Support Structures.
- [25] M. Uehara, N. Ishikawa et S. Okawa, *Visualization of Distribution of Room Acoustic Parameters by Using Mobile Robot*. Universitätsbibliothek der RWTH Aachen, 2019.
- [26] E. Carmi, “Automated acoustic measurements in the anechoic chamber with a mobile robot,” mémoire de maîtrise, Department of Electrical and Electronic Engineering, California State University, Sacramento, California, 2018.

- [27] S. Macenski et I. Jambrecic, “Slam toolbox : Slam for the dynamic world,” *Journal of Open Source Software*, vol. 6, n°. 61, p. 2783, 2021.