

E.N.S.T

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا
Ecole Nationale Supérieure de Technologie



Department of Industrial
Engineering & Maintenance

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Supérieure de Technologie

Département de Génie Industriel et Maintenance

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de

Ingénieur d'état

Spécialité

Mécatronique

Thème

**Conception et réalisation d'un robot
d'inspection des canalisations**

Réalisé par

OUAICHOUCHE

Feriel &

CHELGHOU

Amina

Les membres de Jury :

Président	ZAOUI Abdelhalim	Professeur
Promoteur	KERROUCHI Slimane	Professeur
Co-encadrant	CHERIFI Tarek	Maître de conférences – Classe B
Examineur	KHOUDIR Marouani	Maitre de conférences – Classe A

Année universitaire 2022 -2023

Remerciements

Tout d'abord, nous exprimons notre gratitude à Allah le tout puissant pour nous avoir donné le courage, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce travail modeste.

Nous souhaitons remercier chaleureusement notre encadrant, M. Kerrouchi Slimane, et notre co-encadreur, M. Cherifi Tarek, pour leur soutien compétent, leur patience et leurs encouragements. Leur regard critique nous a été extrêmement précieux pour structurer notre travail et améliorer la qualité des différentes sections.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à l'équipe de l'entreprise Etrag pour leur contribution à la réalisation de ce projet. Nous souhaitons adresser nos remerciements spéciaux à M. Bilel Bouchaib et à M. Chaker Dmigha pour leur aide dans la conception du robot.

Nous remercions également M. Slimane Debabaa et M. Fouzi Maazi pour leurs efforts considérables lors de la réalisation des différentes pièces qui ont rendu notre étude concrète.

Nous exprimons notre immense gratitude au professeur de l'ENPC, M. Taha Bentchakar, pour ses conseils et le partage de connaissance à la fois sur les aspects mécaniques et électriques.

Nous tenons à remercier le professeur Zohir Hamoudi pour sa remarquable disponibilité à nous écouter, nous soutenir et nous guider de manière exceptionnelle.

Un grand remerciement aux personnes de la plateforme technologique de l'Université de Constantine 1 qui nous ont accueillis chaleureusement. Nous remercions tout particulièrement M. Younes Debah pour nous avoir facilité le travail à la plateforme, ainsi que M. Ait Oumeziane Rabeh, dont la contribution a été essentielle pour le succès de la partie électronique.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury d'avoir accepté de lire notre travail et de discuter de son contenu.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude chaleureuse à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce projet.

Dédicace

Je tiens à dédier ces mots chaleureux à ma merveilleuse famille et à celle de ma copine, Chelghoum Amina.

À mon père, tu es un pilier solide et un modèle d'intégrité. Ta sagesse, ta persévérance et ton amour inconditionnel nous inspirent chaque jour. Merci d'avoir été notre guide et notre protecteur.

À ma mère, tu es une source infinie de réconfort et de tendresse. Ton dévouement sans faille et ton amour incommensurable nous ont donné la force de réaliser nos rêves. Merci d'avoir été notre rocher et notre inspiration.

À mes frères, Sid Ahmed, Mehdi et Samy, vous êtes mes compagnons de route et mes complices. Votre soutien indéfectible, votre humour contagieux et votre confiance m'ont énormément aidé à cette réalisation. Merci d'avoir été mes alliés et mes meilleurs amis. Et à ma petite sœur, Fatima, tu es notre rayon de soleil. Ta joie de vivre, ta curiosité débordante et ton amour pur illuminent nos vies. Merci d'avoir été notre étoile et notre motivation.

À la famille de ma copine, Chelghoum Amina, vous avez été des anges gardiens tout au long de notre parcours. Votre soutien indéfectible, vos précieux conseils et votre générosité nous ont permis d'atteindre nos objectifs. Merci d'avoir été là pour nous, et de nous avoir donné votre amour et votre confiance.

Que cette dédicace soit le témoignage de notre gratitude éternelle envers vous tous. Vous êtes notre force, notre bonheur et notre inspiration. Nous sommes fiers de vous avoir à nos côtés, et nous chérissons chaque moment partagé ensemble. Que notre lien familial perdure toujours.

OUAICHOUCHE Ferial

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverai jamais à leur exprimer mon amour sincère.

à mon cher père Salim qui a toujours soutenu mes ambitions, apprécié mes efforts et qui a joué un rôle important dans la réalisation de ce projet.

A mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur ma mère Souad .

A ma chère sœur Sana qui n'a pas cessé de me conseiller, et m'encourager , à mes petite sœurs Asma et Rabeb .

A mon binôme Feriel avec qui j'ai passé une année formidable, et veillé des nuits à discuter et à créer notre mémoire, le fruit de nos efforts.

A tous mes camarades de ENPC et ENST et à ceux qui ont fait de ces cinq années d'études une expérience mémorable.

A tous mes proches et amis avec qui j'ai partagé les hauts et les bas. Merci d'être là, de me soutenir et de m'encourager à aller de l'avant, je suis tellement heureuse de vous avoir dans ma vie.

CHEGHOUM Amina

ملخص

يتعلق هذا المشروع بتصميم وتنفيذ روبوت لفحص خطوط الأنابيب، وهو عبارة عن جهاز ميكانيكي وإلكتروني مصمم لتفتيش الأماكن الخطيرة أو التي يصعب الوصول إليها ، يتحرك هذا الروبوت للكشف وتقييم حالة المرافق، مع توفير معلومات دقيقة بشكل أني .

في هذا العمل تم تطوير تصميم ميكانيكي و منه تم إنشاء نموذجين ميكانيكيين ، بالإضافة إلى إجراء مجموعة من الدراسات للتأكد من جودة الروبوت أيضا تم التكلم بالتفصيل عن طريقة التحكم في الروبوت و المعدات المستخدمة، بالإضافة إلى إجراء بعض المحاكاة .

بعد انتهاء مرحلة التصميم، تم تصنيع الأجزاء الميكانيكية وتجميعها مع الأجزاء الإلكترونية، وذلك للحصول على نظام متكامل وقابل للتشغيل.

الكلمات المفتاحية :

روبوت تفتيش ، خطوط الأنابيب ، تصميم ، تحكم ، تفتيش صوري ، روبوت متحرك .

Résumé

Ce projet porte sur la conception et la réalisation d'un robot d'inspection des pipelines qui représente un dispositif mécanique et électronique conçu pour inspecter des environnements inaccessibles ou dangereux. Il se déplace, détecte et évalue l'état des installations, fournissant des informations précises en temps réel.

L'étude débute par une revue de l'état de l'art du système, permettant ainsi de prendre connaissance des avancées et des technologies existantes dans ce domaine. Ensuite, une conception mécanique est élaborée, aboutissant à la création de deux prototypes. Ces prototypes font l'objet d'une étude cinématique approfondie ainsi que d'une analyse de résistance des matériaux (RDM).

Par la suite, la commande du robot et les équipements utilisés sont détaillés, accompagnés de simulations et de codes de commande. Une attention particulière est accordée à l'optimisation de la commande pour assurer un fonctionnement fluide et précis du robot. Une fois la phase de conception terminée, le système mécanique est fabriqué et l'assemblage électronique est réalisé, permettant ainsi d'obtenir un système complet et opérationnel.

Ce projet représente une avancée significative dans le domaine de l'inspection des pipelines, offrant des solutions innovantes et fiables pour garantir l'intégrité et la sécurité de ces infrastructures vitales.

Mots clés Robot d'inspection , Pipelines, conception , contrôle , Inspection Visuelle , Robot mobile .

ABSTRACT

This project focuses on the design and development of a pipeline inspection robot, which is a mechanical and electronic device designed to inspect inaccessible or hazardous environments. It moves, detects, and assesses the condition of installations, providing accurate real-time information.

The study begins with a review of the state-of-the-art system, allowing for an understanding of the advancements and existing technologies in this field. Next, a mechanical design is developed, resulting in the creation of two prototypes. These prototypes undergo a detailed kinematic study and a strength analysis of material.

Subsequently, the robot control and the equipment used are detailed, accompanied by simulations and control codes. Special attention is given to optimizing the control to ensure smooth and precise operation of the robot. Once the design phase is completed, the mechanical system is manufactured, and the electronic assembly is carried out, resulting in a complete and operational system.

This project represents a significant advancement in the field of pipeline inspection, offering innovative and reliable solutions to ensure the integrity and safety of these vital infrastructures.

KEYWORDS Inspection Robot, Pipelines, Design, Control, Visual Inspection, Mobile Robot

Table des matières

	Page
ABSTRACT	v
Chapitre 1: Généralités	3
1.1 Inspection des pipelines	3
1.2 Généralités sur les robots d'inspection	5
1.3 La vision dans les robots d'inspection	6
1.4 La locomotion	7
1.5 Localisation	9
1.6 Communication en temps réel	10
1.7 La détection	11
1.8 La manutention	13
1.9 Analyse fonctionnelle	13
1.10 Objectif du PFE	15
1.11 Conclusion	15
Chapitre 2: Conception du robot d'inspection	17
2.1 Cahier de charge	17
2.2 Conception et approche de base	19
2.3 Premier prototype	19
2.4 Deuxième prototype	21
2.5 Étude cinématique	24
2.6 Calcule de forces	26
2.7 Etude RDM	27
2.8 Commande et équipements électronique	29
2.9 Simulation des moteur sur proteus	32

2.10 Schéma électronique de la conception	33
2.11 Code commande	34
2.12 Code inspection	35
2.13 Interface de l'application mobile	36
2.14 Conclusion	39
Chapitre 3: Réalisation du robot d'inspection	40
3.1 Fabrication des différentes pièces du robot	40
3.2 Choix du matériaux et usinage	41
3.3 Pièces fabriquées	43
3.4 Les outils de contrôles	45
3.5 L'assemblage mécanique	46
3.6 Montage des composants électroniques	47
3.7 Tests et résultats	49
3.8 Conclusion	51
REFERENCES	54

Introduction générale

Depuis toujours, l'humanité a constamment aspiré à se libérer des tâches épuisantes, dangereuses et pénibles. Les avancées technologiques ont partiellement répondu à cette aspiration au fil des décennies, avec l'utilisation de l'ordinateur pour les tâches intellectuelles et des robots pour les travaux physiques. Cependant, il existe encore un énorme potentiel d'amélioration et de développement de la robotique mobile [1].

La mécatronique, qui intègre les fonctions, les composants et les structures parallèles, est en constante évolution. Au 21^e siècle, de nouveaux produits émergent dans divers secteurs tels que la médecine, la fabrication industrielle, les applications domestiques, le génie civil et le transport. Dans ce dernier domaine, la robotique mobile a connu une croissance remarquable, en particulier avec l'utilisation de robots pour éliminer l'intervention humaine dans des zones dangereuses ou difficilement accessibles, comme les pipelines [2], [3].

Les pipelines jouent un rôle essentiel dans le transport de divers fluides tels que l'eau, le pétrole, le gaz et les produits chimiques. Ils représentent des infrastructures critiques qui permettent de répondre aux besoins de notre société moderne en matière d'énergie, d'eau et de ressources [4]. Cependant, ces infrastructures sont soumises à des contraintes constantes telles que la corrosion, la pression, les mouvements de terrain et les conditions environnementales. Ces facteurs peuvent entraîner des fuites, des dommages ou des défaillances structurelles, compromettant ainsi la sécurité et l'efficacité des pipelines [5].

Dans ce contexte, l'inspection régulière des pipelines est devenue une nécessité. Il est ainsi essentiel de détecter les problèmes potentiels et de prendre des mesures correctives avant qu'ils ne deviennent critiques [6]. Les méthodes d'inspection traditionnelles, telles que l'inspection manuelle ou l'utilisation de dispositifs autonomes de nettoyage et d'inspection, présentent des limitations importantes, elles sont souvent coûteuses, chronophages, peu fiables et peuvent nécessiter l'arrêt de l'activité des pipelines pendant l'inspection. De plus, certaines parties des pipelines sont difficiles d'accès pour les humains, notamment les zones courbées, les intersections, les parties enterrées ou immergées, rendant l'inspection traditionnelle pratiquement impossible [7], [8].

C'est pourquoi l'utilisation de robots d'inspection dans les pipelines est devenue une solution de plus en plus populaire et efficace. Les robots d'inspection peuvent se déplacer à l'intérieur des pipelines, effectuer des mesures, détecter les défauts, prendre des images et des vidéos, et transmettre ces informations en temps réel aux opérateurs. Ils sont capables d'accéder à des endroits difficiles, d'inspecter de longues distances de manière continue et de réduire considérablement le temps et les coûts associés à cette tâche.

C'est dans ce contexte que vient l'objectif du présent travail, ainsi, dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous visions la conception et la réalisation d'un robot d'inspection de pipelines. Ce robot aura la capacité de se déplacer à l'intérieur des canalisations, d'effectuer des mesures et d'inspecter l'état des infrastructures. Notre objectif est de créer un système fiable, précis et adaptable, capable de s'ajuster à différentes tailles et formes de pipelines, tout en fournissant des images claires et détaillées de l'état de telles installations.

En adoptant une approche électronique et de programmation, nous avons choisi d'utiliser une carte électronique Arduino pour notre robot. Cette carte offre une flexibilité et une facilité de programmation, permettant de contrôler les mouvements et les capteurs du robot à distance à travers un application Androïde. Nous développerons également une mécanique spécifiquement adaptée aux caractéristiques des pipelines, en intégrant une caméra pour capturer des images et des vidéos de haute qualité.

La structure de notre mémoire est organisée en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous effectuons une analyse approfondie de l'état de l'art de l'inspection des pipelines, en examinant les développements technologiques, les techniques de détection des défauts, ainsi que les systèmes de contrôle et de communication utilisés dans l'inspection robotisée. Nous soulignons l'importance de l'inspection des pipelines et les avantages offerts par l'utilisation de robots d'inspection.

Dans le deuxième chapitre, nous aborder la conception technique de notre robot d'inspection de pipelines, en décrivant les décisions de conception prises et en présentant le système de contrôle que nous avons développé pour garantir que le robot se déplace avec précision à l'intérieur des pipelines. Nous discuterons également des capteurs utilisés et de leur intégration dans le système.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous détaillerons la construction réelle de notre robot d'inspection. Nous expliquerons les processus, les outils et les matériaux nécessaires à sa construction, en mettant l'accent sur l'assemblage mécanique et électronique. Nous présenterons également les résultats obtenus lors des tests et des simulations, en discutant des performances du robot et des améliorations potentielles.

Notre projet vise à contribuer au domaine de l'inspection des pipelines en proposant une solution robotique innovante et adaptable aux cahiers des charges spécifiques. Nous espérons que notre travail servira de base pour de futures recherches et développements dans ce domaine, contribuant ainsi à l'amélioration continue de la sécurité et de l'efficacité des pipelines. En combinant les avancées en mécanique, en électronique et en informatique, nous aspirons à ouvrir de nouvelles perspectives pour l'inspection des pipelines.

Chapitre 1

Généralités

1.1 Inspection des pipelines

L'inspection des canalisations revêt d'une grande importance pour garantir leur bon fonctionnement, le transport et prévenir les problèmes potentiels. Pour cela, différentes méthodes d'inspection sont utilisées, allant de l'inspection visuelle directe à des techniques plus avancées telles que l'inspection par ultrasons, la thermographie et la détection de fuites par flux magnétique. Chaque méthode présente des avantages et des limitations spécifiques, et le choix de la méthode dépend de facteurs tels que la taille des canalisations, les conditions environnementales et les objectifs de l'inspection [4], [3].

L'inspection basée sur les ultrasons a été développée par Beller [9], des émetteurs et des capteurs acoustiques sont utilisés pour détecter les défauts et mesurer l'épaisseur de la paroi du tuyau. Lorsqu'il y a des défauts, des fluctuations sont observées. Les ultrasons traversent le matériau et rebondissent sur la paroi extérieure du tuyau. En mesurant les distances entre la paroi avant et la paroi arrière, le récepteur peut surveiller cet écho et déterminer l'épaisseur du tuyau. Cette méthode permet un contrôle à la fois à l'intérieur et à l'extérieur du tuyau.



FIG. 1.1 – Fig : Inspection avec L'ultrason

Une autre méthode d'inspection est utilisée est celle basée sur les MFL (Magnetic Flux Leakage). En utilisant cette méthode, il est possible de trouver des discontinuités de surface dans tout matériau ferro-magnétique. La fuite de flux magnétique provoquée par ces discontinuités peut être utilisée pour localiser les défauts .

La distribution de la ligne de flux est uniforme si le tuyau est sans défaut, mais si le tuyau a un défaut, la distribution de la ligne de flux est perturbée. On peut identifier si le problème est interne ou externe en fonction de la localisation de la perturbation ou de la perte magnétique. Les régions endommagées modifient la résistance du circuit magnétique fermé au flux magnétique, ce qui modifie la quantité de flux qui fuit dans l'atmosphère [9].



FIG. 1.2 – Fig : Inspection avec MFL

L'inspection visuelle ou l'examen visuel direct des surfaces internes des canalisations à l'aide de caméras ou d'autres équipements d'imagerie est largement utilisée. Lors de ce procédé, les fuites, les dommages, les obstructions et d'autres problèmes éventuels sont détectés visuellement. Elle offre une vision en temps réel de l'état des canalisations, permettant ainsi de prendre des mesures correctives rapidement et précisément.



FIG. 1.3 – Fig : Inspection Visuelle à l'aide d'une caméra

1.2 Généralités sur les robots d'inspection

L'inspection robotisée des pipelines est essentielle pour maintenir l'intégrité et la sécurité des pipelines. Ces robots sont spécialement conçus pour naviguer à travers l'intérieur des pipelines et examiner et évaluer leur état. Grâce aux avancées dans les technologies de robotique et de capteurs, les robots d'inspection des pipelines sont désormais plus performants et capables de détecter les défauts, la corrosion et autres irrégularités au sein du système de pipeline [10].

L'objectif principal des robots d'inspection des pipelines est de fournir des informations précises et détaillées sur l'état du pipeline, contribuant ainsi à prévenir les fuites, les ruptures ou les défaillances. Les caméras, les capteurs ultrasoniques, les capteurs magnétiques et les scanners laser dont ces robots sont équipés leur permettent de prendre des photos haute résolution et de recueillir des informations sur l'état interne du pipeline.



FIG. 1.4 – Fig : Robots d'inspections

L'un des principaux avantages des robots d'inspection des pipelines est leur capacité à accéder aux zones difficiles d'accès et à naviguer à travers des pipelines de différents diamètres et configurations. Ils peuvent parcourir de longues distances à l'intérieur du pipeline, souvent propulsés par des mécanismes tels que des roues, des chenilles ou même

en utilisant des principes magnétiques ou électromagnétiques pour se déplacer. Cette mobilité et cette manœuvrabilité permettent aux robots d'inspecter des sections critiques du pipeline qui sont inaccessibles ou difficiles à atteindre [6].

1.3 La vision dans les robots d'inspection

La vision représente la capacité du robot d'inspection à percevoir et à interpréter son environnement intelligemment en collectant des informations visuelles à l'aide des capteurs et des systèmes de vision artificielle afin de fournir des quantités massives de données qui aident par la suite à prendre des décisions et produire des rapports détaillés en temps réel [1].

Les robots d'inspection à vision avancée peuvent inclure des fonctions telles que la reconnaissance d'objets, la cartographie 3D et la détection de mouvement. Ils peuvent également être équipés des caméras de haute résolution qui peuvent capturer des photos et des vidéos détaillées de l'intérieur des conduits

Les professionnels peuvent également visualiser avec précision l'état des conduits, identifier les problèmes potentiels et prendre les mesures appropriées pour la maintenance et les réparations en utilisant ces dispositifs. Voici quelques caractéristiques clés des caméras haute résolution utilisées dans les d'inspection :

Haute résolution : Cela permet aux opérateurs d'examiner minutieusement le pipeline et d'identifier les plus petits problèmes et bugs.

Pivotantes ou multidirectionnelles : Elles peuvent offrir une vision à 360 degrés et permettre une inspection complète des canalisations

Fonction zoom : Elles permettent de zoomer ou dézoomer sur l'image. Ceci est particulièrement utile dans les cas où toutes les zones ou défauts identifiés comme suspects doivent être examinés

Connectivité et enregistrement : elles peuvent envoyer à un ordinateur ou à un système d'enregistrement qui stocke, des images et des vidéos prises pendant l'examen dans le but de les utiliser pour l'analyse d'images ultérieurement.

Pour avoir une bonne vision et afin de fournir des photos nettes et claires, les robots d'inspection ont généralement un éclairage intégré à base de diodes électroluminescentes. Ces LED sont incontestablement bénéfiques pour les environnements industriels exigeants. Grâce à cet éclairage intégré le robot d'inspection peut identifier avec précision les détails des tuyaux comme les fissures, les fuites et les obstructions . qui facilite la prise de décisions concernant les réparations nécessaires car il permet aux opérateurs de mieux identifier et évaluer les problèmes potentiels. De plus, la technologie d'éclairage intégrée

peut être modifiée pour répondre à des exigences d'inspection particulières.

1.4 La locomotion

Les robots d'inspection des conduites sont généralement compacts pour naviguer facilement à travers les conduits étroits. Ils sont souvent conçus de manière modulaire, ce qui leur permet d'être adaptés aux divers types de conduite. Voici un aperçu des caractéristiques et des fonctionnalités courantes des robots d'inspection des canalisations :

Robots à chenilles : Les robots possèdent des chenilles qui leur permettent de se déplacer dans des canalisations droites, courbées ou même en spirale. Les robots à chenilles sont excellents pour la maniabilité et la navigation dans des environnements complexes. [1]



FIG. 1.5 – Robot à chenilles

Robots à roues : Ces robots sont équipés de roues qui leur permettent de se déplacer dans les canalisations de plus grande taille, comme les égouts pluviaux ou les grandes conduites d'eau. Ils sont souvent utilisés dans les canalisations de plus de 200 mm de diamètre.

Robots serpentins : Les robots sont agiles et peuvent se faufiler à travers des tuyaux courbes et étroits. Ils sont souvent utilisés sur de petits tuyaux, tels que les conduites d'égout résidentielles ou les tuyaux de plomberie.

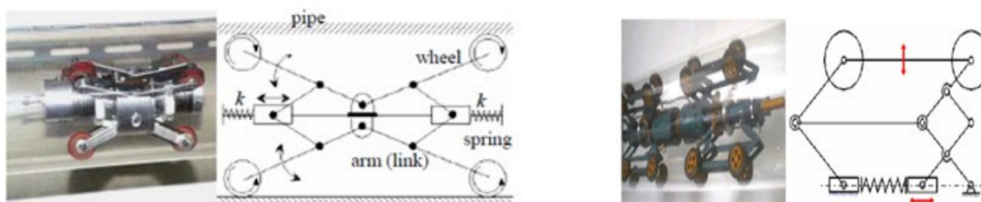
Robots volants : Équipés d'appareils volants tels que des drones, ces robots peuvent survoler des pipelines et atteindre des endroits autrement difficiles d'accès. Ils sont utilisés pour inspecter des pipelines à haute altitude ou dans des infrastructures complexes.



FIG. 1.6 – Robot volant

Micro-robots : Les micro-robots sont des dispositifs robotiques minuscules conçus pour naviguer dans des espaces étroits ou des pipelines de petit diamètre. Ils sont équipés de capteurs et de caméras pour capturer des images et collecter des données et peuvent être contrôlés à distance ou de manière autonome. Il existe plusieurs types de mini-robot mobile selon sa structure et ses fonctions citant : MRINSPECT I, MRINSPECT II, **MRINSPECT I** : est équipé de six mécanismes à manivelle coulissante avec une transmission par courroie et une roue motrice alimentée par un moteur à courant continu. Celui-ci ne fonctionne pas avec la jonction en T, mais il peut fonctionner avec un tuyau horizontal, un tuyau vertical et une partie de type coude.

MRINSPECT II : se déplace dans le sens radial, réduisant les forces de distorsion.[3],[4]



MRINSPECT I

MRINSPECT II

FIG. 1.7 – Fig :Micro-robots

Robots captifs : les robots d'inspection captifs sont connectés à une source

d'alimentation externe et à une unité de contrôle via des câbles ou des cordons ombilicaux. Les câbles assurent la transmission de l'alimentation et des données tout en contrôlant le robot à distance. Ce type de robot est souvent utilisé dans les inspections à longue distance ou les occasions qui nécessitent un contrôle en temps réel et un retour de données.

Robots racleurs (ou racleurs intelligents) : sont des appareils conçus pour inspecter les pipelines, en particulier dans l'industrie pétrolière et gazière. Ils ont une forme cylindrique et sont insérés dans la canalisation. Le flux du produit les transporté. Les racleurs intelligents utilisent une variété de capteurs pour détecter et mesurer les défauts de pipeline, la corrosion, l'épaisseur des parois et d'autres anomalies.

Robots d'inspection multi-capteurs : Ces robots sont équipés d'une variété de capteurs, notamment des capteurs à courants de Foucault, des ultrasons, des capteurs de fuite de flux magnétique (MFL) or des caméras. Les capteurs détectent les défauts, la corrosion, les fissures et d'autres problèmes dans les parois du pipeline en produisant divers types de données[2][11]

Voici un tableau récapitulatif des types de locomotions existants :

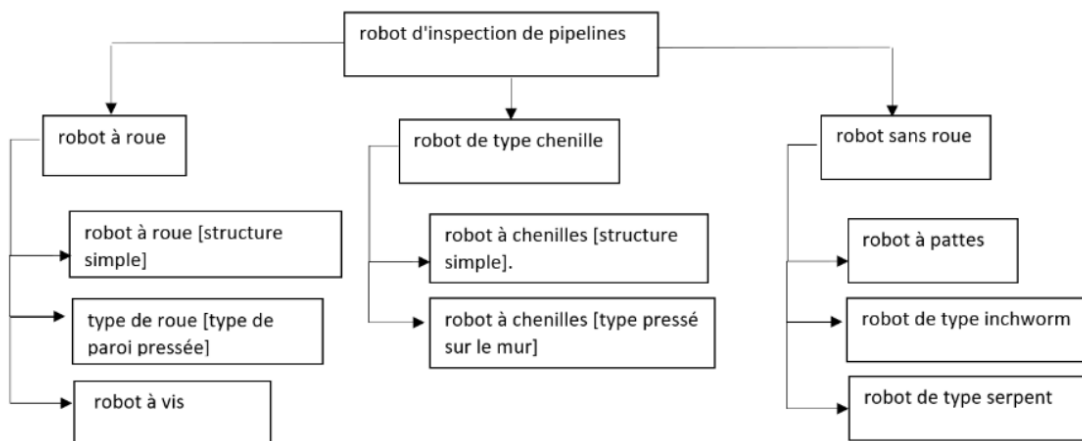


FIG. 1.8 – Fig :Type de locomotion

1.5 Localisation

Les robots d'inspection des pipelines sont généralement équipés de systèmes de suivi pour déterminer leur position exacte. et permettre à l'opérateur de surveiller et de cartographier le mouvement du robot dans le pipeline. ainsi de localiser les défauts et les anomalies de la structure tels que les fissures, les blocages et les points faibles et d'évaluer leur emplacement précis.[1]

Il existe diverses technologies de localisation, citant localisation par capteurs inertiels, qui utilise des capteurs tels que les accéléromètres et les gyroscopes pour mesurer les

mouvements et les changements d'orientation du robot . Après cela, les données sont exploitées pour calculer la position et l'orientation du robot par rapport à un point de référence. L'utilisation de marqueurs ou de balises placés à des emplacements connus le long de la canalisation est une autre méthode de localisation.

Le robot utilise des capteurs spécifiques, tels que des caméras ou des capteurs magnétiques, pour détecter ces marqueurs et utiliser ces informations pour trianguler la position.

Certains robots peuvent également intégrer des systèmes de localisation basés sur des technologies telles que le GPS (système de localisation globale) ou le LIDAR (système de détection et de réglage de la lumière). Cependant, l'utilisation de ces technologies peut être limitée dans les conduites souterraines ou les espaces restreints.

Des chercheurs présente une méthode de localisation en ligne basée sur le son pour un robot serpent en pipeline équipé d'une unité de mesure inertielle (IMU). les chercheurs ont développé une approche qui utilise un microphone sur le robot et un haut-parleur à l'entrée du pipeline. La distance entre eux est estimée en mesurant le temps de vol (ToF) d'un son de référence émis par le haut-parleur. En combinant la distance obtenue par le ToF et l'orientation estimée par l'IMU, cette méthode de localisation en ligne basée sur le son permet d'estimer simultanément la position du robot et la carte du pipeline. Les résultats expérimentaux ont démontré une erreur d'estimation de distance inférieure à 7pur cent et une précision de la carte du pipeline supérieure à 68,0 pour cent .[11]



FIG. 1.9 – Fig :snake robot

1.6 Communication en temps réel

Les robots d'inspection de tuyaux modernes sont généralement équipés d'une technologie de communication sans fil qui permet la transmission en temps réel des

données d'inspection afin d'effectuer une analyse immédiate des données collectées, ce qui permet aux opérateurs de visualiser des images et des vidéos en direct impliquant une prise de décision rapide. Ceci est particulièrement utile dans les situations qui nécessitent une réponse rapide, telles que la détection de fuites ou de ruptures dans les tuyaux. De plus, le transfert en temps réel nécessite une infrastructure de communication robuste et fiable. En fonction de l'environnement d'inspection spécifique, des technologies sans fil telles que le Wi-Fi, des réseaux cellulaires ou des réseaux ad hoc peuvent être utilisées. Ce qui va permettre une collaboration à distance entre les opérateurs et les experts. Les experts peuvent accéder dans ce cas à distance aux données d'inspection et apporter leur expertise pour fournir des conseils même si les parties sont géographiquement éloignées.[12]

1.7 La détection

La détection effectuée par les robots d'inspection consiste à identifier les problèmes ou les défauts présents dans la structure ou le pipeline inspecté lorsque le robot d'inspection est physiquement présent [13].

Logiciel d'analyse d'images : Les images et les vidéos prises par le robot d'inspection des eaux usées peuvent être analysées à l'aide d'un logiciel dédié. Ce logiciel utilise souvent des techniques d'apprentissage automatique et de vision par ordinateur pour détecter les défauts, les fissures, les fuites ou d'autres problèmes potentiels dans les pipelines.

Voici quelques-unes des fonctionnalités courantes que l'on peut trouver dans ces logiciels :

Détection des défauts : Le logiciel d'analyse d'images peut détecter automatiquement les défauts tels que les fissures, les déformations, les mauvaises connexions et les pénétrations de racines. Ils utilisent des algorithmes de vision par ordinateur pour analyser des images et identifier les zones problématiques.

Localisation et mesure des défauts : Dès qu'un défaut est détecté, le logiciel peut localiser son emplacement dans la canalisation. qui peut également mesurer la taille et l'étendue des défauts pour évaluer leur gravité.

Détection des fuites : En examinant les variations de couleur ou les changements de texture sur des photos, les logiciels d'analyse d'images peuvent détecter des fuites dans les canalisations. Cela permet de repérer les problèmes d'étanchéité et de mettre en œuvre des actions préventives.

Reconnaissance de motifs : Certains logiciels utilisent des modèles d'apprentissage automatique pour reconnaître les motifs récurrents dans les captures des canalisations. Cela peut aider à identifier les défauts spécifiques fréquents et à prévoir d'autres problèmes similaires.

Plusieurs chercheurs se sont attelés à développer différentes techniques de détection de défauts. Certains d'entre eux ont créé un système de détection de défauts pour les conduites sous pression en utilisant un système de réseau à ultrasons. Ce système a été intégré à un robot mobile équipé d'une force motrice pour se déplacer. De plus, le robot est équipé d'une caméra permettant de prendre des photos de l'intérieur des conduites ainsi que d'un système de réseau à ultrasons pour repérer d'éventuels défauts dissimulés .[14] Le système basé sur un robot développé était en mesure de se déplacer à travers les conduites, tandis que la technique du réseau à ultrasons en mode phased array permettait de scanner et de détecter la surface interne, tout en améliorant l'efficacité de l'inspection des conduites sous pression.

D'autres chercheurs ont développé un robot d'inspection de pipelines destiné à la détection de défauts et à une inspection visuelle approfondie. Tout d'abord, le système est capable de se déplacer à l'intérieur de pipelines horizontaux d'un diamètre minimal de 150 mm, et il peut également parcourir des pipelines inclinés jusqu'à 30°. Deuxièmement, il offre des fonctionnalités de retour d'information en direct et de surveillance pour l'utilisateur. Troisièmement, le robot peut détecter les obstacles à l'intérieur du pipeline en utilisant un capteur à ultrasons. Enfin, le système d'inspection de pipeline peut effectuer une inspection visuelle à l'intérieur du pipeline en utilisant la caméra du robot mobile, ce qui permet de capturer des images pour localiser les défauts et surveiller l'état interne en vue d'une inspection ultérieure. Il réalise ces opérations de manière nettement plus rapide que les inspecteurs humains.[15]

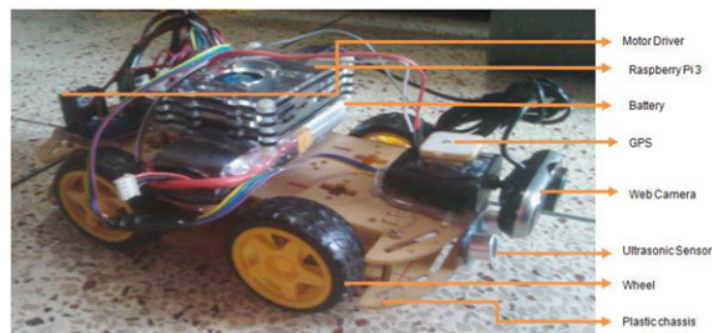


FIG. 1.10 – Robot

D'autres chercheurs ont mis au point un robot doté d'une structure à la fois nouvelle et simple dans le but de fournir un flux vidéo en temps réel de l'intérieur des conduites, avec une indication de la localisation. La technologie de traitement d'images était utilisée en ligne pour détecter toute anomalie à l'intérieur de la conduite, tandis que les informations visuelles étaient traitées ultérieurement hors ligne afin d'obtenir des informations plus

approfondies sur l'intérieur de la conduite en vue de l'entretien requis. [16]

Rapports d'inspection détaillés : Les robots d'inspection peuvent générer des rapports détaillés qui récapitulent les résultats de l'inspection avec des photos, des vidéos, des mesures et des annotations. Ces rapports aident les équipes d'entretien à évaluer l'état des canalisations et à planifier des réparations ou des travaux de maintenance. En addition, les mesures des capteurs du robot peuvent être intégrées dans le rapport, fournissant des données précises sur des paramètres tels que la profondeur, la température ou la pression. Ces données supplémentaires aident à évaluer l'étendue des problèmes identifiés et à sélectionner les travaux de réparation ou d'entretien.

1.8 La manutention

Les robots d'inspection des canalisations sont souvent conçus pour être portables et faciles à manipuler afin de permettre un déploiement rapide et efficace sur le terrain. Lors de la manutention des robots d'inspection des pipelines, Il est important de suivre les procédures de sécurité appropriées pour éviter les dommages et assurer la sécurité des opérateurs et des passants : Citant ci-après quelques types :

a. Transport manuel : Les opérateurs peuvent déplacer manuellement des robots plus petits et plus légers. Ils sont généralement dotés de poignées, de sangles ou d'un système de transport intégré pour faciliter les déplacements.

b. Transport par chariot : certains robots d'inspection des canalisations sont spécialement conçus pour être montés sur des chariots ou des remorques. Pour faciliter le transport sur le terrain, ces chariots sont équipés de roues ou de rails. Lorsque la distance parcourue est longue ou que les conditions de terrain sont difficiles, cette méthode est fréquemment utilisée.

c. Utilisation de véhicules spéciaux : Les robots d'inspection des canalisations peuvent être transportés par des véhicules spécialement équipés. Pour faciliter le chargement et le déchargement du robot, ces véhicules peuvent être équipés de grues, de treuils ou d'autres mécanismes de levage.

1.9 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle a pour but de comprendre et décrire les fonctions d'un système, en mettant l'accent sur les besoins, les attentes et les contraintes des utilisateurs. Elle permet d'identifier les différentes fonctions principales et les sous-fonctions nécessaires à la réalisation du système, ainsi que les relations et les interactions entre ces fonctions.

Diagramme de pieuvre Le diagramme pieuvre, également appelé graphe des

interactions, est un schéma utilisé pour visualiser la relation entre un produit ou un service et son environnement. Il est souvent utilisé dans le cadre de la méthode APTE (Application aux Techniques d'Entreprise). Ce diagramme permet de représenter les différentes fonctions de service fournies par le produit et de mettre en évidence les interactions entre ces fonctions et les éléments de l'environnement

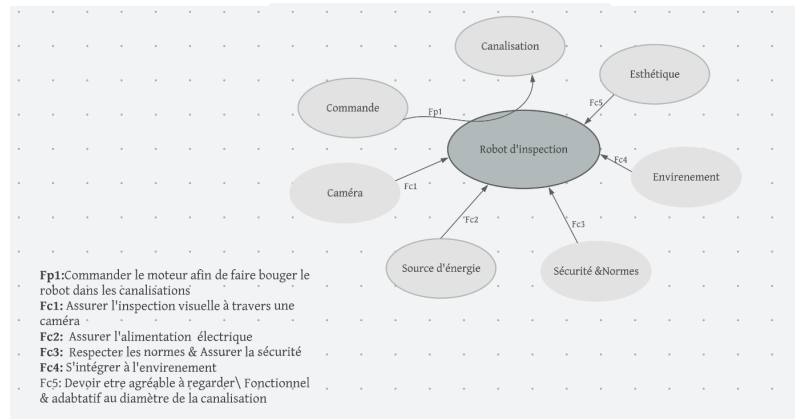


FIG. 1.11 – Diagramme de pieuvre

Diagramme FAST Il permet de décomposer les fonctions principales en sous-fonctions et de visualiser leur interdépendance. Le diagramme FAST utilise des flèches pour représenter les relations fonctionnelles, des blocs pour représenter les fonctions principales et des lignes pour indiquer les liens entre les fonctions. Ce diagramme aide à comprendre la hiérarchie et l'interaction des fonctions d'un système, ce qui facilite la conception et l'optimisation du système en identifiant les relations critiques entre les différentes fonctions.

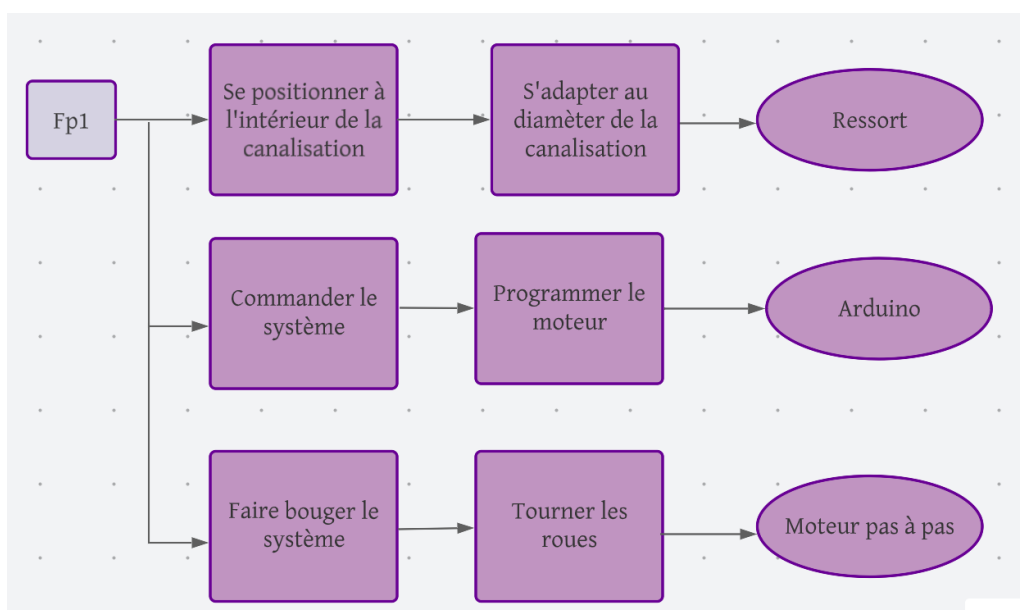


FIG. 1.12 – Diagramme FAST

Diagramme SADT I est un outil de description graphique utilisé dans l'analyse fonctionnelle descendante. Il permet de représenter les différentes fonctions d'un système complexe en partant du général pour aller au particulier, de visualiser et d'analyser la structure fonctionnelle d'un système de manière claire et organisée, facilitant ainsi la compréhension de son fonctionnement global

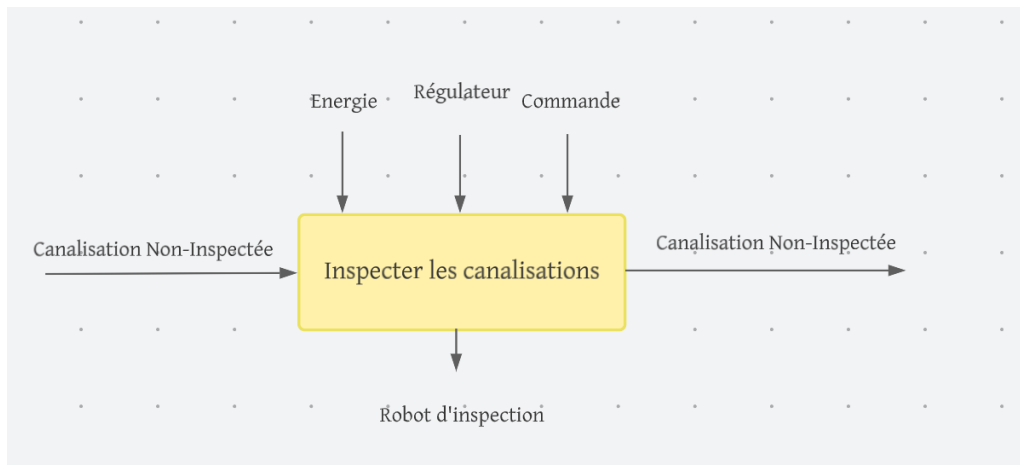


FIG. 1.13 – Diagramme SADT

1.10 Objectif du PFE

L'objectif principal de ce mémoire de fin d'étude est de développer un robot capable d'effectuer des inspections précises des canalisations afin d'améliorer leur efficacité et leur fiabilité.

Pour parvenir à cette fin, nous devons prendre en compte les aspects mécaniques, électroniques et logiciels, ainsi que l'intégration des capteurs et des composants appropriés et le contrôle nécessaire. Cependant, ce processus présente plusieurs défis auxquels nous devons faire face et surmonter.

De plus, ce mémoire s'inscrit dans une volonté de contribuer activement à l'avancement technologique dans le domaine. Il représente notre vision initiale qui ouvrira de nouvelles perspectives de recherche et pourra inspirer d'autres travaux futurs.

1.11 Conclusion

À travers ce chapitre, nous explorons divers aspects clés qui jouent un rôle essentiel dans le domaine de l'inspection robotique des pipelines. Nous abordons notamment la vision, la locomotion, la localisation, la communication en temps réel, la détection, la manutention et l'analyse fonctionnelle. L'objectif principal de ce chapitre est de fournir une compréhension approfondie des éléments fondamentaux entourant les robots

d'inspection de pipelines. En offrant une vue d'ensemble complète de ces différents domaines

Chapitre 2

Conception du robot d'inspection

La conception des robots d'inspection combine la robotique, l'automatisation, la mécanique, l'électronique et les capteurs pour développer des robots capables d'effectuer des inspections précises, fiables et sécurisées dans des environnements difficiles ou dangereux. Ces robots améliorent la maintenance, la sécurité et la durabilité des infrastructures et installations industrielles.

2.1 Cahier de charge

Le robot d'inspection des canalisations est conçu pour effectuer des inspections régulières des réseaux de canalisations, qu'ils soient d'assainissement, industriels ou autres. Son objectif principal est de détecter les dommages, les blocages, les fuites et d'autres problèmes afin de prévenir les pannes, les accidents et les perturbations des réseaux de canalisations.

En établissant ce cahier des charges, nous visons à définir clairement les caractéristiques techniques, les fonctionnalités, les performances et les critères de sécurité attendus du robot.

TABLE 2.1 – Cahier de charge

Objectifs	Concevoir un robot d'inspection des canalisations capable de se déplacer à l'intérieur des conduits afin d'évaluer l'état des canalisations , détecter les fuites, les obstructions, les dommages ou d'autres problèmes éventuels.
Critères spécifiques	Fiabilité et précision Facile à utiliser et à maintenir
Caractéristiques physiques et fonctionnelles	Compact en taille et en forme Il doit avoir un système de propulsion robuste et efficace. Le robot doit être équipé d'une caméras haute résolution Le robot doit avoir un éclairage intégré. Le robot nécessite une source d'énergie autonome.
Spécifications techniques	Dimensions : le robot peut avoir une longueur de 500 mm à 800 mm et un diamètre de 350mm à 450 mm Poids : Le poids du robot varie de 8 à 12 kg. Mobilité : Le robot est équipé de roues qui peuvent être rétractables ou extensibles pour s'adapter aux dimensions spécifiques de la canalisation à l'aide d'un mécanismes d'ajustement en utilisant un Moteur pas à pas pour le contrôler Stabilité et adhérence : Les roues sont conçues pour offrir une bonne adhérence et stabilité à l'intérieur de la canalisation, tout en maintenant une bonne traction. Vitesse : le robot peut se déplacer avec une vitesse entre 0.05 m/s et 0.30 m/s Matériau : utilisation d'Aluminium , Acier, et de Bronze
Interface utilisateur	Commandes :La commande des moteurs pas à pas via un module Bluetooth sur une plateforme Arduino. Écran et affichage :Une application Android qui permet de gérer le mouvement de robot
Communication	Transmission des données : avec fil
Maintenance et support	Nettoyage régulier : Suivre des instructions de nettoyage appropriées pour les composants du robot. Vérification des connexions : : Vérifier régulièrement les connexions électriques et mécaniques du robot. Vérification des performances : Réaliser des tests et des vérifications pour s'assurer du bon fonctionnement du robot. Remplacement des pièces d'usure : Identifier les pièces sujettes à l'usure et planifier leur remplacement régulier.
Environnement du travail	Le robot doit pouvoir fonctionner à l'intérieur de canalisations situées dans des bâtiments, des complexes industriels, des tunnels ou d'autres infrastructures souterraines.

2.2 Conception et approche de base

Pour poser les bases et établir une vision claire de nos objectifs, une étape préliminaire cruciale a été effectuée en faisant une recherche approfondie sur les conceptions existantes dans le domaine. En effet, et en examinant les différentes conceptions existantes dans le marché, nous avons pu identifier et étudier ce qui peut être considéré comme une approche de base pour proposer une conception et une réalisation personnalisée de notre produit technologique à savoir un robot ayant pour tâche l'inspection de l'état interne des canalisations hydrauliques de dimensions comprises entre 350 et 450 mm, et cela comme première étape.

Pour cela, une étude bibliographique exhaustive nous a permis d'assimiler d'une manière efficace les fonctionnalités clés et les défis techniques associés qui nous ont inspiré dans les différentes étapes de la réalisation de notre système. A partir de là, nous avons pu proposer une solution moins contraignante et novatrice pour répondre aux besoins spécifiques comme nous le verrons par la suite de ce manuscrit.

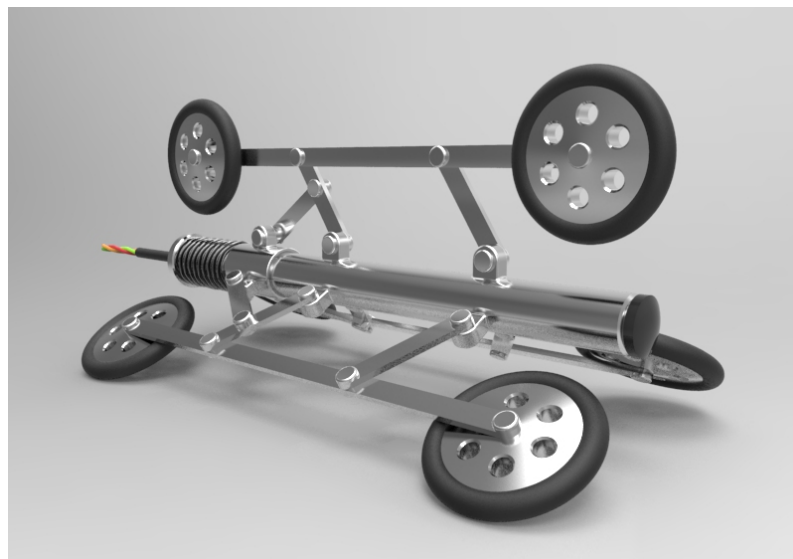


FIG. 2.1 – Fig : Conception de base

Cette conception présente un inconvénient majeur en ce qu'elle ne permet pas de se déplacer efficacement dans des trajectoires coudées. Cela limite considérablement sa capacité à naviguer dans des environnements complexes et à contourner les obstacles de manière fluide. A partir de cette problématique on a conçu notre premier prototype

2.3 Premier prototype

Nous avons commencé par concevoir un design de base dans SOLIDWORKS, le robot est ainsi composé de six mécanismes coulissants distincts montés sur un tube central.

Chaque mécanisme coulissant a un pied fixé à un collier cylindrique et relié au cylindre coulissant par un petit lien.

Le robot utilise une paire d'ensembles de rouleaux à trois roues disposés à 120 degrés pour le contact le long du diamètre intérieur du tuyau. Chaque roue est fixée à un ensemble qui la relie à un ressort, conçu pour se contracter et se dilater au besoin pour maintenir la pression sur le tuyau, même si le diamètre change. Donc, si les jambes sont comprimées, le diamètre du robot diminue. Une fois cette force de compression relâchée, le robot se déploie automatiquement.

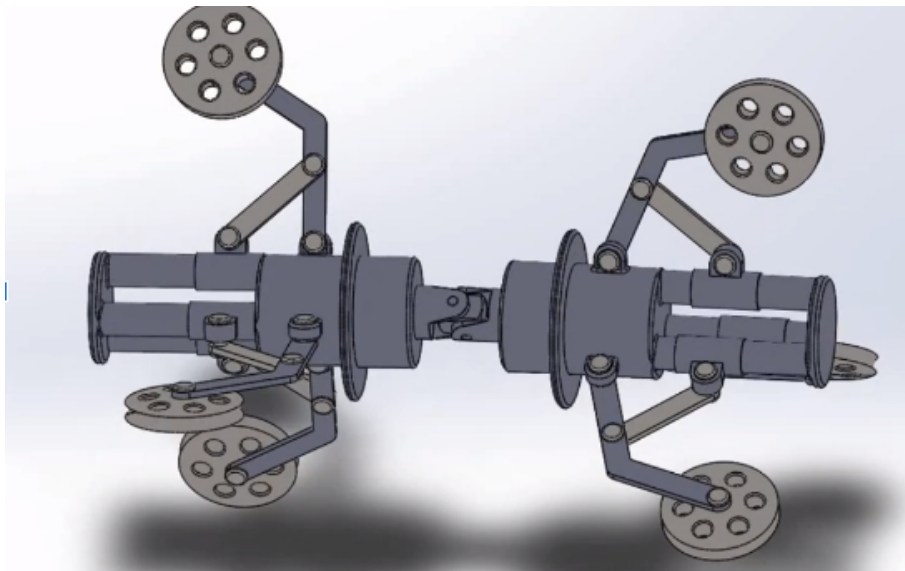


FIG. 2.2 – Fig : Premier prototype

En plus de la séparation des roues afin que chaque roue ait sa propre trajectoire dans la canalisation, le système a été divisé en deux parties qui sont reliées avec un cardan.

Afin d'assurer une meilleure flexibilité du robot à l'intérieur des peipes, nous avons introduit un cardan dans notre conception du premier prototype. Le cardan est un composant mécanique de transmission de puissance entre deux arbres à des positions angulaires variables l'un par rapport à l'autre. Il offre une flexibilité et une capacité d'absorption des chocs.

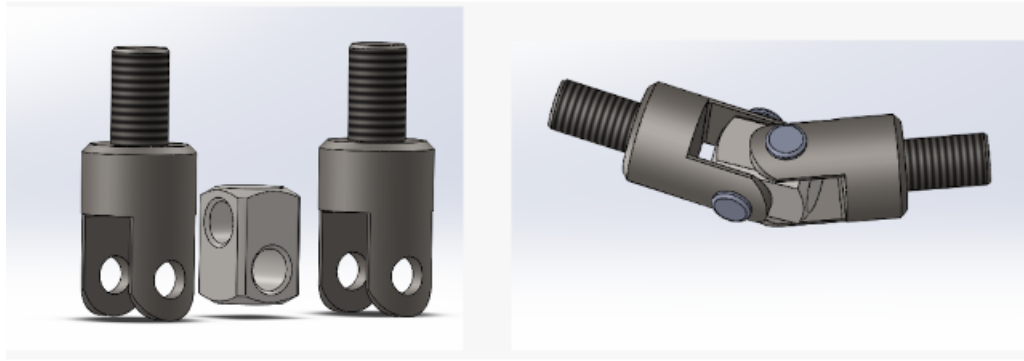


FIG. 2.3 – Le Cardan

Le principal inconvénient de ce prototype réside dans la disposition décentralisée des roues, ce qui compromet le bon fonctionnement du système. Cela entraîne une répartition inégale du poids sur le robot, perturbant son équilibre et sa capacité à se déplacer efficacement. Par conséquent, le robot devient plus susceptible de basculer et de perdre de la traction lorsqu'il rencontre des obstacles ou des terrains irréguliers.

Afin de remédier à cet inconvénient, nous avons repris la conception des roues en les remplaçant de manière plus centrale et équilibrée. Une répartition appropriée du poids et une coordination efficace des mouvements des roues sont essentielles pour améliorer sa stabilité, sa maniabilité et les performances globales du robot d'inspection. Une attention particulière doit être accordée à l'alignement, à la synchronisation et à la répartition du poids des roues afin d'assurer un fonctionnement optimal du système.

2.4 Deuxième prototype

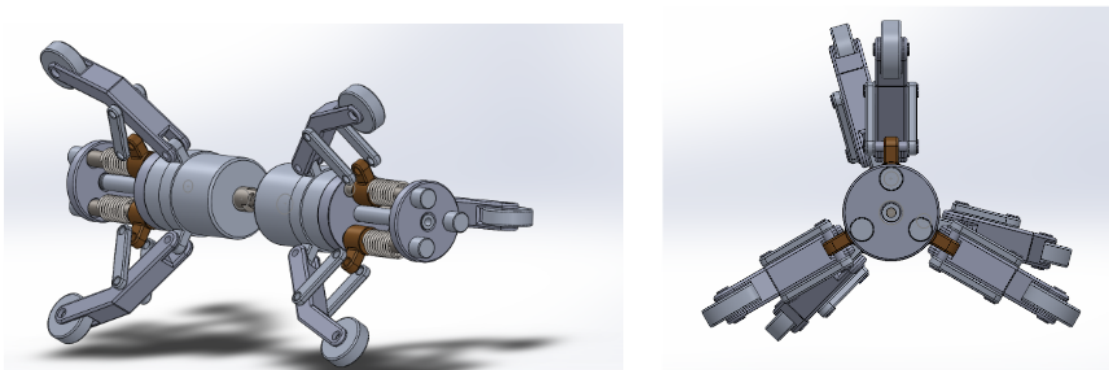


FIG. 2.4 – Deuxième prototype

Le premier prototype a été amélioré et les différentes modifications apportées au premier sont :

❶ **Utilisation d'un bras de forme U**, ce bras aide à la centralisation des roues dans le système.

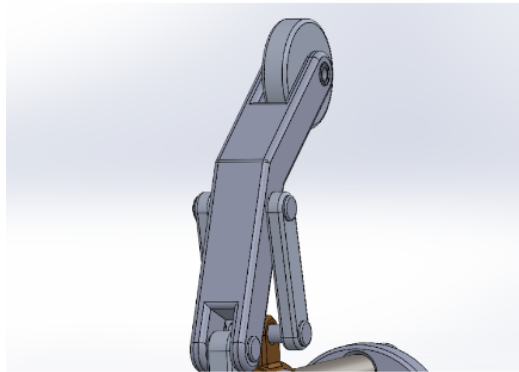


FIG. 2.5 – Forme U

❷ **Utilisation des roulements 19x6x6**, qui assure un guidage précis, stable et capable de supporter des charges élevées lors de la rotation d'un assemblage. Il réduit efficacement les frictions entre les surfaces en mouvement, ce qui permet un mouvement fluide tout en minimisant l'usure.

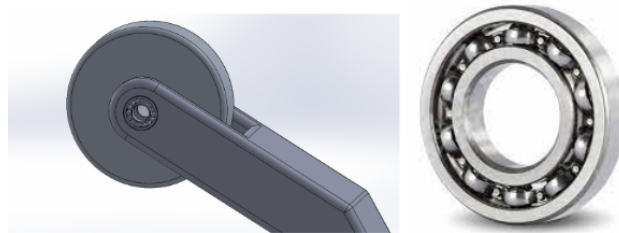


FIG. 2.6 – Roulement

❸ **L'utilisation d'un boîtier**, le boîtier a pour objectif de fournir un espace adapté et sécurisé pour loger tous les composants électroniques du système. Il offre une protection physique et environnementale, facilite l'organisation des composants, optimisé le câblage.

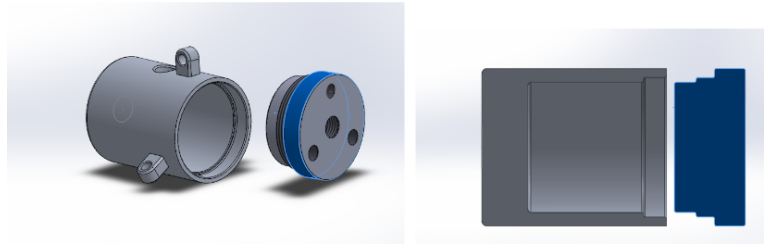


FIG. 2.7 – Le boîtier.

④ **L'utilisation d'un système réducteur par engrenages**, il s'agit d'un dispositif mécanique conçu pour augmenter le couple de sortie par rapport au couple d'entrée et réduire la vitesse. Il est constitué de deux engrenages qui sont utilisés ensemble pour transférer la puissance entre les essieux.

Le rapport de réduction pour cet ensemble est de 2.5. Il est calculé en divisant le nombre de dents de l'engrenage mené (25) par le nombre de dents de l'engrenage menant (10).

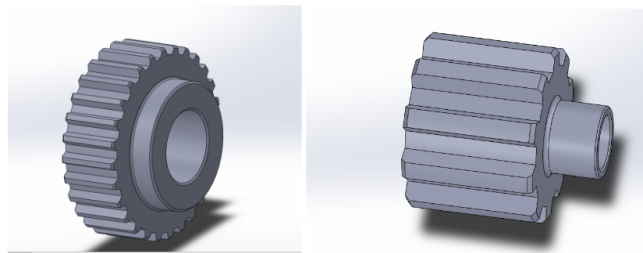


FIG. 2.8 – Système réducteur.

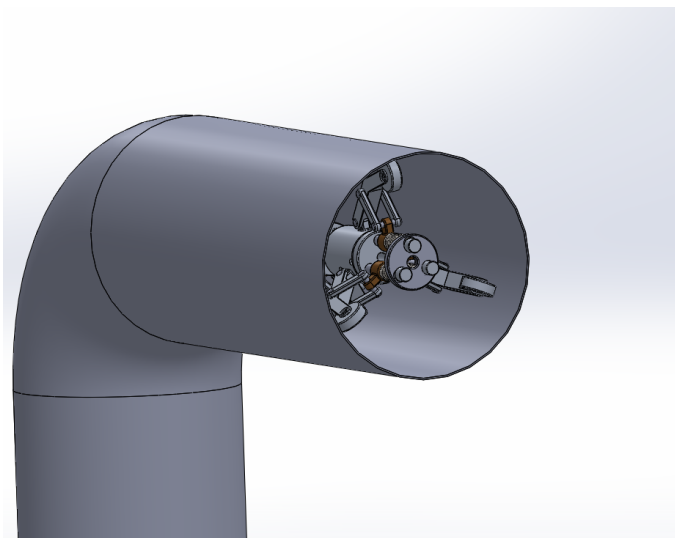


FIG. 2.9 – Robot à l'intérieur du pipeline.

2.5 Étude cinématique

A l'issue de la conception de base de notre robot d'inspection et afin d'assurer une réalisation correcte de la solution, nous avons procédé à l'étude cinématique du robot qui doit être conçu. La figure ci-après schématise le robot placé à l'intérieur d'un pipeline à l'intérieur duquel ce dernier est sensé se déplacer.

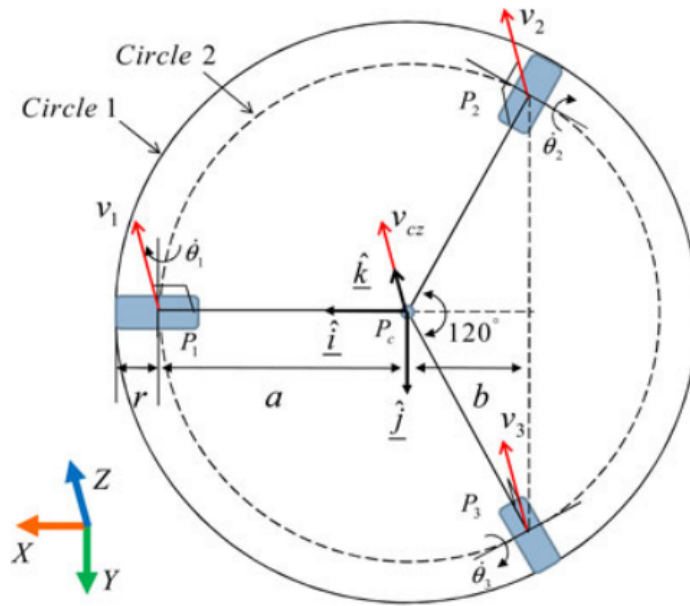


FIG. 2.10 – Vue en coupe de la canalisation.

Les paramètres $\theta_1, \theta_2, \theta_3$: représentent les angles de rotation des roues. Quant à v_1, v_2 et v_3 , elles représentent les vitesses linéaires des trois roues. a et r étant respectivement le rayon du robot et le rayon de la roue.

Les vitesses linéaires au centre de la roue sont données par :

$$\begin{cases} v_1 = r\dot{\theta}_1 \\ v_2 = r\dot{\theta}_2 \\ v_3 = r\dot{\theta}_3 \end{cases}$$

En général, les vitesses linéaires v_1, v_2, v_3 ont des amplitudes différentes aux coudes ou au embranchement en T. Dans le cas où la vitesse linéaire au centre P_c du robot est notée par v_{cz} et les vitesses de rotation au tour des axes fixes du corps i, j sont notées w_x et w_y .

Dans un but dériver la relation cinématique entre la vitesse d'entrée ($\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3$) et la vitesse de sortie (w_x, w_y, v_{cz}) nous analysons les composants de la vitesse de sortie pour deux cas de figure, le cas où le robot se déplace dans une canalisation droite ou encore le

cas où les vitesses des roues sont différentes.

Dans le premier cas, $v_1 = v_2 = v_3$ et c'est le cas dans lequel le robot se déplace dans une canalisation droite, donc : $v_{cz} = v_1 = v_2 = v_3$ et w_x, w_y n'existe pas.

Dans le seconde cas où les trois vitesses ont des valeurs différentes (par exemples $v_3 < v_2 < v_1$) dans ce cas le vecteur vitesse du robot est égale à la somme des vecteurs de rotation créés par les vitesses linéaires de chaque roue.

Dans ce cas, le vecteur vitesse de rotation " w_1 " par rapport à la cordonnée locale fixe est exprimée

$$w_1 = \frac{v_1}{a+b}, \text{ avec } b = a \cos 60 \rightarrow w_1 = \frac{v_1}{1.5a}$$

$$\underline{w}_1 = \frac{-r}{1.5a} \dot{\theta}_1 \vec{j}$$

Si maintenant, v_2 existe :

$$w_2 = \frac{v_2}{a+b}$$

$$\underline{w}_2 = \frac{r\dot{\theta}_2}{1.5a} (\cos 30 \vec{i} + \sin 30 \vec{j})$$

$$\underline{w}_2 = \frac{\sqrt{3}r}{3a} \dot{\theta}_2 \vec{i} + \frac{r}{3a} \dot{\theta}_2 \vec{j}$$

Dans le cas où v_3 existe :

$$w_3 = \frac{v_3}{a+b}$$

$$\underline{w}_3 = \frac{r\dot{\theta}_3}{1.5a} (\cos 30 \vec{i} + \sin 30 \vec{j})$$

$$\underline{w}_3 = \frac{-\sqrt{3}r}{3a} \dot{\theta}_3 \vec{i} + \frac{r}{3a} \dot{\theta}_3 \vec{j}$$

Et enfin, si les trois vitesses v_1, v_2, v_3 existent en même temps, le vecteur vitesse de rotation totale du robot est formé par la somme :

$$\underline{w} = \underline{w}_x \vec{i} + \underline{w}_y \vec{j} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} w_x = \frac{\sqrt{3}r}{3a} \dot{\theta}_2 - \frac{\sqrt{3}r}{3a} \dot{\theta}_3 \\ \frac{-2r}{3a} \dot{\theta}_1 + \frac{r}{3a} \dot{\theta}_2 + \frac{r}{3a} \dot{\theta}_3 \end{cases}$$

Si la vitesse linéaire v_{cz} au centre du robot est obtenue en prenant la moyenne de v_1, v_2, v_3 .

$$v_{cz} = \frac{1}{3}(v_1 + v_2 + v_3) = \frac{r}{3}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \quad (2.2)$$

Ainsi, la relation entre le vecteur vitesse d'entrée,

$$\dot{\underline{\theta}}_a = (\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3)^T \text{ et le vecteur vitesse de sortie } \dot{\underline{u}} = (w_x, w_y, v_{cz})^T$$

est :

$$\dot{\underline{u}} = [G_a^u] \dot{\underline{\theta}}_a$$

En combinant 2.1 et 2.2 on trouve :

$$[G_a^u] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{3}r}{3a} & -\frac{\sqrt{3}r}{3a} \\ \frac{-2r}{3a} & \frac{r}{3a} & \frac{r}{3a} \\ \frac{r}{3} & \frac{r}{3} & \frac{r}{3} \end{bmatrix}$$

Si le corps du robot tourne de θ_c autour de l'axe "z". Alors les parties rotationnelles de la Jacobienne contiennent le terme θ_c

$$[G_a^u] = \begin{bmatrix} \frac{2r \sin \theta_c}{3a} & \left(\frac{\sqrt{3}r \cos \theta_c}{3a} - \frac{r \sin \theta_c}{3a} \right) & -\left(\frac{\sqrt{3}r \cos \theta_c}{3a} + \frac{r \sin \theta_c}{3a} \right) \\ \frac{-2r \cos \theta_c}{3a} & \left(\frac{\sqrt{3}r \sin \theta_c}{3a} + \frac{r \cos \theta_c}{3a} \right) & -\left(\frac{\sqrt{3}r \sin \theta_c}{3a} - \frac{r \cos \theta_c}{3a} \right) \\ \frac{r}{3} & \frac{r}{3} & \frac{r}{3} \end{bmatrix}$$

2.6 Calcul de forces

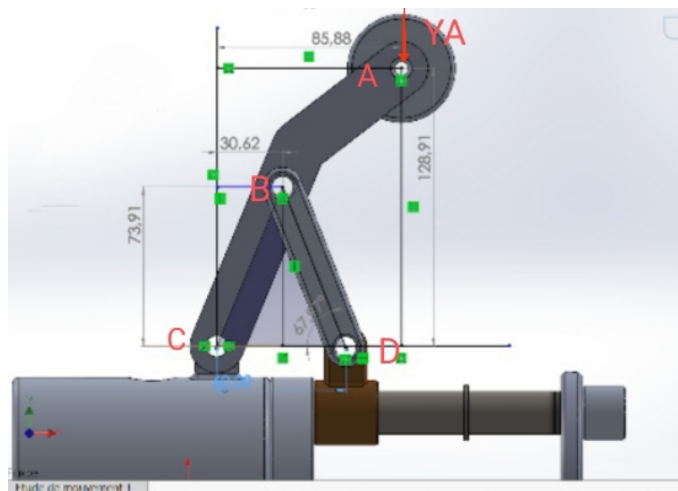


FIG. 2.11 – force exercée

La masse du robot étant estimée à $m = 10kg$, $10 \cdot 9.8 = 98$ N. avec le coefficient de frottement estimé à 0.5.

$$F = poids * coef f = 98 * 0.5 = 49$$

Dans ce qui suit, les expressions représentent les composantes du torseur des forces extérieures que pourrait supporter le robot sur les roues. C'est à partir de ces valeurs

numériques et des équations algébriques que nous allons développer qu'on pourra dimensionner les différentes liaisons.

Les torseurs, sont exprimés comme suit :

$$\tau_A = \begin{bmatrix} X_A & 0 \\ Y_A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \tau_B = \begin{bmatrix} X_B & 0 \\ Y_B & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \tau_C = \begin{bmatrix} -X_C & 0 \\ -Y_C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \tau_D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ Y_D & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Un calcul laborieux nous a permis d'évaluer la puissance nécessaire pour le déplacement du robot, soit :

$$P_m = F_{els} \cdot V_{lim} = 644.21 \cdot V_{lim}, \text{ avec, } V_{lim} = 0.05m/s. \text{ alors,}$$

$$P_{min} = 32.21W$$

De même, le calcul de couple, et sachant que, $P_{lec} = P_m$, le couple $C = \frac{P_{lec}}{w}$ où w est la vitesse angulaire.

Le calcul de la vitesse angulaire nous mène alors à, sachant le rayon de la roue $r = 60mm$ donc le périmètre, $Per = 2\pi r = 157mm$.

$$\frac{189}{V_{lim}} = \frac{157}{50} = 3.78$$

donc la vitesse angulaire est $\frac{60}{3.14} = 19.10 \text{ tr/min}$

et, $w = 1.57 \text{ rad/s}$ et le couple C est ainsi :

$$C = \frac{P_{ele}}{w} = \frac{32.21}{1.98} = 16.26N.m$$

2.7 Etude RDM

Une étude RDM est réalisée pour évaluer la résistance et la stabilité d'une structure ou d'un composant mécanique face aux charges externes, assurant ainsi la sécurité et la performance du système. Dans notre cas, l'étude RDM ciblée sur le segment et le bras permet de focaliser les efforts d'analyse sur les zones les plus critiques du système, assurant ainsi une approche efficace et ciblée pour garantir la performance et la fiabilité globale de la structure.

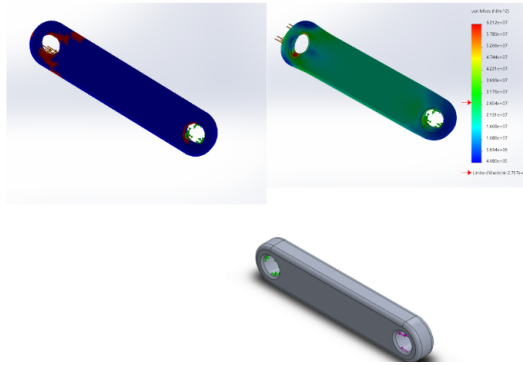


FIG. 2.12 – Segment

Les résultats de l'étude RDM du segment montrent que la contrainte maximale dans le segment est de 63.12 MPa. Étant donné que l'aluminium a généralement une limite de contrainte admissible de l'ordre de 200 MPa, on peut conclure que la contrainte générée par la force appliquée est bien en dessous de la limite acceptable. Par conséquent, la structure de l'onglet ne semble pas être soumise à un risque de rupture en raison de contraintes excessives.

Quant à la déformation, l'analyse révèle une déformation maximale de 2 mm dans le segment sous l'effet de la force de 4000 N. Étant donné que la longueur initiale du segment est de 80 mm, une déformation de 2 mm reste relativement faible (2,5 %). Cette déformation est acceptable par rapport aux exigences de notre conception, on peut donc conclure que la pièce conserve sa fonctionnalité sans subir de déformations excessives.

En termes de sécurité, le facteur de sécurité indique une marge de sécurité par rapport à la charge appliquée. Dans cet exemple, le facteur de sécurité appliqué est de 2. Cela signifie que la structure est deux fois plus résistante que nécessaire pour supporter la force de 4000 N. Cette marge de sécurité supplémentaire suggère une conception robuste et offre une assurance quant à la résistance structurelle de l'onglet en aluminium.

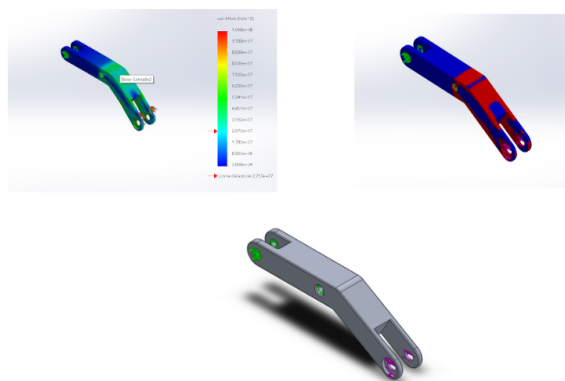


FIG. 2.13 – Fig :Bras

L'étude RDM du bras a abouti à des résultats prometteurs. Les contraintes maximales

détectées dans le bras sont largement inférieures à la limite admissible courante pour l'aluminium, ce qui élimine tout risque de rupture lié à des contraintes excessives. De plus, les déformations maximales observées restent relativement faibles par rapport à la longueur initiale du bras, confirmant ainsi sa capacité à maintenir sa fonctionnalité sans subir de déformations excessives. Par ailleurs, l'application d'un facteur de sécurité assure une marge de sécurité supplémentaire, attestant d'une conception robuste et d'une résistance structurelle adéquate du bras en aluminium. Ces résultats confirment que le bras satisfait aux exigences en matière de contraintes, de déformations et de sécurité, le rendant apte à remplir efficacement sa fonction prévue.

2.8 Commande et équipements électronique

Construire un robot d'inspection nécessite une conception et une construction minutieuses, ce qui est à la fois fascinant et stimulant. L'un des aspects les plus importants à prendre en compte dans ce processus est le contrôle du moteur. Le robot utilise des moteurs pour se déplacer et accomplir les tâches qui lui sont assignées. Pour mener à bien ce projet, l'utilisation d'une carte Arduino pour la commande des moteurs apporte une solution utile et pratique .

Dans le domaine du contrôle des robots et des machines. La sélection et l'intégration appropriées des composants électriques sont essentielles pour assurer le bon fonctionnement et les performances du robot d'inspection. Ces pièces régissent et coordonnent les mouvements du moteur, assurant un contrôle précis et efficace. Peut varier en fonction des exigences et des spécifications du projet. Voici une expansion sur les différents éléments d'équipement électrique qui pourraient être nécessaires :

a) Le moteur pas à pas Nema 23 Un moteur pas à pas Nema 23 est un type de moteur électrique utilisé pour convertir avec précision un mouvement linéaire ou rotatif à partir d'impulsions électriques. L'une de ses caractéristiques distinctives est la taille typique du boîtier Nema 23 (57 mm x 57 mm). Les moteurs Nema 23 sont largement utilisés dans les appareils qui nécessitent un positionnement précis et un couple élevé, tels que les machines CNC, les imprimantes 3D, la robotique et les machines automatisées. C'est souvent l'option préférée pour les tâches de contrôle de mouvement difficiles car elle offre une haute résolution et une excellente précision de positionnement. Les moteurs pas à pas Nema 23 sont réputés pour leur robustesse, leur fiabilité et leur compatibilité avec une large gamme de pilotes et de contrôleurs.



FIG. 2.14 – Fig : Moteur pas à pas Nema 23

b) La carte Arduino Uno carte Arduino Uno est Une carte de développement électrique basée sur le microprocesseur ATmega328P . Il est fréquemment employé dans les domaines de la programmation et de l'électronique pour le développement de projets interactifs et de prototypes. La carte Uno pour Arduino est réputée pour sa simplicité d'utilisation, son adaptabilité et son interopérabilité avec une large gamme d'actionneurs, de capteurs et de modules supplémentaires. Il comporte des broches d'entrée/sortie (E/S) pour connecter différents composants électroniques, et il peut être programmé à l'aide d'un langage de programmation condensé basé sur le câblage.[17]



FIG. 2.15 – Fig : La carte Arduino Uno

c) Le driver TB6560 Les circuits du moteur pas à pas peuvent être pilotés par le TB6560 à des niveaux de courant de sortie élevés, offrant un contrôle précis de l'emplacement et de la vitesse du moteur. Il possède une tonne de fonctionnalités, y compris une protection contre les surintensités et les surchauffes ainsi que des choix de réglage du courant et des micro-pas pour ajuster le fonctionnement du moteur aux exigences de certains projets.[18]



FIG. 2.16 – Fig : Le driver TB6560

d) Le module Bluetooth HC-06 Le module Bluetooth HC-06 est un petit composant électrique qui facilite la communication sans fil entre les appareils électroniques basés sur la technologie Bluetooth. Comme il est un esclave Bluetooth, le HC-06 peut être connecté à un appareil maître (comme un smartphone, un ordinateur ou une carte de développement) pour créer une connexion sans fil. Il a une portée typique d'environ 10 mètres et offre une transmission série asynchrone (UART) pour le transfert de données entre appareils. beginfigure[H]



FIG. 2.17 – Fig : Le module Bluetooth HC-06

e) Servomoteur MG90 Ce servomoteur compact et puissant est connu pour sa précision, sa fiabilité et sa facilité d'utilisation. Il est souvent utilisé pour le contrôle précis des mouvements, tels que l'orientation des pièces mécaniques, la rotation des bras ou l'inclinaison des capteurs. Le MG90S est doté d'un moteur à courant continu de haute qualité, d'un boîtier en plastique résistant et d'un engrenage métallique durable, ce qui lui confère une grande durabilité et une excellente résistance aux chocs. De plus, il dispose d'une plage de rotation allant jusqu'à 180 degrés, ce qui permet un contrôle précis des positions.



FIG. 2.18 – Fig : La carte Arduino Uno

Commande Arduino via un module Bluetooth

Une méthode pratique et adaptable pour contrôler des moteurs en utilisant les bibliothèques Accelstepper (conçu pour les moteurs pas à pas) et Multistepper (cette dernière nous permet de contrôler plusieurs moteurs simultanément)

La commande faite permet de contrôler les moteurs directement en utilisant la bibliothèque Software Serial depuis une Application mobile , offrant une interface conviviale et simple.

```

Control
#include <AccelStepper.h>
#include <MultiStepper.h>
#include <SoftwareSerial.h>

AccelStepper stepper1(AccelStepper::FULLWIRE, 11, 12);
AccelStepper stepper2(AccelStepper::FULLWIRE, 9, 10);
SoftwareSerial BTSerial(2, 3);

char c;
boolean NL = true;
char F, R;
long int v = 48000;
float distance1 = 0;
float distance2 = 0;
float distance = 18000;
int ct=0;
const float STEPS_PER_REVOLUTION = 200;
long currentPosition1 = 0;
long currentPosition2 = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  BTSerial.begin(9600);
  Serial.setTimeout(1);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }
}

```

FIG. 2.19 – Fig : Un extrait de a commande arduino

2.9 Simulation des moteur sur proteus

Proteus est un logiciel de conception électronique et de simulation largement utilisé. Il permet de concevoir des schémas électriques, de simuler le comportement des circuits électroniques, de créer des modèles de circuits imprimés (PCB) et d'effectuer des tests virtuels avant la réalisation physique.

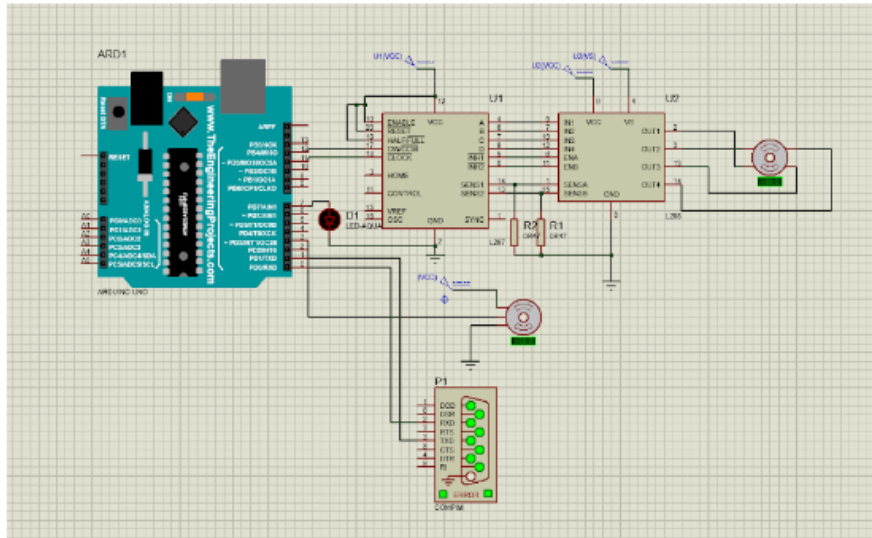


FIG. 2.20 – Fig : Application Android

La simulation fonctionnelle du moteur pas à pas sur Proteus s'est avérée essentielle pour mettre en marche le moteur avec succès. Les résultats obtenus lors de la simulation nous ont fourni des informations précieuses sur le positionnement, la vitesse de rotation, le couple et la consommation d'énergie du moteur. Ces informations ont été utilisées pour prendre des décisions éclairées et régler le moteur de manière à garantir un fonctionnement précis et efficace dans notre application spécifique. Grâce à la simulation, nous avons pu configurer le moteur de manière optimale, obtenir les performances souhaitées et l'intégrer de manière fiable dans notre système.

2.10 Schéma électronique de la conception

Ce schéma électronique permet de visualiser et de comprendre la structure interne de notre système, en mettant en évidence les connexions entre les différents composants et leur interaction.

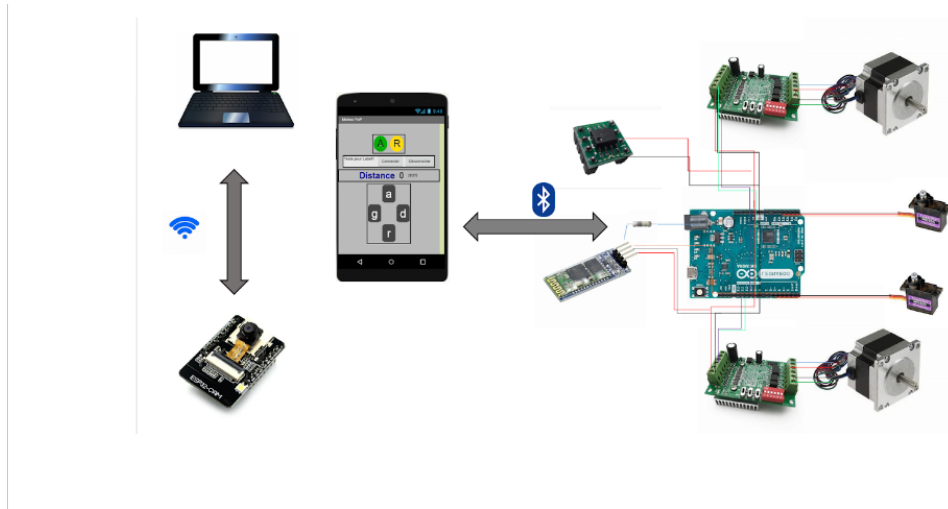


FIG. 2.21 – Fig : Schéma électronique

2.11 Code commande

Sous forme de blocs et afin de résumer le code établi, dans ce qui suit sont listés les différentes étapes de la commande du robot d'inspection.

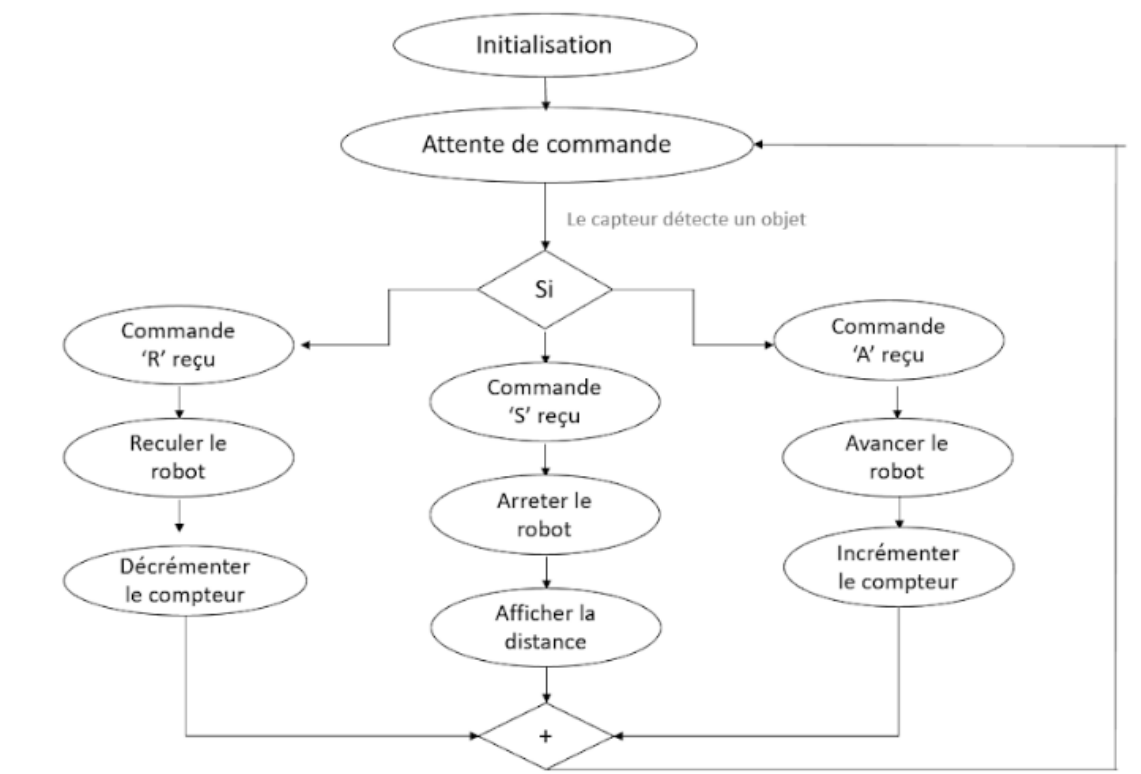


FIG. 2.22 – Fig : architecture du code

Les différentes étapes du diagramme sont listées comme suit :

Initialisation : Cette étape initialise les composants du code et configure les paramètres de départ.

Attente de Commande : Le code attend une commande de l'utilisateur via les boutons A, R. Si aucune commande n'est reçue, il reste dans cette étape.

Capteur détecte un objet : Lorsque le capteur détecte la présence d'un objet, le code passe à l'étape suivante en fonction de la commande reçue (A ou R).

Avancer le Robot : Si la commande A est reçue et qu'un objet est détecté, le code fait avancer le robot en activant les moteurs correspondants dans le sens direct.

Reculer le Robot : Si la commande R est reçue et qu'un objet est détecté, le code fait reculer le robot en activant les moteurs correspondants dans le sens inverse .

Incrémenter/Décémenter : Selon la commande reçue (A ou R) et la détection de l'objet par le capteur, le code incrémente ou décrémente.

Arrêter le Robot : Si la commande S est reçue, le code désactivant les moteurs correspondants et affiche la distance parcourue . Attente de Commande : Le code revient en attente de commande, prêt à recevoir de nouvelles instructions.

2.12 Code inspection

Le deuxième code est destiné à être utilisé avec une caméra ESP32 pour capturer des images et les transmettre via WiFi. Il utilise la bibliothèque 'esp-camera.h' et la bibliothèque 'WiFi' pour la communication sans fil.

L'objectif principal de ce code est de configurer la caméra ESP32, de l'initialiser en tant que point d'accès WiFi et de permettre la capture d'images à intervalles réguliers.

Voici un aperçu détaillé des fonctionnalités principales du code :

Inclusion des bibliothèques nécessaires. Le code inclut les bibliothèques "esp-camera.h" et "WiFi.h" qui sont nécessaires pour utiliser la caméra ESP32 et la communication WiFi.

Sélection du modèle de caméra. Il est important de sélectionner le modèle correct pour assurer une compatibilité appropriée.

Définition des informations WiFi. Le code définit le nom du réseau WiFi (SSID) et le mot de passe à utiliser pour l'initialisation du point d'accès WiFi. Ces informations sont utilisées pour permettre aux appareils clients de se connecter à la caméra ESP32.

Configuration et initialisation. La fonction "setup()" est utilisée pour configurer

la caméra ESP32 et initialiser la communication série pour le débogage. Elle active également le point d'accès WiFi en utilisant les informations fournies.

Boucle principale. La fonction "loop()" est utilisée pour exécuter le code principal en boucle. Dans cet exemple, il y a une pause de 10 secondes entre chaque itération de la boucle.

Code servomoteur

Lorsque le système reçoit une commande, il peut également effectuer des actions pour faire pivoter la caméra à l'aide des servomoteurs. Par exemple, en utilisant la commande "a", le servo 1 peut être tourné vers le haut, ce qui a pour effet de lever la caméra. À l'inverse, la commande "r" permet de tourner le servo 1 vers le bas, abaissant ainsi la caméra.

De la même manière, les commandes "g" et "d" sont associées au servo 2, permettant de le faire pivoter respectivement vers la gauche et vers la droite. Ces mouvements de rotation permettent d'ajuster l'angle de vue de la caméra et de l'orienter dans différentes directions en fonction des besoins spécifiques.

En intégrant ces commandes de rotation de la caméra avec les autres fonctionnalités du système, telles que la détection d'objets et le déplacement du robot, il devient possible d'avoir un contrôle complet et précis sur la caméra. Cela offre la possibilité d'explorer l'environnement de manière plus flexible et de capturer des images ou des vidéos dans différentes directions.

2.13 Interface de l'application mobile

App Inventor est une plateforme de développement d'applications Android conviviale et visuelle. Elle permet aux utilisateurs, de créer facilement des applications mobiles en utilisant une interface graphique intuitive et des blocs de programmation visuels.

App Inventor est basé sur un système de programmation par blocs, où les utilisateurs peuvent glisser-déposer des blocs de code pour créer la logique de leur application.

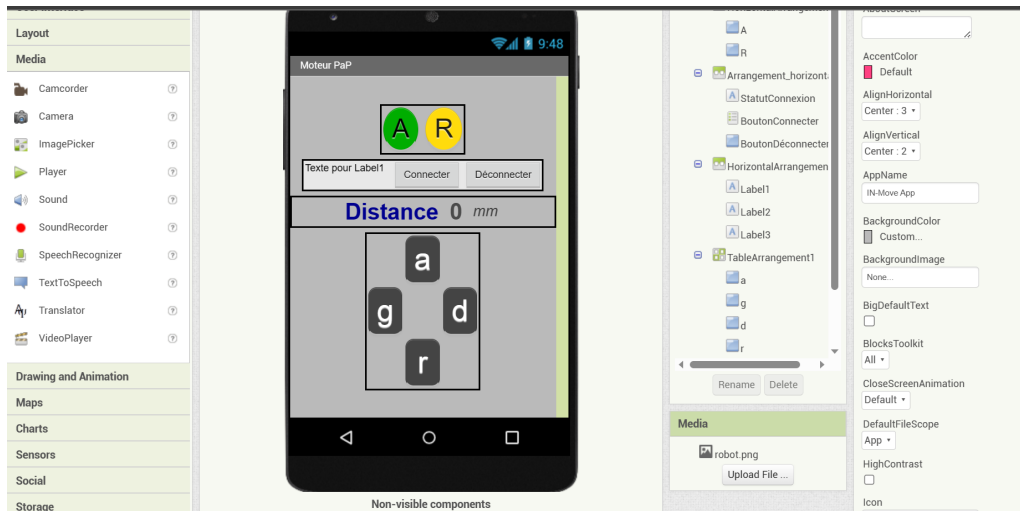


FIG. 2.23 – Interface de la plateforme App inventor

App Inventor offre une fonctionnalité prisée qui permet aux utilisateurs de créer des applications Android capables de commander des dispositifs Bluetooth. Cette fonctionnalité est particulièrement utile pour interagir avec des appareils externes, tels que des robots, ce qui a été notre objectif spécifique dans notre projet. Grâce à App Inventor, nous avons pu concevoir une application qui nous permet de contrôler et de communiquer avec notre robot en utilisant la connectivité Bluetooth. Cette fonctionnalité a grandement contribué à la réalisation de notre projet.

```

when Screen1.Initialize
do
  if not Client_Bluetooth1.Enabled
  then
    call Notificateur1.ShowAlert
    notice Bluetooth n'est pas activé sur cet appareil
    set StatutConnexion.TextColor to red
    set StatutConnexion.Text to Déconnecté

when BoutonConnecter.BeforePicking
do
  set BoutonConnecter.Elements to Client_Bluetooth1.AddressesAndNames

when BoutonConnecter.AfterPicking
do
  if call Client_Bluetooth1.Connect
  address BoutonConnecter.Selection
  then
    set StatutConnexion.TextColor to green
    set StatutConnexion.Text to Connecté
  
```

FIG. 2.24 – Bloc de programmation pour la connexion bluetooth

Dans notre application développée avec App Inventor, nous avons intégré des boutons dans le but de contrôler des moteurs. Cette fonctionnalité offre aux utilisateurs la possibilité de démarrer, arrêter des moteurs en appuyant simplement sur les boutons correspondant. Lorsque le bouton est activé, il envoie une commande via la communication Bluetooth vers le dispositif connecté aux moteurs, permettant ainsi un contrôle précis et en temps réel. Cette fonctionnalité intuitive et conviviale offre aux

utilisateurs un moyen simple et efficace de contrôler les moteurs et d'interagir avec notre application.



FIG. 2.25 – Bloc de programmation pour le contrôle des moteur

L'application nclut également une fonctionnalité de réception de données, en l'occurrence l'affichage de la distance. L'application est capable de recevoir des données provenant d'un capteur via la communication Bluetooth. Une fois que les données sont reçues, elles sont traitées et affichées en temps réel sur l'écran de l'application. Cela permet aux utilisateurs de visualiser facilement la distance mesurée par le capteur et d'obtenir des informations précises sur leur environnement.

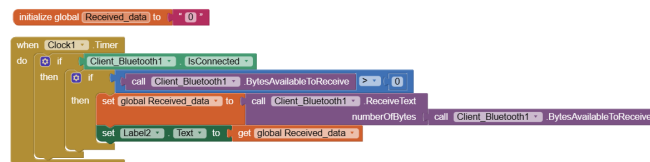


FIG. 2.26 – Bloc de programmation pour l'affichage de la distance parcourue

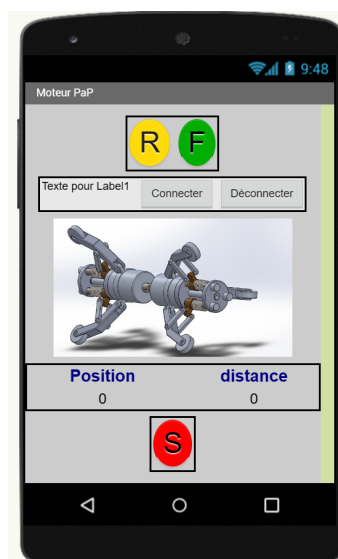


FIG. 2.27 – Application Android

2.14 Conclusion

Ce chapitre se concentre sur la conception du robot d'inspection, en mettant en évidence les études et les simulations effectuées pour confirmer sa fiabilité. Les analyses cinématiques, les calculs de forces, les études de résistance des matériaux et les simulations sur Proteus ont été réalisés pour évaluer la robustesse de la conception. Ces études ont permis d'identifier et de résoudre les problèmes potentiels, d'optimiser les performances et de raffiner les spécifications du robot. Grâce à cette phase préliminaire, nous sommes désormais prêts à passer à la réalisation réelle du robot d'inspection.

Chapitre 3

Réalisation du robot d'inspection

Dans ce chapitre, nous allons aborder la présentation du processus de fabrication des différentes composants mécaniques du robot d'inspection. L'assemblage comporte les parties mécanique, électronique et les tests effectués pour déterminer leur fonctionnalité.

Les pièces nécessaires au fonctionnement du robot ont été fabriquées à l'aide de divers processus de fabrication. Une fois les composants fabriqués, ils sont assemblés physiquement et associés avec les équipements électroniques pour réaliser le robot d'inspection complet. Les performances du robot sont ensuite mises à l'épreuve dans le cadre particulier de l'inspection de canalisations dans le but d'assurer la qualité et la fiabilité de notre solution.

3.1 Fabrication des différentes pièces du robot

La fabrication est une phase essentielle qui englobe une diversité de méthodes de transformation des matériaux, associées à l'utilisation de machines et différents outils spécialisés. Ce domaine revêt d'une importance considérable, car il permet la production d'articles de formes complexes, avec une précision élevée, tout en préservant les caractéristiques intrinsèques du matériau utilisé.

La fabrication de pièces requiert un éventail de compétences techniques, une connaissance approfondie de l'industrie et l'utilisation d'équipements spécialisés. Dans le cadre de ce projet, divers matériaux ont été explorés en fonction des exigences en termes de qualités mécaniques des pièces et de leur capacité à résister aux conditions corrosives des canalisations. Parmi ces matériaux figurent **l'acier, l'aluminium, les plastiques techniques et les composites innovants.**

Pour la réalisation des pièces, différentes machines sont utilisées. **Les tours**, qui permettent de donner une forme cylindrique ou conique aux pièces, tandis que **les fraiseuses** sont utilisées pour usiner des surfaces planes ou complexes. **Les machines de moulage**, quant à elles, sont employées pour fabriquer des pièces en série en recourant à des techniques d'injection ou de coulée.

Par ailleurs, **l'impression 3D**, qui est une méthode de fabrication additive de plus en plus populaire a été utilisée dans le cadre de notre projet de fin d'études, permettant ainsi de fabriquer des pièces à partir de modèles numériques en superposant des couches successives de matériaux. Cette approche offre une grande souplesse dans la conception des pièces, ce qui s'avère particulièrement avantageux pour la réalisation de prototypes et de pièces personnalisées

3.2 Choix du matériaux et usinage

Le choix des matériaux est une décision importante lors de la fabrication de pièces mécaniques. Il est essentiel de garantir la fonctionnalité, la durabilité et les performances des composants. Pour la sélection du matériau idéal pour les pièces mécanique, nous avons tenu en compte plusieurs facteurs, à savoir :

1. Exigences particulières en matière de résistance, de durabilité, de performances mécaniques et de résistance à la corrosion
2. Contraintes de conception
3. Le coût du matériau
4. La disponibilité sur le marché

Sur la base de ces critères, les matériaux utilisés sont listés dans le tableau ci-après.

Au cours de l'usinage, en particulier lors du ce processus d'enlèvement de matière, des outils de coupe sont utilisés pour former des pièces selon des mesures et des normes appropriées. La pièce brute est ainsi fixée sur la machine-outil. Il s'agit typiquement d'un matériau solide tel qu'un métal ou un polymère. Les opérations d'usinage sont effectuées par des machines-outils telles que des tours et des fraiseuses avec des outils spéciaux pour la coupe.

Ce processus permet d'obtenir une précision de mesure dimensionnelle élevée et

TABLE 3.1 – Choix des matériaux

Matériau	Les performances
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> - Légèreté - Résistant aux éléments corrosifs - Mise en forme aisée
Acier	<ul style="list-style-type: none"> - Résistant à la flexion, à la compression et à la traction - Résistance aux fissures et aux chocs dureté élevée - Facile à usiner, à souder et à former
Bronze	<ul style="list-style-type: none"> - Résistant à la corrosion - Ductilité - Réduit l'usure et les frottements - Bonne stabilité dimensionnelle - Auto-lubrification - Belle apparence
Plastique	<ul style="list-style-type: none"> - Réduit la résistance au roulement et rend le déplacement plus facile - Absorbe les chocs - Légèreté

une finition de surface de haute qualité. Il aide aussi à créer des pièces de toutes tailles et de toutes formes, des composants simples ou pièces complexes aux géométries difficiles. Le processus d'usinage est plus précisément automatisé lorsque de nouvelles machines-outils commandées par ordinateur sont utilisées. Les différents types de machines utilisées sont comme suit :

❶ **Le tour** est une machine-outil utilisée pour façonner des objets. L'ébauche est d'abord serrée sur le mandrin. Le mandrin peut être serré d'une façon manuelle ou hydraulique selon la configuration de la machine. Une fois la pièce de métal fermement serrée, le mandrin tourne à une vitesse donnée, permettant à l'outil de coupe de se déplacer sur la pièce de métal pour ébrécher le matériau [19]. Les différents outils utilisés lors du processus de fabrication de notre robot sont : Outil de coupe, Porte-outil à charioter, Porte-outil à tronçonner et le Porte-outil à aléser.

❷ **La Fraiseuse** est un autre type de machine-outil utilisée pour enlever les copeaux de matériau et produire des produits de forme et de taille correctes. Cette fraiseuse est particulièrement adaptée aux pièces prismatiques. Utiliser une fraise comme outil standard. Lors de l'utilisation d'une fraiseuse, la pièce doit être positionnée avec précision sur la table de la machine à l'aide d'un outil de serrage. cette dernière peut avoir deux modes, le fraisage en opposition ou fraisage en avalant [20]. Lors du processus de fabrication de notre robot nous avons utilisé le fraisage de surface qui est une technique typique qui crée une surface plane et uniforme en éliminant les copeaux de matière. Le

fraisage de rainures droites ou de forme inhabituelle, telles que des rainures en T, est appelé rainurage ainsi que le fraisage de contour qui peut créer des formes complexes, des courbes courbes et des profils exacts.

❶ **Perceuse** possède un certain nombre de qualités cruciales pour l'usinage. Pour commencer, le perçage de trous permet de créer des ouvertures dans les composants à l'aide de forets de différents diamètres et forme. Les taraudages peuvent ensuite être réalisés pour faciliter le futur assemblage par vis ou boulons en perçant les trous taraudés avec une perceuse ou un taraud adapté. Enfin, le chanfreinage, qui permet de produire des chanfreins autour des bords des trous. Cette méthode facilite l'assemblage des pièces et réduit le risque de blessure.

Le Moulage est un procédé lors duquel un moule est fabriqué dans lequel le métal en fusion est coulé. Certains modules nécessitent certaines propriétés pour produire des moulages de qualité [2].

3.3 Pièces fabriquées

Les pièces qui interviennent dans la fabrication de notre robot ont été réalisées par l'utilisation de plusieurs matériaux et techniques. Chaque pièce a été conçue et fabriquée en fonction de ses spécifications uniques.

La majeure partie des pièces sont fabriquées en aluminium.

Pièces	 le boîtier	 couvercle	 segment
machine	tour	tour	Tour , Fraiseuse
opérations effectués	<ul style="list-style-type: none"> ● Chariotage ● Alésage ● Perçage ● Taraudage ● soudage 	<ul style="list-style-type: none"> ● chariotage ● taraudage ● perçage 	<ul style="list-style-type: none"> ● surfaçage ● perçage

FIG. 3.1 – Fig : Les pièces fabriquées en aluminium

Quant aux bras du robot et en raison de la complexité de sa géométrie, cette pièce a été fabriquée par moulage. Le procédé est illustré sur la figure ci-après.

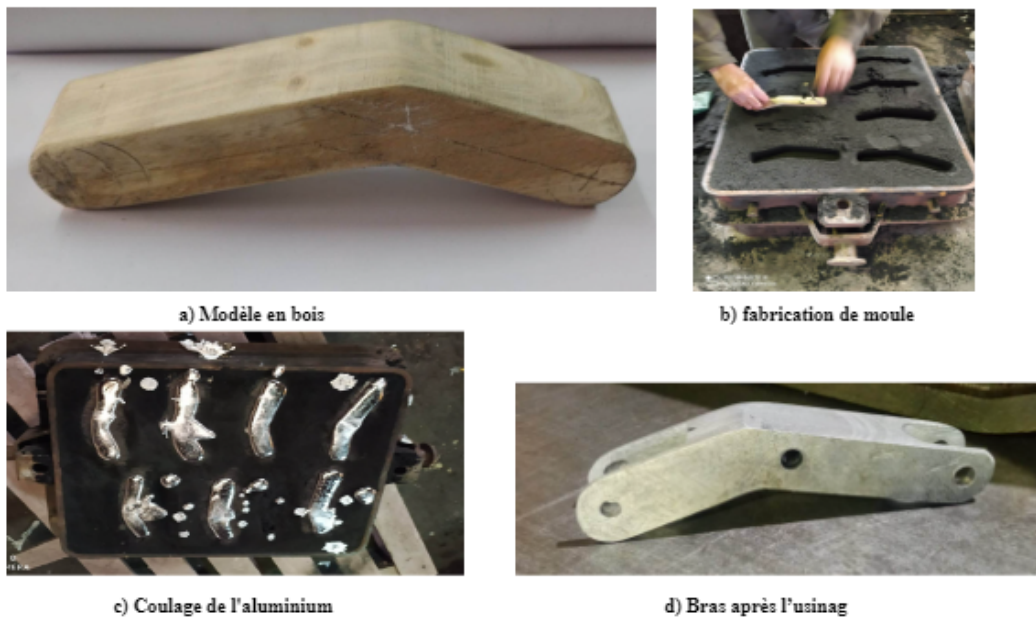


FIG. 3.2 – Fig : les différentes étapes de fabrication du bras

De même, sur la figure ci-après sont illustrés les composants du robot fabriqués en acier.


Pièces	 Tige	 Bouchon	 Le cardon
machine	tour	tour	Tour , Fraiseuse
opérations effectués	chariotage perçage filetage	chariotage alésage tarudage	Charitage filetage perçage surfaçage fraisage des rainures

FIG. 3.3 – Fig : Les différentes pièce fabriquées en acier.

La fabrication des en bronze, en particulier, la bague a été effectuée par l'utilisation des deux machines la tour et la fraiseuse. Quant aux opérations, un chariotage et alésage

ont été effectués pour avoir la forme cylindrique, suivi par le découpage et le perçage de la partie supérieure et le soudage.

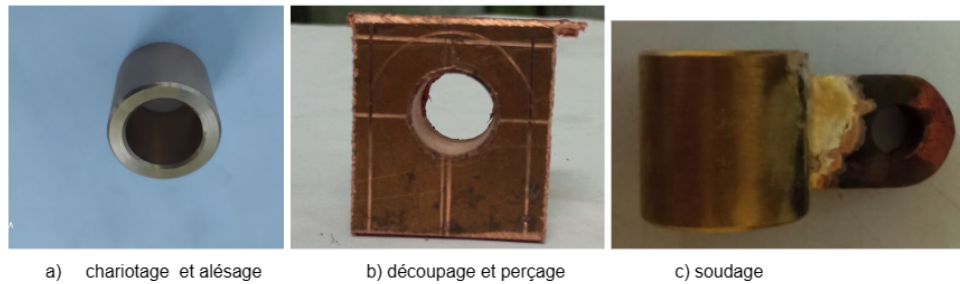


FIG. 3.4 – Fig : Les différentes étapes de la réalisation de la bague

A l'issue de la fabrication des différentes pièces une technique d'amélioration de surface et de rectification des pièces mécaniques pour améliorer la qualité de sa surface. Elle a été réalisée selon deux techniques principales : la rectification plane et la rectification cylindrique. La rectification permet de travailler sur des matériaux extrêmement durs. Elle offre la capacité d'atteindre des tolérances dimensionnelles de l'ordre du micromètre (0,001 mm), permettant ainsi d'usiner des pièces avec une grande précision. Elle permet d'obtenir une surface finie de haute qualité [21].

Lors de la réalisation de notre projet, nous avons utilisé cette méthode pour améliorer la surface des tiges en acier afin de réduire le frottement et le jeu entre la bague et la tige. .



FIG. 3.5 – Fig : Les différents types

3.4 Les outils de contrôles

Lors de la réalisation de nos pièces, des outils de contrôles ont été utilisés afin d'assurer la qualité des pièces et à déterminer si elles sont conformes ou non aux

spécifications requises. Il existe de nombreux types d'instruments de contrôle, chacun ayant un objectif et une approche de mesure uniques.



FIG. 3.6 – Fig : Les différents types

3.5 L'assemblage mécanique

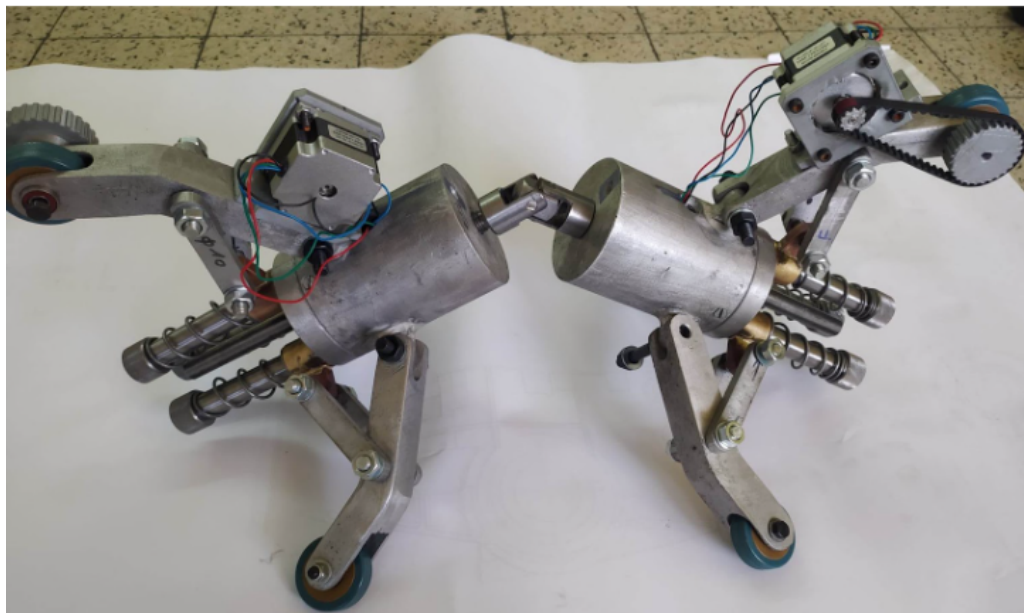


FIG. 3.7 – Fig : forme mécanique du robot

Dans cette phase, les composants mécaniques sont assemblés avec précision et sûreté pour former un ensemble fonctionnel. Une variété de méthodes, y compris le vissage,

le soudage, le rivetage, l'emboîtement et l'assemblage par ajustement. L'assemblage concerne les éléments suivants : Pièces fabriquées, Les ressorts, Les boulons et les visse de fixations, Les roues, Les roues dentées, Les courrois, Les roulements.

3.6 Montage des composants électroniques

Durant cette étape nous avons procédé au montage du matériel électronique dans l'assemblage mécanique constituant ainsi notre robot d'inspection.

Tout d'abord, nous avons minutieusement étudié les spécifications et les exigences techniques pour déterminer l'emplacement optimal des composants électroniques au sein de la structure mécanique. Un soin particulier a été accordé à la fixation sécurisée des composants électroniques. Cette approche garantit la stabilité des composants et prévient tout risque de mouvement ou de dommage lors du fonctionnement. Tout au long du processus, nous avons également pris en compte des considérations telles que la dissipation thermique, la gestion des câbles et la facilité de maintenance pour optimiser la performance et la durabilité du système.

Afin d'assurer l'isolation des composant, cette isolation est essentielle pour prévenir les interférences électromagnétiques, protéger les composants des courts circuit et assurer un fonctionnement fiable du système.

Pour les Drivers et Arduino et afin d'assurer une intégration harmonieuse et une optimisation de l'espace, nous avons placé les drivers et l'Arduino dans le corps du Robot. Ce positionnement stratégique permet de regrouper les composants essentiels au fonctionnement du système, simplifiant ainsi le câblage et assurant une utilisation plus pratique. Grâce à cette emplacement, nous réduisons ainsi les risques de dommages physiques et de déconnexion accidentelle des fils ou des connexions.

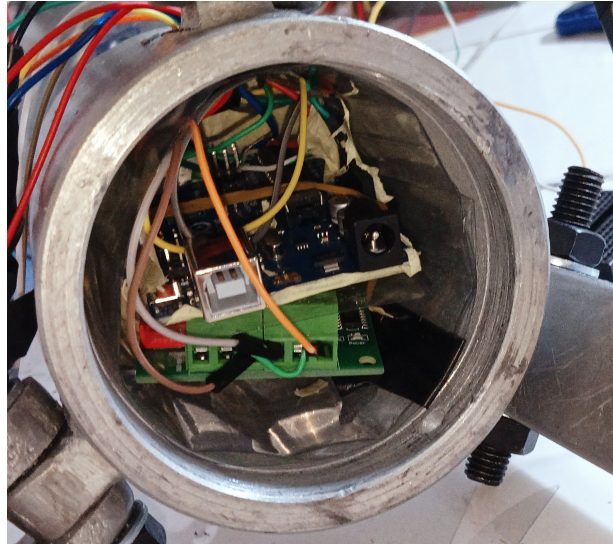


FIG. 3.8 – Empalement du Arduino et les drivers.

L'Auto-coupleur, quant à lui, qui est un capteur a été fixé près de la roue motrice. Ce capteur est conçu pour détecter chaque fois que la roue effectue un tour complet, et il incrémente un compteur interne à chaque détection. Ainsi, à mesure que la roue tourne et que le capteur détecte les rotations, la distance parcourue est calculée et affichée en temps réel sur l'écran de l'application. Cette fonctionnalité permet aux utilisateurs de surveiller avec précision la distance parcourue par le véhicule ou tout autre dispositif équipé de notre application. Cela offre une mesure fiable de la distance et permet aux utilisateurs de suivre leur progression ou de recueillir des données sur les distances parcourues.

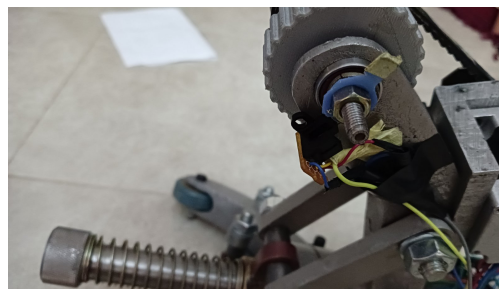


FIG. 3.9 – Emplacement de l'auto-coupleur

Afin de garantir une acquisition de signal optimale, nous avons pris la décision de placer le module Bluetooth à l'extérieur du boîtier. Cette disposition permet d'optimiser la portée et la qualité de la connexion sans fil. En positionnant le module Bluetooth à l'extérieur du boîtier, nous minimisons ainsi les interférences potentielles causées par les matériaux de la structure ou les composants internes. Ainsi, le signal Bluetooth peut se propager de manière plus libre et efficace, assurant une communication stable et fiable avec les appareils externes.



FIG. 3.10 – Emplacement du Bluetooth

La caméra et les servo-moteurs sont placés en avant du robot. La caméra est montée sur des servo-moteurs qui sont disposés de manière à former un mécanisme permettant à la caméra de pivoter dans toutes les directions. Ainsi, les utilisateurs de notre robot ont la possibilité d'effectuer une visualisation complète de l'environnement grâce aux mouvements de la caméra contrôlés à distance.

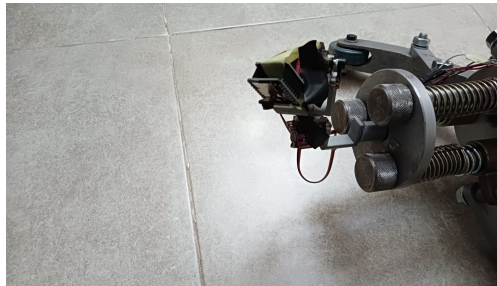


FIG. 3.11 – Emplacement caméra et servomoteur

Cette étape d'intégration des composants électroniques a joué un rôle essentiel pour finaliser la construction du robot d'inspection de pipelines.

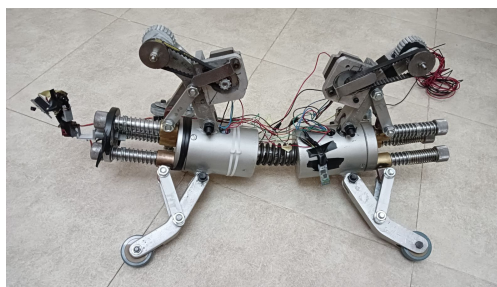


FIG. 3.12 – robot d'inspection

3.7 Tests et résultats

Après avoir monté le système robot, nous avons procédé aux tests. Avant de procéder au test dans les canalisations, il est essentiel de réaliser un test à vide du robot pour garantir

le bon fonctionnement de l'ensemble du système. Ce test à vide permet de vérifier si toutes les pièces et composants du robot sont correctement assemblés et si les capteurs sont opérationnels et si les commandes répondent de manière adéquate. Pendant cette étape, le robot est mis en marche dans un environnement contrôlé, sans présence d'une charge extérieure. Ce test vise à vérifier le fonctionnement des composants clés, à savoir, les moteurs, les servo-moteur, la caméra et l'auto-coupleur.

Une fois le test lancé, les moteurs alimentés, les roues commencent à tourner à l'aide des courroies. Les servomoteurs ont assuré une rotation de 180° et la visualisation à été garantie à l'aide du caméra.

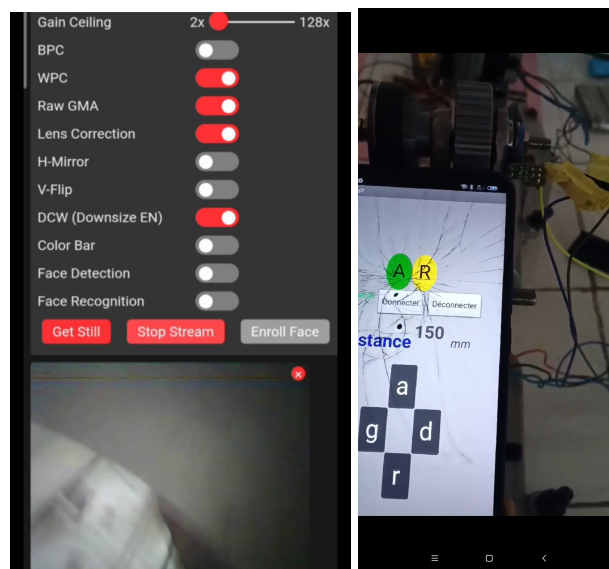


FIG. 3.13 – Affichage caméra (à gauche) et affichage de la distance parcourue par le robot (à droite).

L'application mobile développée permet ainsi d'afficher la distance parcourue.

Suite à la bonne marche du test à vide, ce premier essai nous a permis de vérifier en détail le fonctionnement de chaque composant du robot et de confirmer que toutes les fonctionnalités sont opérationnelles. Les résultats obtenus lors du test à vide ont démontré que le robot est capable de se déplacer en suivant les commandes, d'effectuer des mesures précises et de détecter les éventuels obstacles ou problèmes techniques. De plus, nous avons pu valider la fiabilité des capteurs et des systèmes de communication du robot, qui se sont révélés essentiels pour garantir un fonctionnement fluide et efficace.



FIG. 3.14 – Le robot dans le pipeline

La seconde étape consiste alors à mettre en marche le robot dans un pipeline. En effet, nous avons réalisé avec succès le test du robot dans un pipeline en PVC d'un diamètre de 390 mm. Après avoir soigneusement positionné le robot à l'entrée du pipeline, nous avons mis en marche le système pour évaluer ses performances dans des conditions réelles.

Le positionnement du robot dans le pipeline a été marqué par un succès notable où toutes les roues du robot sont parfaitement en contact avec la surface interne du pipeline. La caméra a réussi à capturer des images en temps réel depuis différentes positions.

3.8 Conclusion

En conclusion, les résultats obtenus lors de ces tests sont extrêmement encourageants. Le positionnement réussi du robot dans le pipeline, où toutes les roues sont en contact avec la surface interne, est un signe fort de la capacité du robot à naviguer avec précision et stabilité. Ce positionnement précis est essentiel pour assurer une progression fluide et sans heurts à l'intérieur du pipeline, minimisant ainsi les risques de dommages ou d'obstacles.

La capacité de la caméra à capturer des images en temps réel depuis différentes positions est une caractéristique essentielle pour évaluer la situation et prendre des décisions éclairées. Cette fonctionnalité permet d'obtenir une vision complète et détaillée de l'intérieur du pipeline, permettant ainsi de détecter les éventuels problèmes ou obstacles et de réagir rapidement en conséquence. Les images en temps réel offrent une précieuse information visuelle, renforçant ainsi le contrôle et la surveillance du processus.

Ce premier test qui consiste en un petit déplacement est important et peut être considéré comme un résultat positif dans ce contexte. Cela peut être justifié par le fait que l'essai a été effectué dans une canalisation en PVC, alors que notre système était initialement conçu pour des tests dans des conduites en métal. Le PVC a une surface plus lisse et présente moins de frottement par rapport au métal. Par conséquent, le léger

déplacement qui peut être observé peut être attribué au manque d'adhérence avec la surface interne du pipe en PVC.

Ce résultat démontre la capacité du système à s'adapter aux conditions du pipeline et à se déplacer avec une précision optimale, minimisant ainsi les risques de perturbation du flux dans le pipeline.

Conclusion générale

Nous avons travaillé sur la conception et la réalisation d'un robot d'inspection des pipelines, ce qui a été une expérience enrichissante et instructive. Tout au long de ce projet, nous avons acquis de précieuses compétences et connaissances dans divers domaines, tant sur le plan mécanique que sur le plan électronique.

En ce qui concerne la partie mécanique, nous avons appris les détails et les spécificités liés à la conception du mécanisme et à l'usinage des composants du robot. Nous avons développé un système qui démontre une grande adaptabilité et une capacité de déplacement dans la canalisation, ainsi que la possibilité de mesurer la distance parcourue et de capturer des photos en temps réel grâce à la caméra intégrée.

Les résultats des tests réels sont très prometteurs, démontrant la capacité du robot à effectuer un positionnement précis et à capturer des images. Bien que les déplacements du robot soient limités dans cette étude, ils ont néanmoins révélé la possibilité d'une navigation fluide. Ces résultats soulignent l'importance des améliorations potentielles à apporter au robot pour optimiser ses performances de déplacement dans les pipelines. Nous sommes conscients des opportunités d'amélioration de notre système.

Comme perspectives, nous prévoyons d'ajouter d'autres capteurs pour une détection encore plus précise et d'améliorer la source d'énergie pour assurer une meilleure autonomie au robot. De plus, nous envisageons d'étudier la viabilité de l'adoption d'algorithmes sophistiqués pour une meilleure planification de trajectoire et un traitement autonome des données.

Bibliographie

- [1] B. Sana'a, "Conception et réalisation d'un robot d'inspection des pipelines à base de carte arduino uno," p. 85, 2019.
- [2] S. K. P. Ankit Nayak a, "Design of a new in-pipe inspection robot.volume," vol. 97, pp. 2081–2091, 2007.
- [3] A. H. H. Nur Afiqah Binti Haji Yahya, Negin Ashrafi, "Development and adaptability of in-pipe inspection robots.," vol. 11, pp. 1–8, 2014.
- [4] N. S. Roslin, ".a review : Hybrid locomotion of in-pipe inspection robot," vol. 41, p. 100011, 2012.
- [5] M. Z. A. Rashid, "Modeling of the in-pipe inspection robot : A comprehensive review," vol. 203, p. 107206, 2020.
- [6] J. Alyson, "Development of an adaptive in-pipe inspection robot with rust detection and localization," vol. 41, 2018.
- [7] D. C. C. Swaminath Venkateswaran, "Prototyping a piping inspection robot using a beaglebone black board," 2019.
- [8] S. Sainson, "Inspection en ligne des pipelines," pp. 38, year = 2007,.
- [9] . S. K. Prajapati, "Multi-functional pipeline inspection robot," p. 48, 2019.
- [10] M. S. Leszek BARANOWSKI, "Use of 3d simulation to design a mobile robot model for theoretical and real pipe inspection," vol. 12, pp. 232 – 236., 2018.
- [11] e. a. Yoshiaki Bando, "Sound-based online localization for an in-pipe snake robot," vol. 135, p. 100011, 2018.
- [12] N. A. Binti, "Development and adaptability of in-pipe inspection robots," *Journal of Mechanical and Civil Engineering*.
- [13] T. A. a. M.S. Safizadeh a, "Corrosion detection of internal pipeline using ndt optical inspection system,"
- [14] M. R. H. Abu Salman Shaikat and R. Tasnim, "Design and development of a pipeline inspection robot for visual inspection and fault detection," vol. 41, p. 100011, 2012.
- [15] H. JLing, "A new robot-based system for in-pipe ultrasonic inspection of pressure pipelines. in : Far east ndt new technology application forum (fendt)," p. 246–250, 2017.
- [16] M. R. H. Abu Salman Shaikat and R. Tasnim, "Mechatronics design of an autonomous pipe-inspection robot," vol. 135, p. 100011, 2018.
- [17] R. M. L. AGHA Baghdad, "Etude et realisation d'un nŒud de capteur sans fil a base d'arduino uno," p. 72, 2014.

- [18] S. E. A. Ibrahim HADDAD, “Réalisation d’un bras manipulateur pour des applications de pick place à base de machine vision,” p. 107, 2021.
- [19] B. R. M. LAMINE, “L’influence des paramètres de coupe sur l’état de surface lors de l’usinage de l’acier xc48,” p. 87, 2018.
- [20] M. Riadh, “Prédiction des forces de coupe pour les fraises des formes complexes en utilisant le modèle thermomécanique,” p. 107, 2021.
- [21] C. Celia, “Application informatique pour le calcul du temps et coût d’usinage des pièces en fraisage et en tournage.,” p. 82, 2017.