

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique

Spécialité Instrumentation

Présenté par

ELFATMI Nesrine

&

GUESMIA Zoheir

---

Instrumentation multi-capteurs d'un robot  
mobile et fusion de données pour la perception

---

Proposé par : AIT ABDESLAM Houria & LAKROUF Mustapha

Année Universitaire 2017-2018

## Remerciements

---

*Avant tout, nous remercions Allah le tout-puissant de nous avoir donné le courage et la volonté pour mener à bien ce modeste travail.*

*Nous tenons avant tout à remercier : Madame O. Azouaoui qui nous a permis de poursuivre notre projet au sein du CDTA ainsi que nos encadreurs Monsieur M. Lakrouf et Madame H. Ait Abdeslam.*

*Nos remerciements les plus profonds à Monsieur Khaled Kara pour ses directives et son soutien tout au long de notre stage, nos remerciements vont aussi à Monsieur R. TIAR et Madame S. BOURAINE pour leurs conseils et toute l'équipe NCRM de la division productique et robotique ainsi que tout le personnel de CDTA.*

*Nous remercions toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.*

# *Dédicace :*

*Je dédie ce mémoire à :*

***Mes parents :***

*Mon père, qui trouve ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

*Mes frères et ma sœur qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*A tout ma famille pour m'encourager.*

*A mes meilleures amies qui ont été toujours à mes côtés surtout dans les moments difficiles.*

*A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer. Et tous ceux qui j'aime et qui m'aiment.*

*A mes collègues de promotion Instrumentation 2018.*

*Nesrine*

# *Dédicace :*

*Avant tout, à mes très chers parents qui m'ont tout offert...  
A toute ma famille qu'elle soit proche ou lointaine ;  
A mon frère et ma sœur ;  
A tous mes ami(e)s et camarades Instrumentation 2018.*

***A Tous, Je dédie ce travail.***

***Zoheir***

---

## ملخص:

الهدف الرئيسي من مشروع نهاية الدراسة هذا هو الأداة المتعددة المستشعرات للروبوت المتحرك واندماج البيانات من أجل الإدراك. يتمثل الجزء الأول من هذا العمل في تجهيز الروبوت المتحرك ببطاقة تحكم تتواصل مع بطاقة المؤازرة وبطاقة ثانية لوضع المستشعرات فوق الصوتية ومستشعرات الأشعة تحت الحمراء. الجزء الثاني من هذا العمل هو دمج بيانات المستشعرات الخارجية باستخدام مرشح كالمان لتصوير أوسع وملاحظة مستقلة مع تجنب العقبات. البرمجة تتم بلغة C مع تطبيقات واختبارات في الوقت الحقيقي على الروبوت المتحرك.

**كلمات المفاتيح:** اندماج البيانات؛ الروبوت المتحرك؛ متعدد المستشعرات.

---

## Résumé :

L'objectif principal de ce mémoire est l'instrumentation Multi-capteurs d'un robot mobile et fusion de données pour la perception. La première partie de ce travail est d'équiper le robot mobile par une carte de commande qui assure la communication avec la carte d'asservissement et une deuxième carte pour positionner les capteurs ultrasons et infrarouges. La deuxième partie de ce travail est de faire fusionner les données des capteurs extéroceptifs en utilisant le filtre de Kalman pour une perception plus étendue et une navigation autonome avec évitement d'obstacles. Notre application est réalisée sous C, avec implémentations et tests en temps réel sur le robot mobile.

**Mots clés :** Fusion données ; robot mobile ; multi-capteurs.

---

## Abstract :

The main purpose of this project is the multi-sensor instrumentation for a mobile robot and data fusion for perception. The first part of this work is to equip the mobile robot with a control card that communicates with the control card and a second card to position the ultrasonic and infrared sensors. The second part of this work is a data fusion of the exteroceptive sensors using the Kalman filter for a wider perception and an autonomous navigation with obstacle avoidance. Our application is realized under C, with implementations and real-time tests on the mobile robot.

**Keywords :** Data fusion ; mobile robot ; multi-sensor.

---

## Listes des acronymes et abréviations

---

**APK** : Android Package Kit

**ARM** : Advanced RISC Machine

**AT** : Tension command

**C/C++** : Langage de Programmation.

**CAN** : Controller Area Network

**Capteurs IR** : Capteurs Infrarouge

**Capteurs US** : Capteurs Ultrason

**CCD** : Charge-coupled device

**CDTA** : Centre de Développement des Technologies Avancées.

**CMOS** : Complementary metal–oxide–semiconductor

**I2C**: Inter-Integrated Circuit

**IDE** : Integrated développement environnement

**LASER**: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

**LCD**: Liquid Crystal Display

**LED**: light-Emitting Diode

**MCC** : Moteurs à Courant Continu

**NAROMED** : Navigation d'un Robot Mobile dans un Environnement Dynamique

**NCRM** : Navigation et Contrôle des Robots Mobiles.

**RADAR** : RAdio Détection And Ranging

**RII** : Réponse Impulsionnelle Infinie

**RS232** : Recommande Standard 232.

**SE**: Système Embarqué

**SLAM**: Simultaneous Localization And Mapping

**SPI**: Serial Peripheral Interface bus

**TCP**: Transmission Control Protocol

**UART**: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

**UDP** : User Datagram Protocol

**XML** : Extensible Markup Language

# Table des matières

---

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre 1 Généralités sur les robots mobiles

1.1. Introduction.....	3
1.2. Définition robots Mobiles .....	3
1.3. Principe de fonctionnement.....	4
1.4. Domaine d'utilisation .....	4
1.5. Avantages et inconvénients .....	7
1.5.1. Les avantages .....	7
1.5.2. Les inconvénients .....	8
1.6. Les types des robots mobiles .....	8
1.6.1. Robot unicycle .....	8
1.6.2. Robot tricycle .....	9
1.6.3. Robot voiture.....	10
1.6.4. Robot omnidirectionnel .....	10
1.6.5. Comparaison des différents types des Robots mobiles.....	11
1.7. Capteurs .....	11
1.7.1. Définition des capteurs .....	12
1.7.2. <i>Classification des capteurs</i> .....	12
1.7.3. Capteurs utilisés dans les systèmes de robotique mobile .....	13
a. Capteurs proprioceptifs.....	13
b. Capteurs extéroceptifs .....	14
b.1. Les capteurs ultrasons .....	15
b.2. Les capteurs à infrarouges .....	16
b.3. Les capteurs Laser .....	17

b.4.	RADAR .....	17
b.5.	Caméra .....	18
1.8.	Actionneurs .....	18
1.8.1.	Définition des actionneurs .....	19
1.8.2.	Moteur à courant continu .....	20
1.8.3.	Moteur pas à pas.....	21
1.9.	Conclusion .....	21

## **Chapitre 2 Les méthodes de localisation et de navigation**

2.1.	Introduction.....	22
2.2.	Méthode de localisation.....	22
2.2.1.	Odométrie .....	22
2.2.2.	SLAM.....	24
2.3.	Méthode de navigation .....	24
2.3.1.	Champs de potentiel .....	25
a.	Champ de force attractif .....	26
b.	Champ de force répulsif .....	27
2.4.	Perception .....	28
2.4.1.	La fusion de données.....	28
2.4.2.	Méthodes de fusion de données.....	29
2.5.	Conclusion .....	32

## **Chapitre 3 Plateforme robot mobile**

3.1.	Introduction.....	33
3.2.	Robot mobile utilisé .....	33
3.2.1.	Partie mécanique .....	34
3.2.2.	Capteurs proprioceptifs.....	35



3.2.3.	Partie électronique.....	35
a.	Carte d'acquisition et de gestion .....	35
b.	Carte d'afficheur LCD .....	36
c.	Carte de puissance .....	36
3.3.	Les améliorations apportées .....	37
3.3.1.	La carte Mbed NXP LPC1768 .....	37
3.3.2.	Le capteur ultrason HC-SR04.....	39
a.	Principe de Fonctionnement.....	39
b.	Distance de l'objet.....	39
c.	Caractéristiques.....	40
3.3.3.	Le capteur infrarouge Sharp GP2Y0A02YK.....	40
a.	Principe de fonctionnement.....	41
b.	Caractéristiques.....	41
3.3.4.	Module wifi ESP8266-01 .....	42
3.4.	Réalisation des cartes.....	43
3.4.1.	Le logiciel Eagle .....	43
3.4.2.	Carte de commande :.....	43
3.4.3.	La carte support capteurs .....	48
3.4.4.	Les schémas des cartes réalisées .....	50
3.4.5.	Positionnement des capteurs.....	50
3.4.6.	L'étalonnage des capteurs infrarouges .....	52
3.5.	Conclusion .....	53

## **Chapitre 4 Implémentation, tests et résultats**

4.1.	Introduction.....	54
4.2.	Partie software .....	54
4.2.1.	Compilateur Mbed .....	54

4.2.2.	Emulateur Tera Term .....	55
4.3.	Implémentations .....	56
4.3.1.	Odométrie .....	56
4.3.2.	Fusion de données .....	56
4.3.3.	Détection d'obstacle .....	57
4.3.4.	Navigation aller vers un but .....	58
4.3.5.	Navigation avec évitement d'obstacles .....	58
4.4.	Test et résultats.....	59
4.4.1.	Test odométrie .....	59
4.4.2.	Test fusion de données .....	60
4.4.3.	Test navigation aller vers un but.....	62
4.5.	Test navigation et évitement d'obstacle.....	63
4.6.	Contrôle à distance .....	64
4.6.1.	Présentation logiciel Android studio.....	64
4.6.2.	Présentation des interfaces de l'application.....	65
4.7.	Conclusion .....	69
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>70</b>
	<b>Annexes .....</b>	<b>72</b>
	<b>Bibliographies.....</b>	<b>78</b>

## Liste des figures

---

Figure 1.1. Quelques types de robot mobile.....	3
Figure 1.2. Fonctionnement d'un robot mobile.....	4
Figure 1.3. Robot Baxter.....	5
Figure 1.4. Robot Mule.....	5
Figure 1.5 . Robot nettoyeur de ville.....	6
Figure 1.6 .Robot aspirateur.....	6
Figure 1.7. Robot de type unicycle.....	9
Figure 1.8. Robot de type tricycle .....	9
Figure 1.9. Robot de type voiture .....	10
Figure 1.10. Robot de type omnidirectionnel .....	10
Figure 1.11. Principes de fonctionnement des capteurs .....	12
Figure 1.12. Capteur ultrason.....	15
Figure 1.13. Capteur infrarouge .....	16
Figure 1.14. Capteur laser .....	17
Figure 1.15. Caméra .....	18
Figure 1.16. Schéma fonctionnel et symboles des actionneurs de robotique mobile .....	19
Figure 1.17. Quelques types d'actionneur .....	19
Figure 1.18. Les composants d'un MCC .....	20
Figure 1.19. Les composants d'un moteur pas à pas .....	21
Figure 2.1. Positionnement du robot .....	23
Figure 2.2. Aimant et poudre de fer.....	25
Figure 2.3. Ballon dans une pente.....	25
Figure 2.4. Champ de potentiel.....	26
Figure 2.5. Force attractive .....	27
Figure 2.6. Force répulsive .....	27
Figure 2.7. Exemple de fusion de données multi capteurs.....	28
Figure 2.8. Exemple d'un filtre RII .....	30
Figure 2.9. Schéma récapitulatif du filtre de Kalman.....	31
Figure 3.1. Le Robot mobile ' Romorob' .....	33
Figure 3.2. Structure mécanique Romorob.....	34

Figure 3.3. Partie mécanique Romorob .....	34
Figure 3.4. Carte d'acquisition et de gestion .....	36
Figure 3.5. Afficheur LCD.....	36
Figure 3.6. Carte de puissance .....	36
Figure 3.7. Carte Mbed LPC1768.....	37
Figure 3.8. Architecture interne de la carte Mbed .....	38
Figure 3.9. Capteur US HC-SR04 .....	39
Figure 3.10. Chronogrammes du HC-SR04 .....	40
Figure 3.11. Capteur IR Sharp G2Y0A02.....	41
Figure 3.12. Capteur infrarouge .....	41
Figure 3.13 . Module wifi ESP8266.....	42
Figure 3.14. Description des broches du module ESP8266-01 .....	42
Figure 3.15. Interface de logiciel Eagle .....	43
Figure 3.16. Présentation des étages de la carte de commande.....	44
Figure 3.17. Étage d'alimentation .....	44
Figure 3.18. Étage des capteurs infrarouges.....	45
Figure 3.19. Étage du microcontrôleur Mbed.....	46
Figure 3.20. Étage de périphérique.....	47
Figure 3.21. Carte de commande réalisée .....	48
Figure 3.22. Les modules de la carte support capteurs .....	49
Figure 3.23. Carte support capteurs.....	49
Figure 3.24. Liaison des deux cartes .....	50
Figure 3.25. Schéma positionnement des capteurs.....	51
Figure 3.26. Positionnement des capteurs sur la carte support .....	51
Figure 3.27. Courbes étalonnage capteurs infrarouge .....	52
Figure 4.1. Compilateur Mbed Enligne .....	55
Figure 4.2. Tera Term .....	55
Figure 4.3. Detection d'obstacle dans les repères .....	58
Figure 4.4. Position initiale et finale d'un des tests d'odométrie .....	60
Figure 4.5. Données brutes et la fusion par filtre Kalman avec incertitudes égales .....	61
Figure 4.6. Données brutes et la fusion par filtre Kalman avec incertitudes différentes.....	61
Figure 4.7. Position initiale et finale du test de navigation .....	62

Figure 4.8. Trajectoire du test navigation et évitement d'obstacle.....	63
Figure 4.9. Données de la tâche .....	63
Figure 4.10. Interface de logiciel Android studio .....	64
Figure 4.11. Interface application Robots_cdta .....	65
Figure 4.12. Interface mode manuel.....	66
Figure 4.13. Interface mode autonome .....	67
Figure 4.14. Interface mission cercle .....	68
Figure 4.15. Interface mission Aller vers un but .....	68

## Liste des tableaux

---

Tableau 1.1. Domaines d'utilisation des robots mobiles .....	7
Tableau 1.2. Les avantages et les inconvénients des types de robots mobiles à roues .....	11
Tableau 3.1. Affectation des sorties capteurs IR.....	45
Tableau 3.2. Affectation des lignes capteurs US.....	46
Tableau 3.3. Affectation des lignes du module ESP8266-01.....	47
Tableau 3.4. Affectation des lignes du port USB.....	48
Tableau 3.5. Affectation des lignes de la prise RJ45 .....	48
Tableau 4.1. Résultat test odométrie.....	59

# Introduction générale

---

Aujourd'hui, la robotique permet d'aider l'homme dans ses tâches difficiles, répétitives ou pénibles. De plus, elle constitue le rêve de substituer la machine à l'homme dans ces tâches.

L'un des grands pôles d'intérêt de la robotique est bien la robotique mobile. Un robot mobile doit être capable d'agir et réagir face à l'environnement qui l'entoure et accomplir certaines tâches par lui-même. Pour cela, le robot mobile doit être capable de percevoir son environnement.

La perception d'un robot mobile a pour but de modéliser l'environnement et permettre au robot mobile de planifier ses actions. Pour atteindre cet objectif, le robot mobile a besoin d'interpréter des informations en provenance des capteurs dit extéroceptifs. Un grand nombre de capteurs peuvent être utilisés, mais la perception de chacun d'eux seul est partielle et incertaine. La solution consistera donc, à faire fusionner plusieurs types de capteurs.

La fusion de données multi-capteurs permet d'obtenir des informations plus riches, plus précises et plus fiables. On utilise pour cela les propriétés de redondance et de complémentarité des capteurs.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail intitulé « Instrumentation multi-capteurs d'un robot mobile et fusion de données pour la perception » qui fait partie du projet Navigation et Contrôle d'un Robot Mobile dans un Environnement Dynamique (NAROMED) mené par l'équipe de Navigation et Contrôle des Robots Mobiles (NCRM) au sein de la Division Productique et Robotique (DPR) du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA).

Notre objectif est d'instrumenter le robot par des capteurs (ultrasons, infrarouges) afin de lui permettre d'appréhender son environnement d'une part et de développer une méthode de fusion de données multi-capteurs permettant à ce robot de recueillir les informations de différentes sources (externes) afin de les fusionner et aboutir à une meilleure interprétation de l'environnement d'autre part.

Notre mémoire est organisé en quatre chapitres : le premier chapitre présente des généralités sur les robots mobiles : définitions, domaine d'utilisation, différents types, dispositifs associés...etc.

Le second chapitre décrit les méthodes utilisées pour localisation et la navigation du robot mobile en présentant la fusion de données et filtre de Kalman.

Le troisième chapitre détaille l'environnement matériel qui comprend essentiellement les composants suivants : le robot mobile, la carte Mbed et les deux types de capteurs proprioceptifs et extéroceptifs qu'on va utiliser pour la perception de notre système.

Ensuite, le quatrième chapitre présente la partie software, l'implémentation, les tests et les résultats.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale résumant l'ensemble des travaux réalisés et les perspectives envisagées.



# Chapitre 1 Généralités sur les robots mobiles

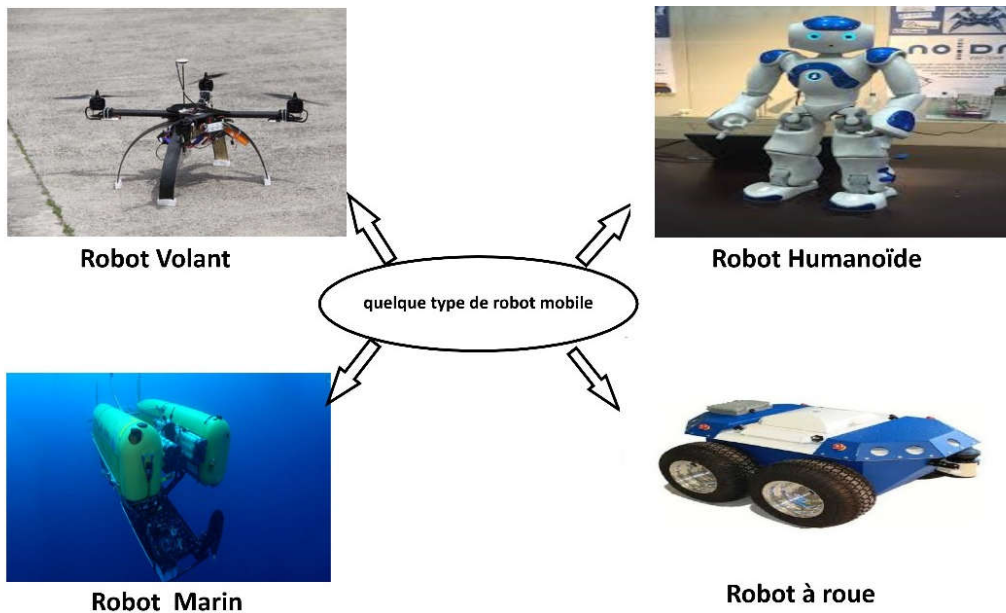
---

## 1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons brièvement les systèmes de la robotique mobile. Nous nous focalisons sur les robots mobiles à roues. Nous présentons aussi les types des robots mobiles à roues suivis par une description de ses différents composants. Le chapitre est clôturé par une conclusion.

## 1.2. Définition robots Mobiles

Un robot mobile est un robot qui peut réaliser un mouvement en reliant un point initial à un point destination. Le mouvement du robot mobile, souvent, n'est pas une tâche en elle-même, mais le robot se déplace pour réaliser une tâche ou mission qui ne peut pas l'assurer en restant statique. En se basant sur la manière avec laquelle un robot mobile se déplace et sur son environnement d'évolution, on peut distinguer plusieurs types de robot mobile, on cite à titre d'exemple (figure 1.1) : robot volant, robot marin, humanoïde, robot mobile à roues, ...etc.



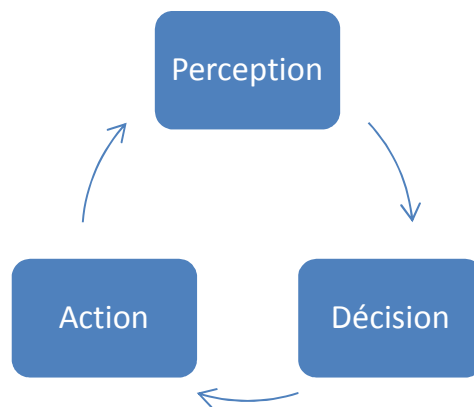
*Figure 1.1. Quelques types de robot mobile*

L'architecture des robots mobiles se structure en cinq éléments :

- La structure mécanique,
- Les capteurs,
- Les actionneurs,
- L'électronique nécessaire,
- Le système de traitement de l'information

### 1.3. Principe de fonctionnement

Pour qu'un robot mobile exécute ses tâches d'une façon autonome, il doit passer par les 3 phases suivantes (figure 1.2) :



*Figure 1.2. Fonctionnement d'un robot mobile*

- **Perception** : c'est l'exploration de l'environnement du robot.
- **Décision** : c'est les commandes délivrées par la partie intelligente du robot.
- **Action** : c'est l'exécution des commandes par ces actionneurs.

### 1.4. Domaine d'utilisation

Le premier but des robots mobiles est de remplacer l'homme dans des activités difficiles et fatigantes pour l'employeur. Le domaine d'application des robots mobiles est vaste, nous présentons quelques applications :

- **L'industrie**

Les robots mobiles ont commencé à être utilisés dans les chaînes d'assemblage industrielles. Ils sont utilisés dans la fabrication des automobiles, des composants et des pièces électroniques, des médicaments et de nombreux produits [1].



**Figure 1.3 . Robot Baxter**

Baxter fait partie de la nouvelle génération de robots intelligents capables de s'adapter à son environnement et à son utilisateur. Il a un meilleur sens des réalités que les robots que l'on croise habituellement dans les secteurs industriels [1].

- **Le domaine militaire**

Les robots mobiles sont de plus en plus utilisés dans le domaine militaire. Aujourd'hui, on peut plus facilement créer des robots discrets et dotés de nombreux capteurs, ce qui est idéal pour des missions d'espionnage ou d'éclairage.



**Figure 1.4. Robot Mule**

Le robot Mule de l'armée américaine est initialement conçu pour transporter les paquetages des soldats américains. Ce véhicule autonome est également doté de radars, sonars, d'une caméra infrarouge...etc[1].

- **Utilisation civile :**

De plus en plus de tâches sont confiées aux robots. Ils servent à remplacer les personnes qui sont chargées de tâches civiles (Nettoyer la ville, aider la population, s'occuper des lieux publics...etc.).



**Figure 1.5 . Robot nettoyeur de ville**

Ce robot est équipé de deux caméras et d'un GPS. Il circule dans la rue de manière autonome en engouffrant la neige avec sa « bouche ». Puis il la rejette sous forme de blocs de glace [1].

- **L'usage domestique :**

Ces dernières années, on a vu de nombreux robots s'installer chez les particuliers pour effectuer des tâches à la place de leur propriétaire. Ceux-ci sont capables de faire le ménage, tondre la pelouse, nettoyer la piscine... Ce qui conduit certains clients à se procurer ces domestiques contemporains.



**Figure 1.6 .Robot aspirateur**

Le robot aspirateur fonctionne de manière autonome sur tous types de sol. Grâce à ses capteurs, il évite les escaliers et tout le type d'obstacles. Il retourne à sa base pour se recharger

sans assistance. Il est possible de délimiter une surface précise à nettoyer avec les accessoires fournis [1].

Nous présentons dans ce tableau quelque autre application des robots mobiles dans différents domaines :

Domaines	Applications
Industrie nucléaire	- surveillance de sites - manipulation de matériaux radioactifs - démantèlement de centrales
Chimique	- surveillance de site - manipulation de matériaux toxiques
Mine	- assistance d'urgence
Agricole	- cueillette de fruits - traite, moisson, traitement des vignes
Espace	- exploration
Sous-marine	- pose de câbles - recherche de modules - recherche de navires immergés - inspection des fonds marins

*Tableau 1.1. Domaines d'utilisation des robots mobiles*

## **1.5. Avantages et inconvénients**

Comme tout autre système, les robots mobiles eux-mêmes ont des avantages et des inconvénients.

### **1.5.1. Les avantages**

- La robotique et l'automatisation peuvent dans de nombreuses situations d'accroître la productivité, la sécurité, l'efficacité, la qualité et la cohérence des produits.
- Les robots mobiles peuvent travailler dans un environnement dangereux, sans le besoin de soutien de la vie, ou les préoccupations concernant la sécurité.
- Les robots mobiles n'ont pas besoin de l'éclairage, la climatisation, de ventilation et de protection contre le bruit.

- Ils travaillent continuellement, sans ressentir une fatigue ou l'ennui, et ne nécessitent pas une assurance médicale ou des vacances.
- Aussi, ils sont de précision répétable.
- Les robots mobiles peuvent être beaucoup plus rapides que les humains.

### **1.5.2. Les inconvénients**

- Réponse inadéquate ou mal.
- Le manque de pouvoirs prendre une décision.
- Consommation de l'énergie.
- Ils peuvent causer des dommages à d'autres appareils, et la blessure de l'homme.
- Leurs coûts élevés.

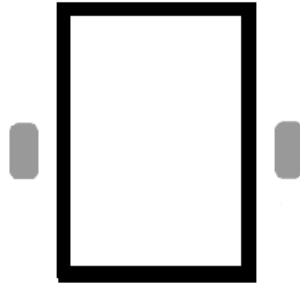
## **1.6. Les types des robots mobiles**

Dans la suite de ce mémoire, on va s'intéresser uniquement au robot mobile à roues. Il existe plusieurs classes de robots mobiles déterminées, principalement, par la manière dont ils se déplacent. Nous citerons ici les quatre classes principales de robots mobiles à roues.

### **1.6.1. Robot unicycle**

Un robot de type unicycle est actionné par deux roues indépendantes, il possède éventuellement des roues folles pour assurer sa stabilité. Son centre de rotation est situé sur l'axe reliant les deux roues motrices (figure 1.7).

C'est un robot non-holonome, en effet, il est impossible de le déplacer dans une direction perpendiculaire aux roues de locomotion. Sa commande peut être très simple, il est assez facile de le déplacer d'un point à un autre par une suite de rotations simples et de lignes droites [2].

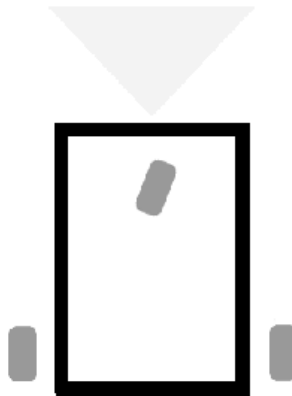


*Figure 1.7. Robot de type unicycle*

### **1.6.2. Robot tricycle**

Un robot de type tricycle est constitué de deux roues fixes placées sur un même axe et d'une roue centrée orientable placée sur l'axe longitudinal (figure 1.8).

Le mouvement du robot est donné par la vitesse des deux roues fixes et par l'orientation de la roue orientable. Son centre de rotation est situé à l'intersection de l'axe contenant les roues fixes et de l'axe de la roue orientable [2].

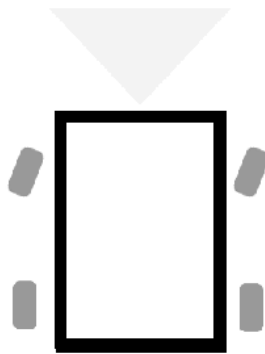


*Figure 1.8. Robot de type tricycle*

### 1.6.3. Robot voiture

Un robot de type voiture est semblable au tricycle, il est constitué de deux roues fixes placées sur un même axe et de deux roues centrées orientables placées elles aussi sur un même axe (figure 1.9). Le robot de type voiture est cependant plus stable puisqu'il possède un point d'appui supplémentaire.

Toutes les autres propriétés du robot voiture sont identiques au robot tricycle, le deuxième peut être ramené au premier en remplaçant les deux roues avant par une seule placée au centre de l'axe, et ceci de manière à laisser le centre de rotation inchangé [2].

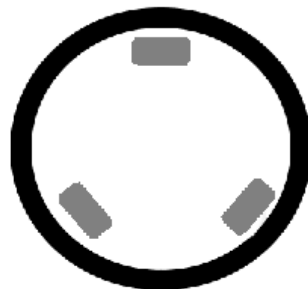


*Figure 1.9. Robot de type voiture*

### 1.6.4. Robot omnidirectionnel

Un robot omnidirectionnel est un robot qui peut se déplacer librement dans toutes les directions. Il est en général constitué de trois roues décentrées orientables placées en triangle équilatéral (figure 1.10).

L'énorme avantage du robot omnidirectionnel est qu'il est holonome puisqu'il peut se déplacer dans toutes les directions. Mais ceci se fait aux dépens d'une complexité mécanique bien plus grande [2].



*Figure 1.10. Robot de type omnidirectionnel*



### 1.6.5. Comparaison des différents types des Robots mobiles

Le choix de robot mobile se fait selon ses tâches voulues, nous présentant les avantages et inconvénients dans le tableau (Tableau 1.2) :

Type du robot	Avantages	Inconvénients
<b>Unicycle</b>	* Stable  * Rotation sur soi-même  * Complexité mécanique faible	* Non-holonome
<b>Tricycle</b>	* Complexité mécanique  * Modérée	* Non-holonome  * Peu stable  * Pas de rotation sur soi-même
<b>Voiture</b>	* Stable  * Complexité mécanique modérée	* Non-holonome  * Pas de rotation sur soi-même
<b>Omnidirectionnel</b>	* Holonome  * Stable  * Rotation sur soi-même	* Complexité mécanique Importante

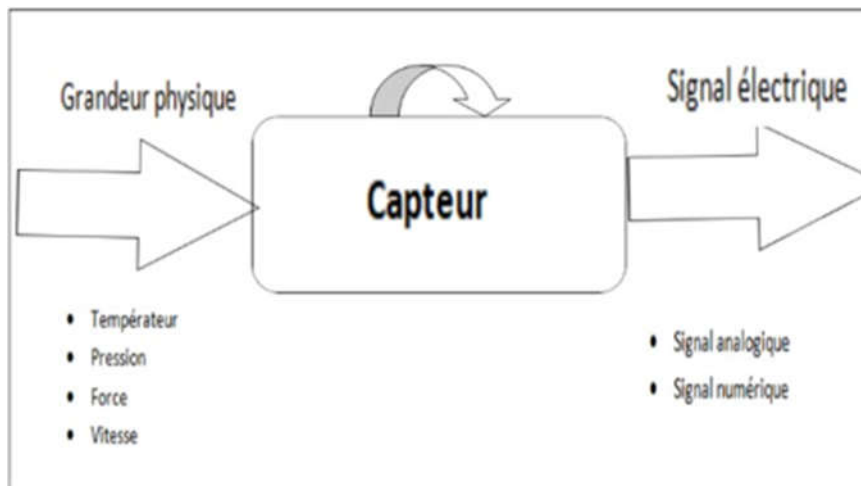
*Tableau 1.2. Les avantages et les inconvénients des différents types de robots mobiles à roues*

### 1.7. Capteurs

Dans la robotique mobile, un robot a besoin de certaines informations pour exécuter ses tâches convenablement. Comme son nom l'indique, un capteur capte cette information et la transmet au calculateur. Cette information peut être une vitesse, une position, une direction, une orientation, vitesse angulaire...etc.

### 1.7.1. Définition des capteurs

Un capteur est un dispositif permettant de détecter, en vue de le quantifier et de le représenter, un phénomène physique sous la forme d'un signal, généralement électrique (figure 1.11). Le capteur se différencie du détecteur par sa possibilité de délivrer une grandeur physique directement utilisable pour une mesure ou une commande [3].



*Figure 1.11. Principes de fonctionnement des capteurs*

### 1.7.2. Classification des capteurs

On peut classer les capteurs de plusieurs manières :

- Par le mesurande qu'il traduit (capteur de position, de température, de pression, etc.)
- Par son rôle dans le processus industriel (contrôle de produit finis, de sécurité, etc.)
- Par le signal qu'il fournit en sortie qui peut être numérique, analogique, logique.
- Par leur principe de traduction du mesurande (capteur résistif, piézoélectrique, etc.)
- Par leur principe de fonctionnement : capteur Actif ou Passif.

Toutes ces classifications permettent d'avoir une vue d'ensemble des capteurs et bien sûr aucune des méthodes de classification n'est meilleure que l'autre car toutes présentent des avantages et des inconvénients [3].

### **1.7.3. Capteurs utilisés dans les systèmes de robotique mobile**

L'utilisation des capteurs dans les robots mobiles peut être influencée par l'environnement dans lequel le système est amené à évoluer. Le but est donc de réaliser un système qui utilise le mieux possible les capteurs ou une combinaison de capteurs en tenant compte de leurs conditions d'utilisation, et ceci requiert une bonne connaissance de leurs caractéristiques.

Nous pouvons définir deux catégories de capteurs couramment utilisées en robotique mobile : ceux qui délivrent une information caractérisant l'environnement et ceux qui délivrent une information caractérisant l'état interne du robot. Les premiers sont appelés capteurs extéroceptifs qui fournissent des informations sur le monde extérieur du système mobile, et les seconds sont appelés capteurs proprioceptifs qui fournissent des informations propres au comportement interne du système mobile.

#### ***a. Capteurs proprioceptifs***

Les capteurs proprioceptifs fournissent par intégration des informations élémentaires sur les paramètres cinématiques du système mobile. Les informations sensorielles gérées dans ce cadre sont généralement des vitesses, des accélérations, des angles de giration, des angles d'altitude. Cependant, ils ne peuvent pas procurer de renseignements lors de l'arrêt du système mobile. On peut regrouper les capteurs proprioceptifs en deux familles :

- Les capteurs de déplacement qui comprennent les accéléromètres, les radars Doppler et les encodeurs optiques. Cette catégorie permet de mesurer des déplacements élémentaires, des variations de vitesse ou d'accélération sur des trajectoires rectilignes ou curvilignes.
- Les capteurs d'attitude, qui mesurent deux types de données : les angles de cap et les angles de roulis et de tangage. Ils sont principalement constitués par les gyroscopes, les gyromètres, les gyrocompas, les capteurs inertiels composites, les inclinomètres et les magnétomètres. Ces capteurs sont en majorité de type inertiel.

Parmi ces capteurs, l'encodeur optique est l'un des capteurs indispensables dans la robotique mobile.

- **L'encodeur optique**

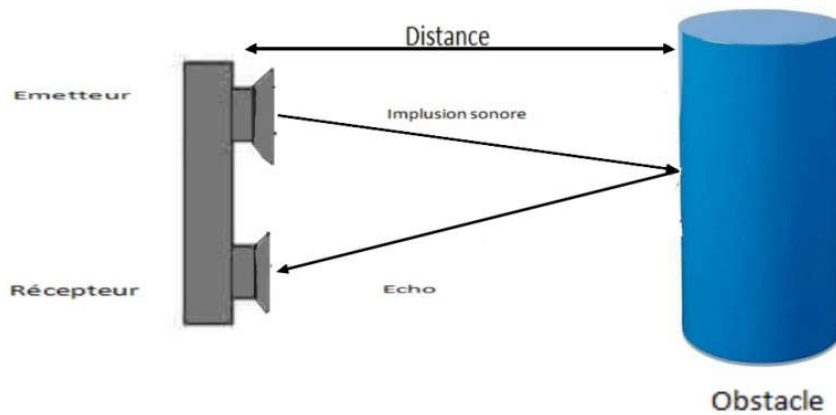
C'est un capteur qui permet de convertir une rotation en signal électrique dans le but de calculer nombre de tour et le sens de rotation. Il comporte un disque (généralement en verre) solidaire d'un axe. Lorsque l'axe tourne, le disque tourne avec lui. Sur ce disque, sont tracés deux séries trouées de petits traits, décalées l'une par rapport à l'autre. Une source de lumière se trouve devant chaque série de traits et de l'autre côté du disque (en face de chaque source lumineuse) se trouve un récepteur de lumière. Ce récepteur convertit le signal lumineux reçu en signal électrique. Lorsqu'un trait passe entre la source et le récepteur, ce dernier ne reçoit plus de lumière, il génère un signal à l'état bas (0V). Si le disque tourne, le trait est remplacé, devant la source lumineuse, par une zone transparente. Le récepteur reçoit alors de la lumière et il génère un signal à l'état haut (+Vcc). Ceci est vrai pour les deux séries de traits. Lorsque l'axe tourne, le codeur optique génère donc deux séries d'impulsions (à 0V et à +Vcc) décalées dans le temps l'une par rapport à l'autre.

Enfin, les capteurs proprioceptifs sont des capteurs que l'on peut utiliser le plus directement pour la localisation, mais ils souffrent d'une dérive au cours du temps qui ne permet pas en général de les utiliser seuls.

- b. Capteurs extéroceptifs**

Les capteurs extéroceptifs sont employés en robotique mobile pour collecter des informations sur l'environnement d'évolution du système mobile. Ils sont le complément indispensable aux capteurs proprioceptifs présentés précédemment. Ils sont notamment utilisés dans les domaines d'application tels que l'évitement d'obstacle, la localisation, la navigation et la modélisation d'environnements. Les principaux capteurs utilisés en robotique mobile sont : les capteurs télémétriques (les ultrasons, les lasers et les infrarouges, les Radars) et les caméras.

### **b.1. Les capteurs ultrasons**



**Figure 1.12. Capteur ultrason**

Les capteurs à ultrasons (ou télémètres ultrasonores) sont aujourd'hui les capteurs les plus communément employés dans les systèmes de robotique mobile autonome en raison de leurs bas prix, de leur faible consommation, de leur simplicité et de leur compacité.

Ils ont été exploités dans des domaines tels que la navigation, la modélisation d'environnement, l'évitement d'obstacle ou l'estimation de la position. Le capteur à ultrasons mesure le temps de vol d'une onde ultrasonore (de 20 KHz à 200 KHz) entre son émission et sa réception après réflexion. À partir de ce temps et connaissant la vitesse de propagation de l'onde, la distance séparant le capteur de l'obstacle qu'il perçoit est directement disponible sans analyses complémentaires. Les acquisitions des mesures sont rapides, ils peuvent donc être utilisés pour les processus qui demandent un traitement en temps réel comme l'évitement d'obstacles.

Il existe néanmoins des erreurs potentielles comme la variation de la vitesse de propagation de l'onde qui peut être influencée par les changements de température, par les courants d'air et dans une moindre mesure par l'humidité.

Une autre caractéristique de ces capteurs est leur cône d'émission assez large (de 20 à 30°) qui ne permet pas de connaître précisément la position de l'obstacle dans le cône d'émission du capteur. Le prix des capteurs à ultrasons n'étant pas excessif, il est possible de les disposer en ceinture autour du système mobile afin de percevoir une grande partie de l'environnement. Par ce dispositif, des régions à trous correspondant à l'espace entre les cônes de deux capteurs voisins apparaissent.

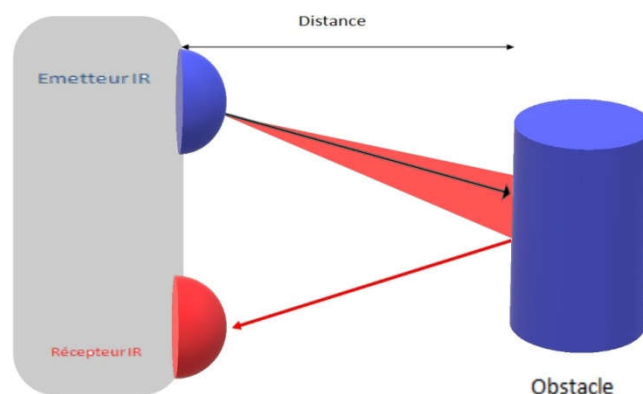
Une autre méthode pour obtenir un balayage complet de l'environnement est d'utiliser un capteur tournant. Cela nécessite l'utilisation d'un système électromécanique qui commande les rotations du capteur.

Par ailleurs, des systèmes composés de plusieurs capteurs ont été conçus pour affiner les mesures, par exemple un émetteur-récepteur et deux récepteurs qui constituent un capteur tri-aural.

La différence entre les temps de réception de l'onde des trois récepteurs détermine l'orientation et la forme de la cible (coin, plan, cylindre, etc.). En effet, si les trois points de mesure sont alignés, l'obstacle détecté est certainement un plan ; par contre si les trois points forment un arc, il s'agit sans doute d'un coin (arc courbé vers le capteur) ou d'une arête (arc fuyant le capteur). La valeur de l'angle est donnée par l'expression suivante :

$$\theta = \Delta l / 2d \quad (1.1)$$

### ***b.2. Les capteurs à infrarouges***



**Figure 1.13. Capteur infrarouge**

Les capteurs à infrarouges fonctionnent suivant le même principe que les capteurs à ultrasons. Ils se composent d'un couple émetteur-récepteur. L'émission s'effectue par une diode électroluminescente infrarouge. Le récepteur est une photodiode ou un phototransistor, sensible au flux lumineux rétrodiffusé par la cible.

Les capteurs à infrarouges sont d'un faible encombrement, mais sensibles aux perturbations lumineuses ainsi qu'à la nature des surfaces réfléchissantes. Leurs portées n'étant que de quelques mètres, ils sont utilisés essentiellement pour détecter les obstacles proches.

### **b.3. Les capteurs Laser**

Tout comme le capteur à ultrasons, le capteur LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) est un capteur extéroceptif utilisé pour mesurer la distance. Pour cela, le capteur émet un faisceau LASER qui est un processus d'émission stimulée qui fait apparaître un photon dans le même mode du champ que l'onde incidente, l'onde est amplifiée.

La caractéristique principale du capteur LASER est la rapidité, la résolution ainsi que la capacité de la mesure, mais en revanche, les capteurs LASER reste des capteurs avec un coût un peu élever par rapport aux autres capteurs utilisés en robotiques mobiles.



**Figure 1.14. Capteur laser**

### **b.4. RADAR**

Le RADAR (terme dérivé de l'acronyme anglais **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging, « détection et de mesure des distances par rayon ») est un système qui utilise des ondes électromagnétiques pour mesurer les distances, les altitudes, les directions et les vitesses des objets statiques ou mobiles tels que les avions, les bateaux, les véhicules motorisés, les formations météorologiques et le terrain lui-même. Son fonctionnement est basé sur l'émission d'une impulsion radio, qui est réfléchi dans la cible et est généralement reçue dans la même position de l'émetteur. De cet "echo" vous pouvez extraire beaucoup d'informations. L'utilisation d'ondes électromagnétiques de différentes longueurs d'onde permet de détecter des objets au-delà de la gamme des autres types d'émissions (lumière visible, son, etc.).

Ses domaines d'application comprennent la météorologie, le contrôle du trafic aérien et terrestre, la robotique mobile et une grande variété d'utilisations militaires [4].

### **b.5. Caméra**



**Figure 1.15. Caméra**

La caméra est un capteur photographique photosensible qui détecte et convertit un rayonnement électromagnétique (UV, visible ou IR) en un signal électrique analogique. Elle est formée par des millions de composants sensibles à la lumière (photodiodes ou phototransistors) qui, lorsqu'ils sont exposés à cette dernière, capturent les vagues projetées par un objectif, qui constitue l'image. Elle est une méthode attractive pour percevoir l'environnement car elle semble proche que les méthodes utilisées par l'humain plus qu'elle fournit une grande quantité d'informations sur l'environnement. Le traitement des données des informations fournies par les capteurs de caméra est difficile mais c'est une voie de recherche très explorée et prometteuse pour la robotique mobile [5].

Actuellement, les types utilisés sont des dispositifs à couplage de charges semi-conducteurs (charge-coupled devices CCD) ou des capteurs de pixels actifs dans des technologies (complementary metal-oxide-semiconductor CMOS) [6].

Le rôle d'une caméra en robotique mobile est de percevoir l'environnement du système. Le point très fort de ce capteur est sa richesse en informations.

## **1.8. Actionneurs**

Selon le principe de fonctionnement de la robotique mobile, après que la décision soit prise par le système, on passe alors à l'action. Les actionneurs sont le matériel responsable de toute action (déplacement, rotation...etc.) délivrée par le système.



### 1.8.1. Définition des actionneurs

Un actionneur est un dispositif qui transforme l'énergie délivrée par l'interface de puissance, en énergie utilisable par les effecteurs de processus. Le schéma fonctionnel d'un actionneur ainsi que quelques symboles des différents types d'actionneurs sont représentés à la figure ci-dessous. Les moteurs électriques sont un exemple typique d'actionneur utilisé en robotique mobile [7].

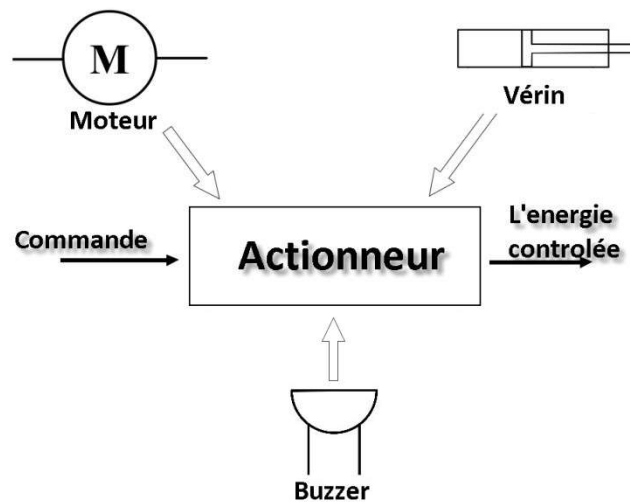


Figure 1.16. Schéma fonctionnel et symboles de quelques actionneurs de robotique mobile

Il existe plusieurs types d'actionneurs qui sont représentés dans la figure ci-dessous :

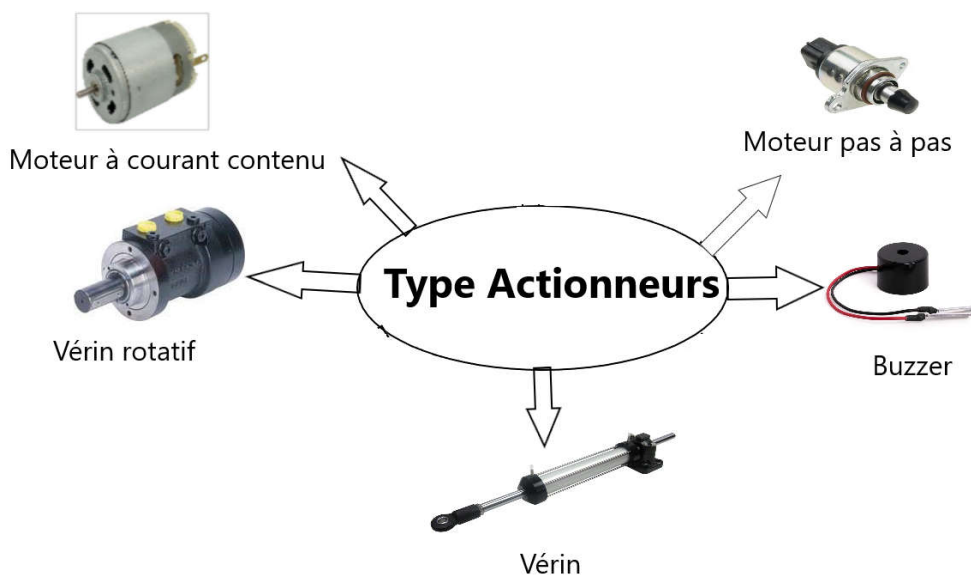


Figure 1.17. Quelques types d'actionneur

Certainement, l'actionneur indispensable dans la robotique mobile est bien le Moteur.

### 1.8.2. Moteur à courant continu

Un moteur à courant continu (MCC) est un dispositif électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique pour créer une rotation, selon la source d'énergie.

Un MCC peut être utilisé en 2 fonctionnements, en tant que Moteur si l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique, ou bien en tant que Générateur (dynamo) si l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique [8].

Le moteur à courant continu est constitué de trois principales parties :

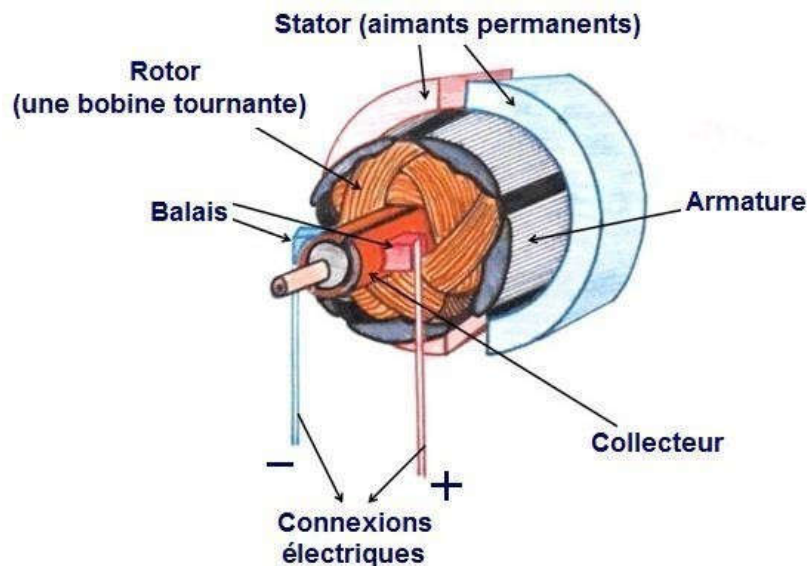


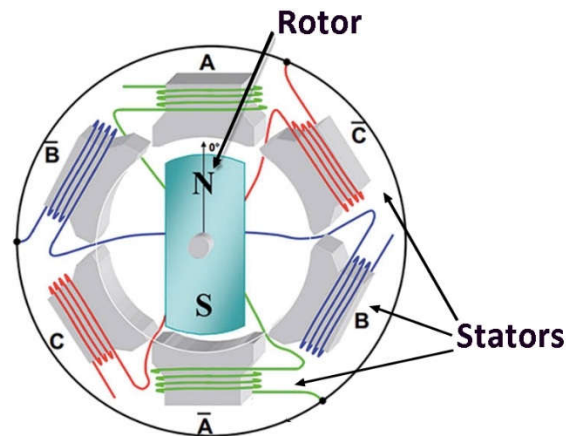
Figure 1.18. Les composants d'un MCC

- **L'inducteur (Stator) :** C'est un aimant ou un électroaimant (un bobinage parcouru par un courant continu), il est situé sur la partie statique du moteur. Son rôle est la création d'un champ magnétique.
- **L'induit (Rotor) :** c'est un bobinage parcouru par un courant continue situer sur la partie tournante du moteur.
- **Le collecteur et les balais :** Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliée les extrémités du bobinage de l'induit. Les balais sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation. Donc le dispositif collecteur/balais permet de faire circuler un courant dans l'induit(Rotor).

### 1.8.3. Moteur pas à pas

Contrairement au MCC, Le moteur pas à pas permet la conversion unidirectionnelle de l'énergie électrique à l'énergie mécanique seulement. Aussi, les moteurs pas à pas peuvent contenir plusieurs stators.

La particularité des moteurs pas à pas est qu'ils ont des déplacements angulaires discrets, ce qui signifie qu'il est capable de tourner un certain nombre de degrés (pas ou demi - pas) en fonction de son entrée contrôle [9].



*Figure 1.19. Les composants d'un moteur pas à pas*

Le moteur pas à pas est constitué d'un rotor avec deux pôles, Nord et Sud, ainsi que d'un ou plusieurs stators : à chacune de ces parties, est associé un bobinage avec deux phases en alimentant l'une ou l'autre des phases, on peut ainsi déterminer le sens de rotation du rotor.

## 1.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur la définition des robots mobiles. Nous avons présenté au cours de ce chapitre leurs types ainsi que leurs domaines d'utilisation. Nous avons aussi présenté la définition des capteurs et des actionneurs utilisés dans la réalisation des robots mobiles.

Dans le prochain chapitre, nous nous intéresserons particulièrement aux méthodes de navigation et de localisation utilisées dans la robotique mobile.

## Chapitre 2 Les méthodes de localisation et de navigation

---

### 2.1. Introduction

La localisation de robot mobile est une étape très importante pour la reconnaissance de l'environnement et de son état de déplacement.

Dans ce chapitre, nous présentons trois sections importantes : une introduction sur les méthodes de localisation des robots mobiles qui comprend l'odométrie et SLAM, introduction sur les méthodes de navigation qui comprend le champ de potentiel ensuite la perception de robot basé sur la fusion des données, Nous terminons ce chapitre par une conclusion.

### 2.2. Méthode de localisation

Afin de pouvoir se localiser dans un environnement, un robot mobile a besoin des capteurs lui donnant des informations sur sa position absolue dans l'espace. Dans un environnement d'intérieur, les robots mobiles utilisent principalement l'odométrie, ainsi que la fusion de données pour obtenir des informations bien précises.

La localisation est définie comme étant l'action de déterminer l'emplacement où se situe une chose, un phénomène ou son origine [10].

#### 2.2.1. Odométrie

L'odométrie est une technique permettant d'estimer la position d'un véhicule en mouvement. Le terme odométrie est composé de deux mots grecs qui sont : hodos qui signifie « voyage » et metron qui signifie « mesure ». La technique d'odométrie est très utilisée par de nombreux concepteurs pour localiser les robots mobiles par rapport à leurs points de départ [12].

L'idée fondamentale de cette méthode est l'intégration de l'incrément de la position, calculé grâce à des encodeurs montés sur les roues, par rapport au temps. La différence de déplacement entre roue droite et roue gauche permet de calculer la variation de l'orientation ainsi que la variation de la position entre deux positions de robot.

Donc il s'agit de reconstruire une estimée de la position du robot  $(x, y, \theta)$  par rapport à la trajectoire du robot.

Cette méthode est de ce fait fortement tributaire de la qualité du sol sur lequel le robot se déplace, les incertitudes sur le diamètre exact des roues, sur les paramètres géométriques du robot, sur la résolution des encodeurs, génèrent des erreurs de différents types, qui vont s'accumuler très rapidement en odométrie.

Il en résulte malheureusement une accumulation non bornée de l'erreur. L'erreur en orientation induit d'importantes erreurs en position et les deux erreurs croissent en fonction de la distance parcourue. Les erreurs peuvent être regroupées en deux catégories selon leur source. Les erreurs systématiques résultent des imperfections du modèle géométrique du robot (diamètres des roues différents, incertitude sur les dimensions des axes de la base...). Les erreurs non-systématiques résultent de l'interaction entre le robot et son environnement tel que les glissements des roues avec le sol.

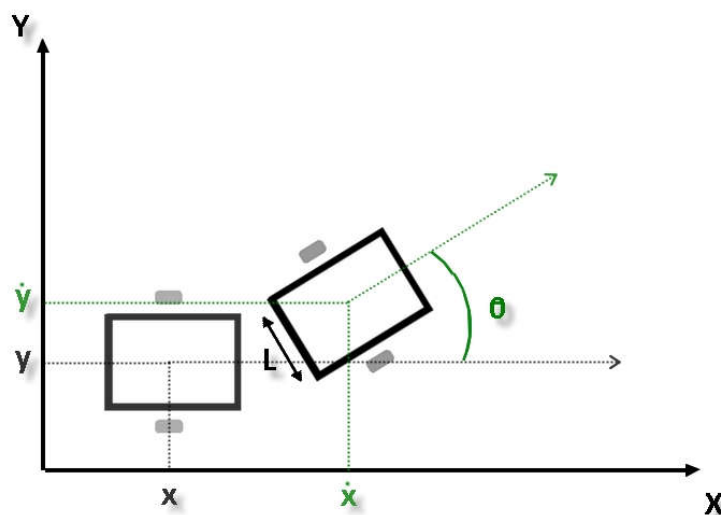


Figure 2.1. Positionnement du robot

Afin d'obtenir les informations à extraire de cette méthode, nous avons utilisé les équations suivantes :

$$V = \frac{vg+vd}{2} \quad (2.1)$$

$$\Delta X = V \cos \left( \theta + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$\Delta Y = V \sin \left( \theta + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad (2.3)$$

$$\Delta\theta = \frac{vg-vd}{L} \quad (2.4)$$

$$\dot{X} = X + \Delta X \quad (2.5)$$

$$\dot{Y} = Y + \Delta Y \quad (2.6)$$

$$\dot{\theta} = \theta + \Delta\theta \quad (2.7)$$

Avec :

V : vitesse moyenne

Vg : vitesse de la roue gauche

Vd : vitesse de la roue droite

L : distance entre roues

(2.1) déplacement selon X

(2.2) déplacement selon Y

(2.3) variation d'angle  $\theta$

X, Y,  $\theta$  : paramètres précédents.

$\dot{X}$ ,  $\dot{Y}$ ,  $\dot{\theta}$  : paramètres actuels.

### 2.2.2. SLAM

La localisation et cartographie simultanées, connue en anglais sous le nom de SLAM (simultaneous localization and mapping) ou CML (concurrent mapping and localization), est une technique utilisée par les robots et les véhicules autonomes pour construire une carte d'un environnement inconnu dans lequel il se trouve et de s'y localiser.

SLAM utilise les données des capteurs (ou un capteur) comme : laser et caméras, pour modéliser son environnement inconnu au préalable.

### 2.3. Méthode de navigation

La navigation d'un robot mobile est la possibilité de planifier et se déplacer d'un point de départ à un point but. La navigation est divisée en 2 grands types, une navigation globale ou réactive qui signifie une navigation dans un environnement inconnu et une navigation locale qui signifie une navigation dans un environnement connu déjà par le robot.

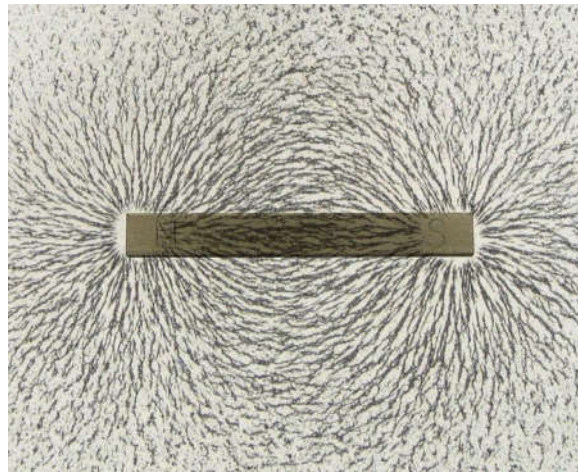
Il existe néanmoins un très grand nombre de méthodes permettant à un robot mobile de se déplacer, parmi ces méthodes, nous citons :

- Roadmap.
- Champ de potentiel.
- La logique floue.
- Les réseaux de neurones.
- Les algorithmes génétiques.

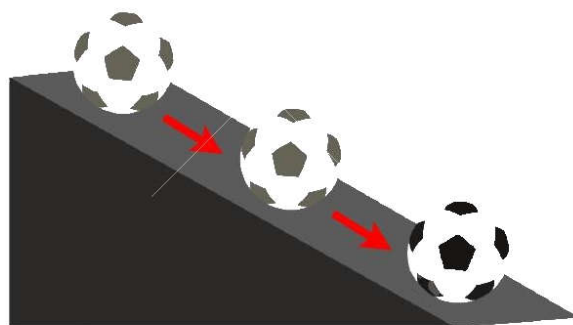
Nous avons choisi l'approche du champ de potentiel par rapport à sa rapidité en temps d'exécution.

### 2.3.1. Champs de potentiel

L'idée du champ de potentiel est tirée de la nature. Par exemple, une poudre de fer autour dans un aimant ou un ballon roulant dans une pente. L'idée est que selon la force exercée par l'aimant ou la pente, la poudre de fer ou le ballon peuvent arriver à la source de cette force.



*Figure 2.2. Aimant et poudre de fer*



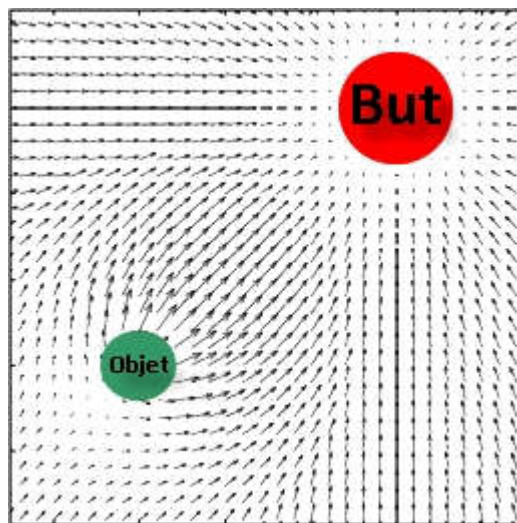
*Figure 2.3. Ballon dans une pente*

En robotique, nous pouvons simuler le même effet, en créant un champ de potentiel artificiel qui attirera le robot vers le but.

En concevant un champ potentiel adéquat, nous pouvons faire en sorte que le robot présente des comportements simples. Par exemple, supposons qu'il n'y a pas d'obstacle dans

l'environnement, et que le robot devrait chercher ce but. Pour ce faire dans la planification conventionnelle, il faut calculer la position relative du robot par rapport au but, puis appliquer les forces appropriées qui conduiront le robot au but.

Dans l'approche du champ de potentiel, nous créons simplement un but attractif dans l'objectif est de l'atteindre. Le champ de potentiel est défini sur l'ensemble de l'espace libre, et à chaque pas de temps, nous calculons le potentiel déposé à la position du robot, puis calculons la force induite par ce champ. Le robot devrait alors se déplacer selon cette force. Cette figure illustre ce concept [15] :



**Figure 2.4. Champ de potentiel**

Dans la méthode du champ de potentiel, on distingue deux forces : attractif et répulsif, le mouvement est obtenu en sommant ces deux forces :

$$P(x,y) = U_{attr}(x,y) + U_{repu}(x,y) \quad (2.14)$$

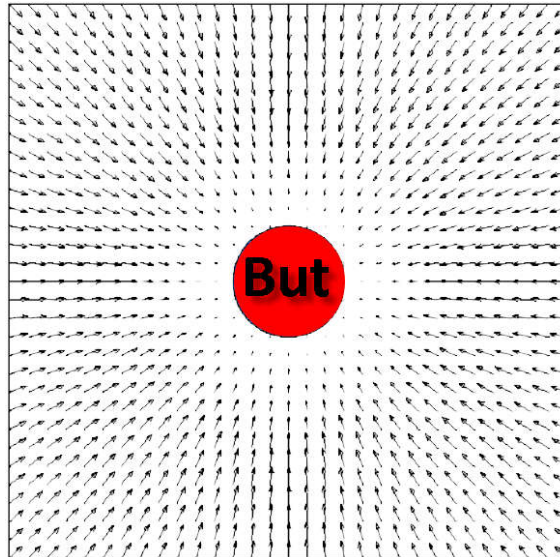
**a. Champ de force attractif**

Le champ de force attractive est celui qui permet à l'objet d'atteindre son but, il peut être calculé par :

$$U_{attr}(q) = \frac{\xi}{2} \|q - q_{but}\|^2 \quad (2.15)$$

$$F_{attr}(q) = -\nabla U_{attr}(q) = -\xi (q - q_{but}) \quad (2.16)$$





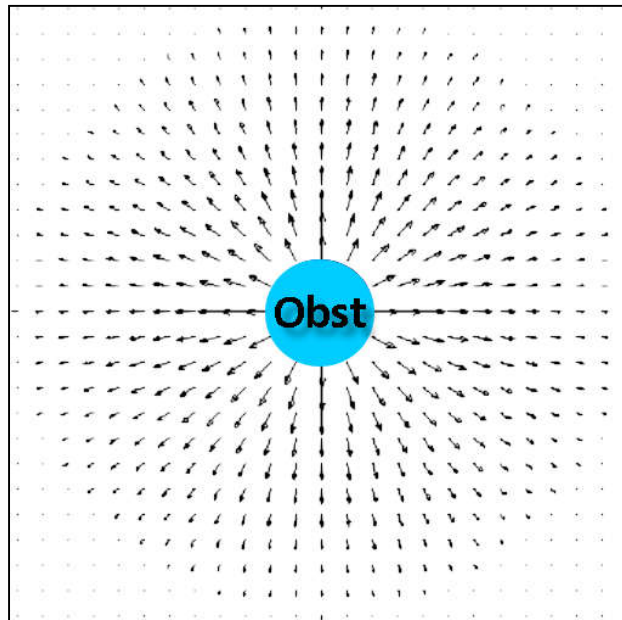
**Figure 2.5. Force attractive**

**b. Champ de force répulsif**

Le champ de force répulsif est celui qui permet à l'objet d'éviter les obstacles, il peut être calculé par :

$$U_{\text{repu}}(q) = \frac{1}{2} v \left( \frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \quad (2.17)$$

$$F_{\text{repu}}(q) = -\nabla U_{\text{repu}}(q) = v \left( \frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho(q)^2} \frac{q - q_{\text{obs}}}{\rho(q)} \quad (2.18)$$



**Figure 2.6. Force répulsive**

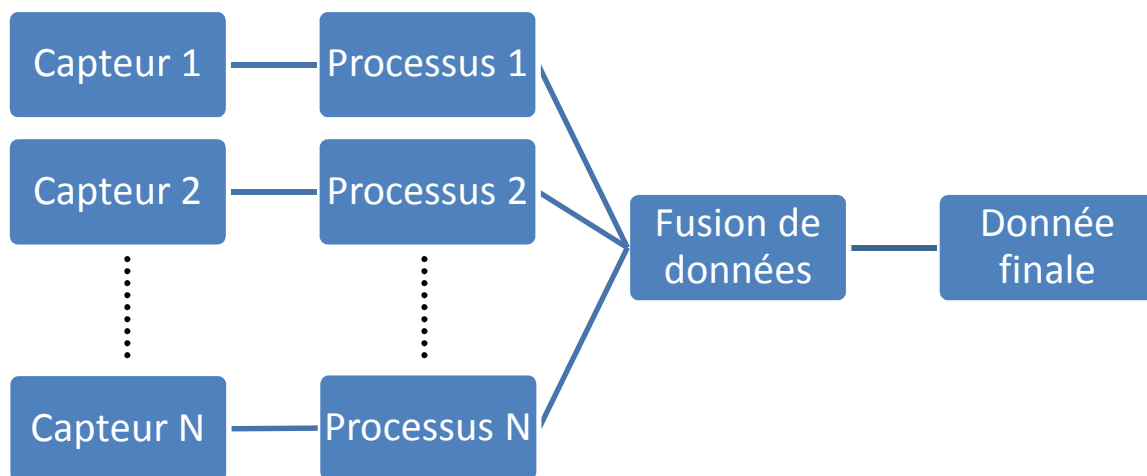
## 2.4. Perception

La perception est l'acquisition des informations de l'environnement par le robot et c'est l'une des tâches les plus importantes d'un système autonome. Ceci est réalisé en effectuant des mesures à l'aide de divers capteurs et ensuite extraire l'information utile à partir de ces mesures.

### 2.4.1. La fusion de données

La fusion de données est le processus d'intégration de plusieurs sources de données pour produire des informations plus cohérentes, précises et utiles que celles fournies par une source de données individuelle [13].

La fusion de données capteurs également connus sous le nom de fusion de données multi-capteurs est la technique de combiner les données issues de plusieurs capteurs physiques pour produire une information plus précise et plus cohérente, même si chaque capteur peut ne pas être fiable par lui-même.



*Figure 2.7. Exemple de fusion de données multi capteurs*

Les raisons pour lesquelles on opte à la fusion de données multi-capteurs par rapport à l'utilisation d'un seul capteur sont :

- Les mesures faites par chacun des capteurs sont incertaines et parfois incorrectes, un système à un seul capteur n'a pas la possibilité de réduire ces incertitudes.

- Différents types de capteurs peuvent fournir différentes informations, mais un seul capteur ne peut pas couvrir toutes les tâches et parfois ne délivre qu'une seule information.
- Dans les systèmes à un seul capteur, la défaillance du capteur entraîne une défaillance complète du système.
- Un seul capteur peut uniquement fournir des informations partielles sur son environnement d'exploitation.

### **2.4.2. Méthodes de fusion de données**

La fusion de capteurs est un terme qui couvre un certain nombre de méthodes et d'algorithmes, notamment :

- Théorème de la limite centrale
- Logique floue
- Réseau neuronal à convolution
- Théorème du Bayes

Parmi ces méthodes, nous avons choisi un cas particulier du théorème du Bayes qui est le filtre de Kalman par rapport à sa simplicité d'implémentations dans les systèmes embarqués.

- Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est une technique mathématique développé par le professeur américain Rudolf Kalman qui sert à identifier l'état caché d'un système dynamique linéaire à partir de mesures bruitées. Le filtre de Kalman est un algorithme récursif à réponse impulsionnelle infinie (RII) c.-à-d. sa réponse est fondée sur les valeurs du signal d'entrée ainsi que les valeurs précédentes de cette même réponse (signal de sortie). Il peut fonctionner en temps réel en utilisant uniquement les mesures d'entrée actuelles, l'état précédemment calculé et sa matrice d'incertitude, il ne nécessite aucune information supplémentaire [14].

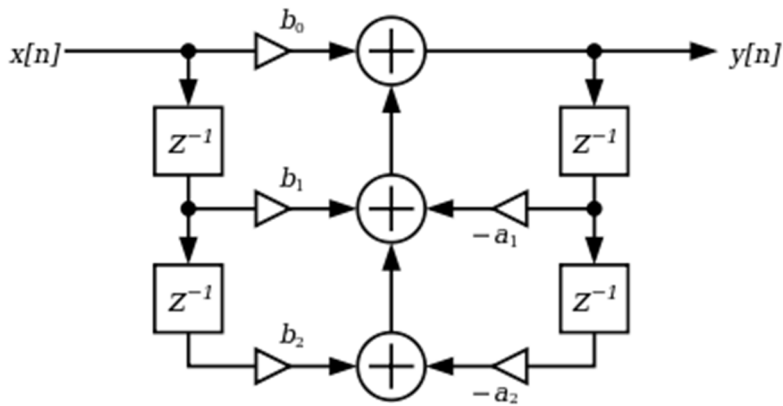


Figure 2.8. Exemple d'un filtre RII

Le filtre de Kalman estime l'état actuel d'un processus contrôlé en temps discret qui est régi par l'équation de différence stochastique linéaire  $\hat{x}_k$  et une mesure  $Z_{k-1}$  :

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (2.7)$$

$$Z_{k-1} = Cx_{k-1} + v_{k-1} \quad (2.8)$$

Les variables aléatoires  $w_{k-1}$  et  $v_{k-1}$  représentent le bruit du système et le bruit de mesure (respectivement).

Le filtre de Kalman est généralement décrit par deux phases : prédiction et correction.

- **La prédiction** : cette phase de prédiction utilise l'état estimé de l'instant précédent pour produire une estimation de l'état courant.

Ses équations sont :

$$\hat{x}_{k|k-1} = Ax_{k-1|k-1} + Bu_k \quad (2.9)$$

$$P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q \quad (2.10)$$

Avec :

$\hat{x}_{k|k-1}$ : état de prédiction.

A: matrice qui relie l'état précédent k-1 à l'état actuel k.

B: matrice qui relie l'entrée de commande  $u_k$  à l'état  $x$ .

$u_k$  : entrée de commande.

$P_{k|k-1}$ : matrice d'estimation a priori de la covariance de l'erreur.

Q: matrice de covariance du bruit du système.

- **La correction** : Dans la phase des corrections (aussi appelé la phase de mise à jour), les observations de l'instant courant sont utilisées pour corriger l'état prédit dans le but d'obtenir une estimation plus précise.

Ses équations sont :

$$K_k = P_{k|k-1} C^T / (C P_{k|k-1} C^T + R) \quad (2.11)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (Z_k - C \hat{x}_{k|k-1}) \quad (2.12)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k C) P_{k-1} \quad (2.13)$$

Avec:

$K_k$ : gain de Kalman

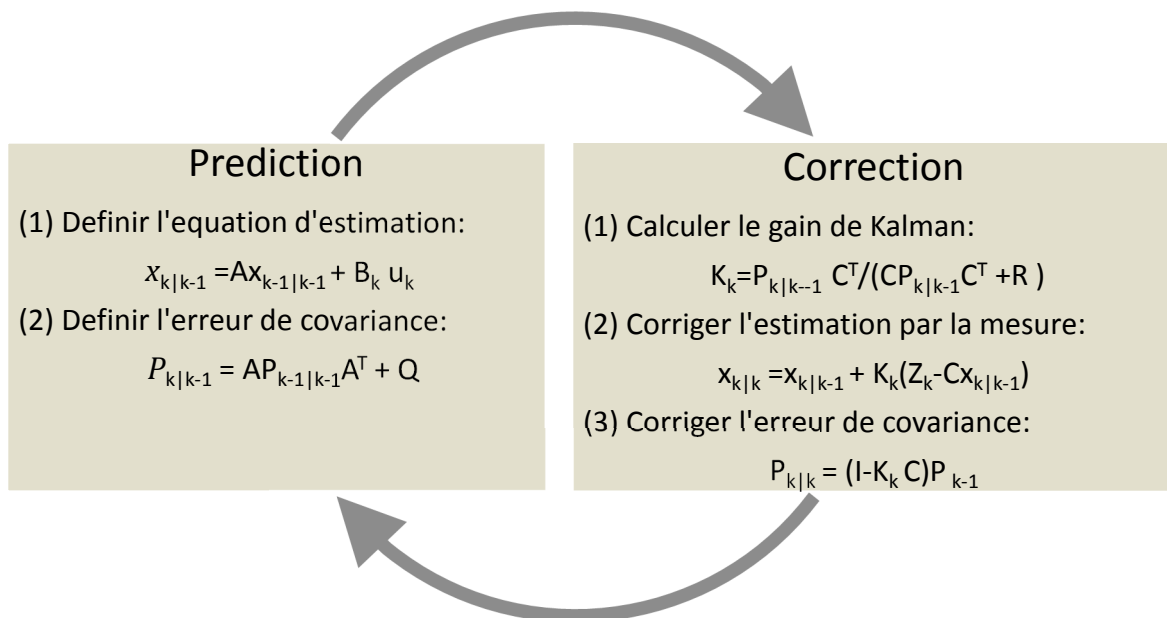
$Z_k$ : mesure à l'instant k..

$C$ : matrice qui relie la mesure  $Z_k$  à l'état  $x$ .

$P_{k|k}$ : matrice d'estimation a posteriori de la covariance de l'erreur.

$R$ : matrice de covariance du bruit de la mesure.

$I$ : matrice d'identité.



**Figure 2.9. Schéma récapitulatif du filtre de Kalman**

## **2.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes de navigation, la méthode de localisation les plus utilisées dans la planification des trajectoires des robots mobiles et la Perception basé sur la fusion des données. Par suite, nous avons présenté les équations mathématiques utilisées dans chaque méthode.

Dans le prochain chapitre, nous nous intéressons aux systèmes de perceptions des robots mobiles qu'on a utilisés dans notre projet.

## Chapitre 3 Plateforme robot mobile

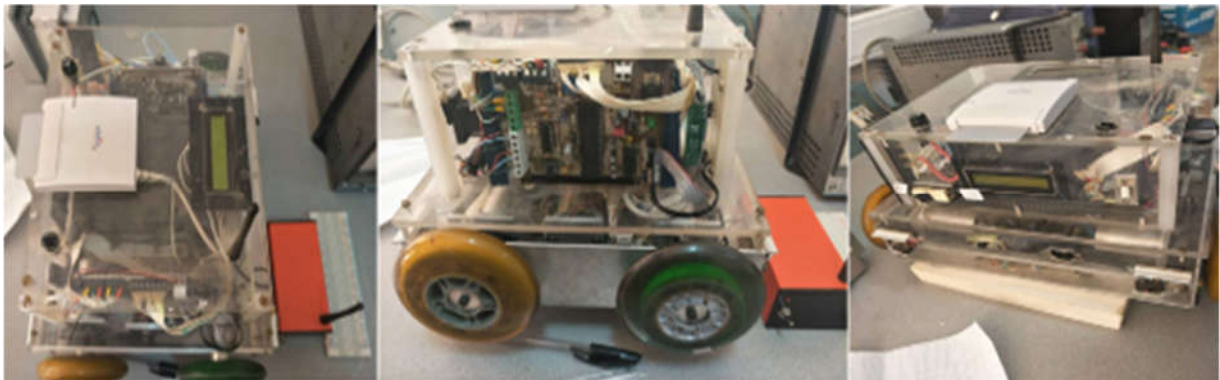
---

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'environnement matériel qui comprend essentiellement les composants suivants : Le robot mobile 'Romorob', la carte Mbed et les deux types de capteurs proprioceptifs et extéroceptifs qu'on va utiliser pour la perception de notre système.

### 3.2. Robot mobile utilisé

Romorob est un robot mobile appelé à naviguer dans différents milieux ce qui implique que ce dernier doit être doté de plusieurs composants qui travaillent en collaboration pour assurer la meilleure exécution des tâches. La figure 3.1 montre les différents composants de ce robot mobile.

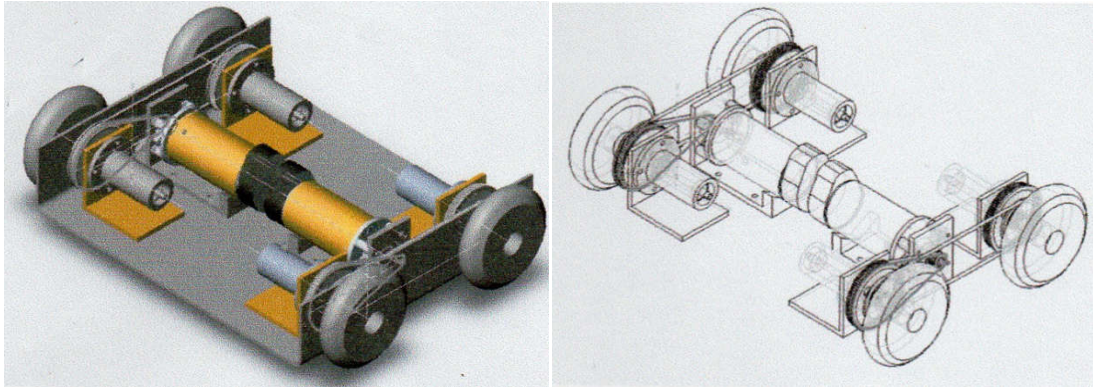


*Figure 3.1. Le Robot mobile 'Romorob'*

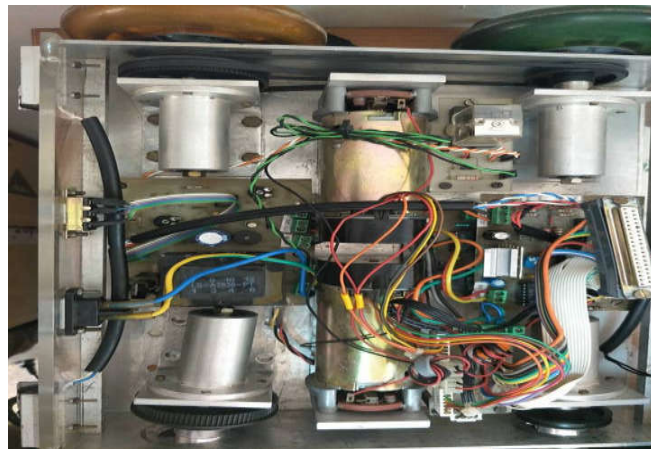
Le robot de dimensions 30 cm × 29 cm × 19 cm, a une vitesse maximale de 2 m/s. Il est composé de deux parties :

### 3.2.1. Partie mécanique

La partie mécanique de Romorob est composée en 2 moteurs électriques. Chaque moteur contrôle deux roues de chaque côté. Les moteurs, du type MCC 12 V, entraînent les roues par un système à courroies. Les figures, ci-dessous nous montrent la structure mécanique de la partie inférieure de Romorob.



*Figure 3.2. Structure mécanique Romorob*



*Figure 3.3. Partie mécanique Romorob*



### 3.2.2. Capteurs proprioceptifs

#### ▪ Encodeur optique

Comme nous avons déjà expliqué au chapitre 1, l'encodeur optique est un capteur proprioceptif qui convertit la rotation en signal électrique afin de déterminer le nombre de tours et le sens de rotation.

Le robot mobile Romorob dispose de deux encodeurs optiques intégrés au niveau des moteurs.

L'encodeur optique contient 72 fentes disposées sur un disque à une seule piste.

La vitesse de rotation des roues est obtenue par l'équation suivante :

$$\omega \text{ (tour/mn)} = \frac{60.N}{N_{tic}.\Delta T.Fred} \quad (3.1)$$

Avec :

$\omega$  : nombre de tours par minute

$N$  : nombre de Ticks mesurés durant la période  $\Delta T$

$N_{tic}$  : nombre total des Ticks de l'encodeur égale à 72

$\Delta T$  : période d'échantillonnage estimée à 30 ms

$Fred$  : facteur de réduction égale à 5

### 3.2.3. Partie électronique

Cette partie est constituée des cartes suivantes :

- **Carte d'acquisition et de gestion**
- **Carte d'afficheur LCD**
- **Carte de puissance**

#### a. *Carte d'acquisition et de gestion*

Elle représente la carte mère du système de locomotion du robot mobile Romorob. Elle est constituée essentiellement d'un microcontrôleur PIC16F877A, d'une mémoire volatile 24C256, d'un max232 et des circuits de mise en forme des signaux issus des encodeurs. D'autres modules sont connectés à la carte mère à travers des connecteurs par du fil en nappe.

Le PIC 16F877A est le microcontrôleur qui assure l'asservissement en vitesse du robot. Une connexion RS232 est établie entre le microcontrôleur PIC16F877A et un système hôte (PC) pour assurer un échange de données (consignes, mesures).



**Figure 3.4. Carte d'acquisition et de gestion**

**b. Carte d'afficheur LCD**

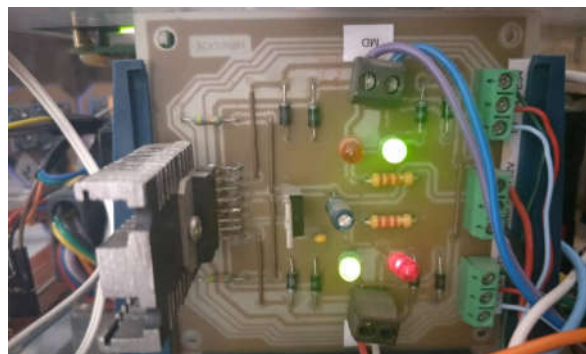
Cette carte est connectée à la carte mère par une nappe qui assure le cheminement des signaux de données et de commandes. L'utilisation de cet afficheur sur le robot sert uniquement à l'affichage des consignes de vitesses des roues gauche et droite.



**Figure 3.5. Afficheur LCD**

**c. Carte de puissance**

C'est une carte électronique indépendante qui permet de faire mouvoir les deux moteurs électriques équipant le robot mobile à des vitesses variables. Il est basé sur l'utilisation d'un



**Figure 3.6. Carte de puissance**

circuit intégré L298 contenant deux étages de puissance configurés en pont, chacun commandé par deux entrées logiques et une entrée de validation.

### **3.3. Les améliorations apportées**

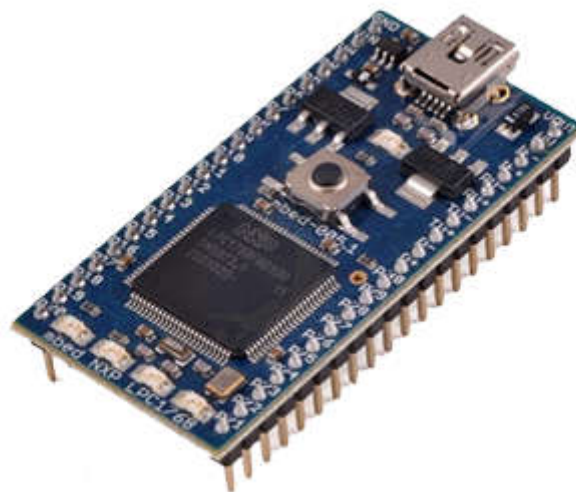
Malgré tous ces composants, des améliorations doivent être apportées à ce robot pour pouvoir percevoir et naviguer convenablement.

La priorité de ces améliorations est d'ajouter un système de perception à base de capteurs extéroceptifs. Ces derniers doivent être gérés par une carte de commande à base de microcontrôleur.

Le choix du microcontrôleur s'est porté sur la Mbed NXP LPC1768 qui est une carte très puissante par rapport aux autres cartes disponibles sur le marché à un prix relativement pas cher. Nous allons dans ce qui suit présenter la carte Mbed et les capteurs proprioceptifs utilisés.

#### **3.3.1. La carte Mbed NXP LPC1768**

La carte de développement Mbed NXP LPC1768 représentée en (figure 3.7) est basée sur le processeur 32 bits ARM Cortex-M3, qui tourne à 96 MHz et comprend 512 Ko de mémoire flash et 64 Ko de RAM, ce qui est bien plus que la plupart des autres cartes de prototypage.



**Figure 3.7. Carte Mbed LPC1768**

Cette carte de module compact 54 × 26 mm possède des interfaces série (UART), SPI, I2C et un bus CAN. Elle supporte également d'autres périphériques, comme l'Ethernet, un USB, un convertisseur analogique-numérique 12 bits et un convertisseur numérique-analogique 10 bit, qui ne sont pas accessibles à des cartes moins puissantes. Elle Peut être alimentée par USB ou par une alimentation externe entre 4.5 et 9 V (une tension jusqu'à 12 V ne devrait pas endommager la carte, mais peut causer un échauffement important du régulateur s'il doit alimenter des composants externes). Elle possède aussi des connecteurs mâles qui lui permettent d'être installée facilement sur des plaques de prototypage rapide sans soudure (breadboards et perfboards) et des LEDs intégrées à la carte de développement pour du feedback visuel.

L'une des grandes forces de la carte de développement Mbed NXP LPC1768 est la facilité avec laquelle elle peut être programmée. L'éditeur de code et le compilateur sont disponibles en ligne avec de nombreuses bibliothèques et codes d'exemples. Le téléchargement des programmes dans la carte se fait par USB, on n'a donc pas besoin de programmeur externe.

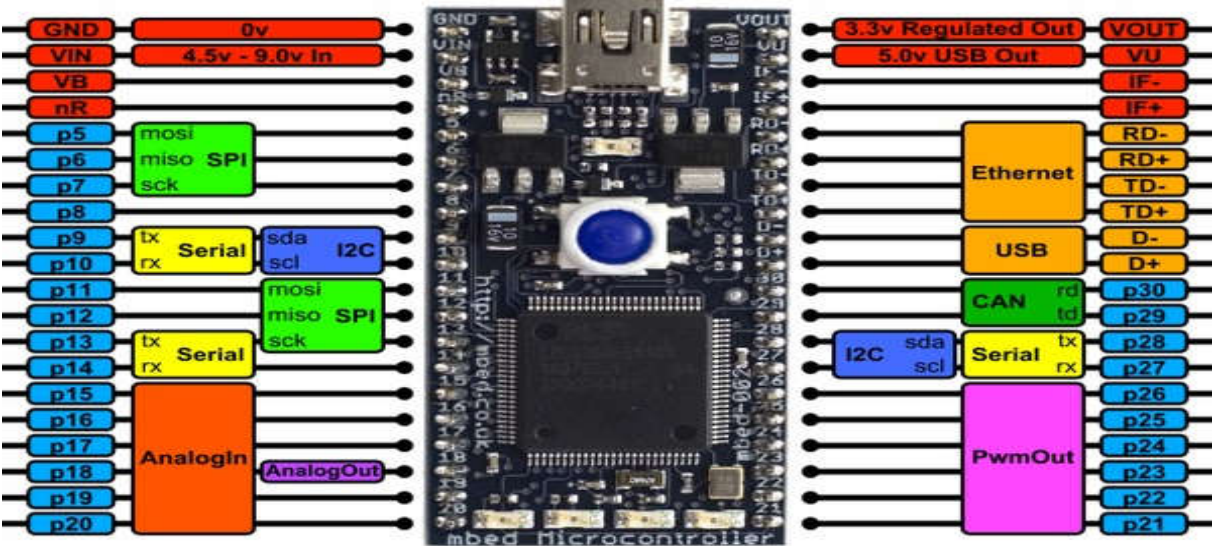
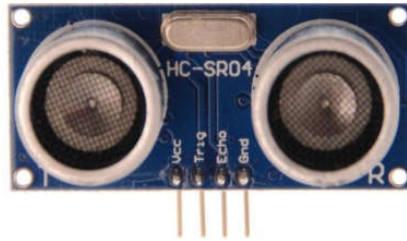


Figure 3.8. Architecture interne de la carte Mbed

### 3.3.2. Le capteur ultrason HC-SR04

Le capteur HC-SR04 utilise les ultrasons pour déterminer la distance d'un objet. Il offre une excellente plage de détection sans contact, avec des mesures de haute précision et stables.



**Figure 3.9. Capteur US HC-SR04**

Comme illustre sur la figure ci-dessus, le capteur HC-SR04 est composé d'un émetteur situé à gauche et un récepteur situé à droite et un circuit de commande situé au verso. Son branchement sur un microcontrôleur nécessite seulement deux lignes d'entrée/sortie logiques (Trig, Echo). La tension d'alimentation appliquée entre VCC et GND doit être égale à 5V avec une tolérance de 10%.

#### **a. Principe de Fonctionnement**

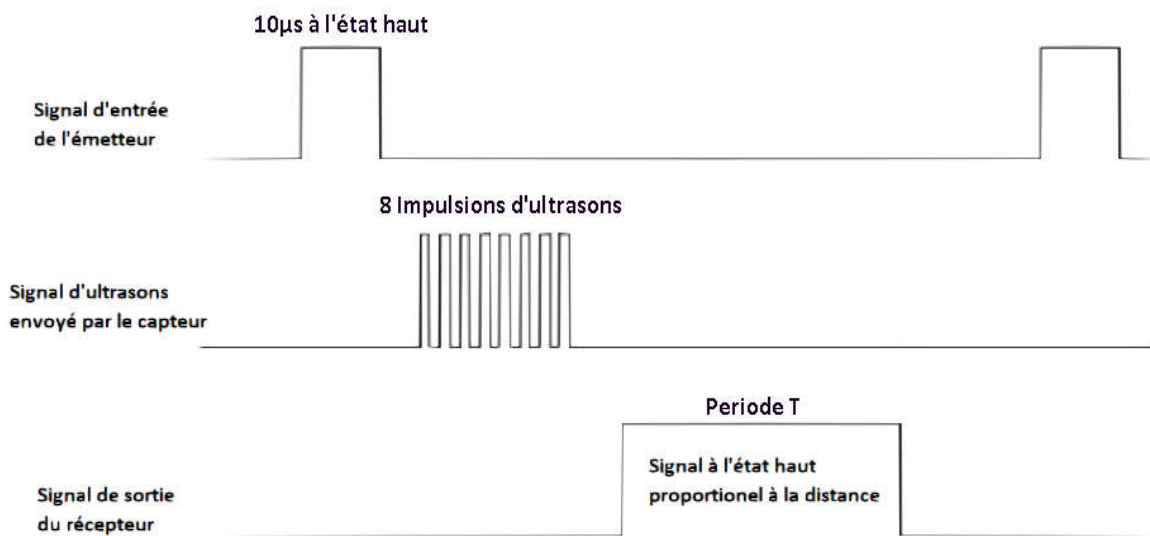
Pour mesurer la distance, il faut tout d'abord envoyer une impulsion à l'état haut pendant 10  $\mu$ s sur l'entrée « Trig ». Le capteur émet alors une série de 8 impulsions ultrasoniques d'une fréquence de 40 kHz, puis il attend le signal réfléchi, à ce moment, le circuit de commande lance un Timer qui ne s'arrête que lorsque le signal émis soit réfléchi par l'obstacle et détecté par le récepteur. Lorsque celui-ci est détecté, il envoie un signal à l'état haut sur la sortie "Echo", dont la durée est proportionnelle à la distance mesurée.

#### **b. Distance de l'objet**

La distance parcourue par un son se calcule en multipliant la vitesse du son, environ 343 m/s par le temps de propagation, soit :  $d = v \cdot t$

La durée d'impulsion étant donnée en  $\mu$ s, Il faut convertir la vitesse en  $m/\mu$ s et multiplier la valeur obtenue par 10  $\mu$ s pour obtenir le temps t. Le son fait un aller-retour, la distance est divisée par 2.

$$d = \frac{343}{10^6} \cdot \frac{10}{2} \cdot \text{Valeur} = \frac{1}{58} \cdot \text{Valeur (cm)} \quad (3.1)$$



**Figure 3.10. Chronogrammes du HC-SR04**

### **c. Caractéristiques**

- Tension d'alimentation : 4.5 V à 5.5 V
- Courant de fonctionnement : 10 mA à 20 mA
- Distance de mesure : 2 cm à 400 cm
- Résolution de la mesure : 0.3 cm
- Angle de mesure efficace : 15°
- Fréquence des ultrasons : 40 kHz
- Largeur d'impulsion sur l'entrée de déclenchement : 10 µs
- Dimensions : 45 mm × 20 mm × 15 mm

### **3.3.3. Le capteur infrarouge Sharp GP2Y0A02YK**

Le capteur que nous avons utilisé pour notre projet est le Sharp GP2Y0A02YK. Il permet la mesure de distance de manière continue à travers sa sortie analogique qui délivre une tension dépendante de la distance de l'obstacle.

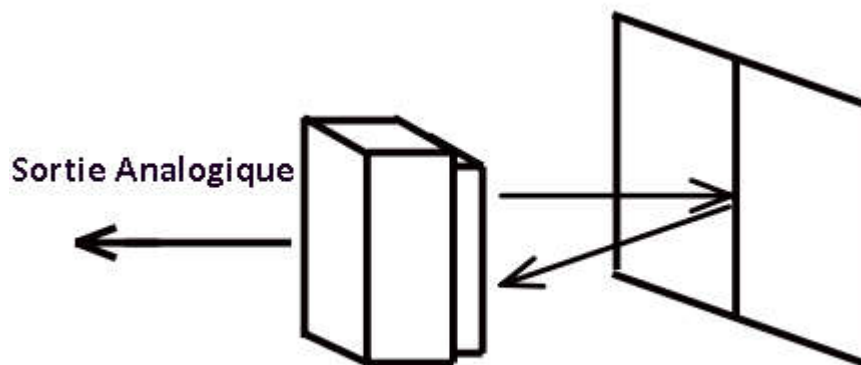
L'interfaçage avec la plupart des microcontrôleurs est simple : la sortie analogique unique peut être connectée à un convertisseur analogique-numérique pour prendre des mesures de distance, ou bien à un comparateur pour la détection de seuil. La plage de détection de cette version est d'environ 20 cm à 150 cm.



**Figure 3.11. Capteur IR Sharp G2Y0A02**

**a. Principe de fonctionnement**

Le capteur émet une impulsion de lumière infrarouge d'une longueur d'onde de ( $\lambda = 850 \pm 70 \text{ nm}$ ). Si un obstacle se trouve aligné avec le rayon infrarouge, il est réfléchi et forme une image sur la matrice CCD du récepteur. La triangulation est alors utilisée pour déterminer la distance. La tension de sortie est une fonction non linéaire de la distance séparant l'obstacle du récepteur.



**Figure 3.12. Capteur infrarouge**

**b. Caractéristiques**

- Tension de fonctionnement : 4,5 V à 5,5 V.
- Consommation de courant moyen : 33 mA (il est recommandé de placer un condensateur de 10  $\mu\text{F}$  ou plus à travers l'alimentation et la masse près du capteur pour stabiliser la ligne d'alimentation).
- Distance de mesure : 20 cm à 150 cm.



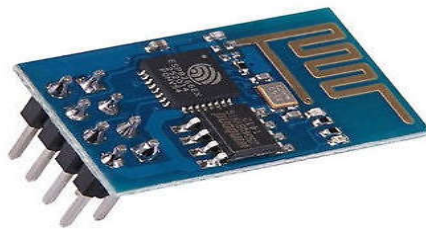
- Type de sortie : Tension analogique.
- Différence de tension de sortie sur la plage de distance : 2,05 V
- Période de mise à jour :  $38 \pm 10$  ms
- Taille : 44,5 mm × 18,9 mm × 21,6 mm.
- Poids : 5 g

Après avoir fait le choix des composants à ajouter, nous passons maintenant à l'étude et la réalisation des cartes.

### 3.3.4. Module wifi ESP8266-01

Module wifi ESP8266 est un émetteur-récepteur sans fil autonome à faible coût qui peut être utilisé pour les communications à distance.

Le Module permet la connectivité Internet aux applications embarquées. Il utilise le protocole de communication TCP / UDP pour se connecter au serveur / client.



**Figure 3.13 . Module wifi ESP8266**

Pour communiquer avec le module wifi ESP8266, le microcontrôleur doit utiliser un ensemble de commandes AT. Le microcontrôleur communique avec le module wifi ESP8266-01 en utilisant UART ayant le débit en bauds spécifié (115200 par défaut).



**Figure 3.14. Description des broches du module ESP8266-01**

Pour utiliser ce module, il faut une configuration. Cette configuration nécessite un flash ensuite un ensemble de commandes AT. Pour rendre notre travail plus performant, nous avons développé une application de contrôle du robot à distance. Nous avons utilisé



l'application Robots\_cdta programmé sur Android studio pour les téléphones mobiles pour créer une télécommande spéciale pour ce robot.

### 3.4. Réalisation des cartes

Pour pouvoir réaliser une carte, la première chose est de concevoir son schéma, pour cela, nous avons utilisé le logiciel Eagle.

#### 3.4.1. Le logiciel Eagle

Eagle est un logiciel sous Windows, Linux et Mac qui permet de créer des schémas électriques et de réaliser leurs circuits imprimés PCB. Bien qu'Eagle soit payant, la version gratuite du logiciel est populaire dans le milieu des électroniciens amateurs. Il possède un outil qui contrôle les erreurs par exemple : composants non reliés ainsi qu'il comprend un outil de routage automatique. Sa librairie de composants peut être étendue [19].

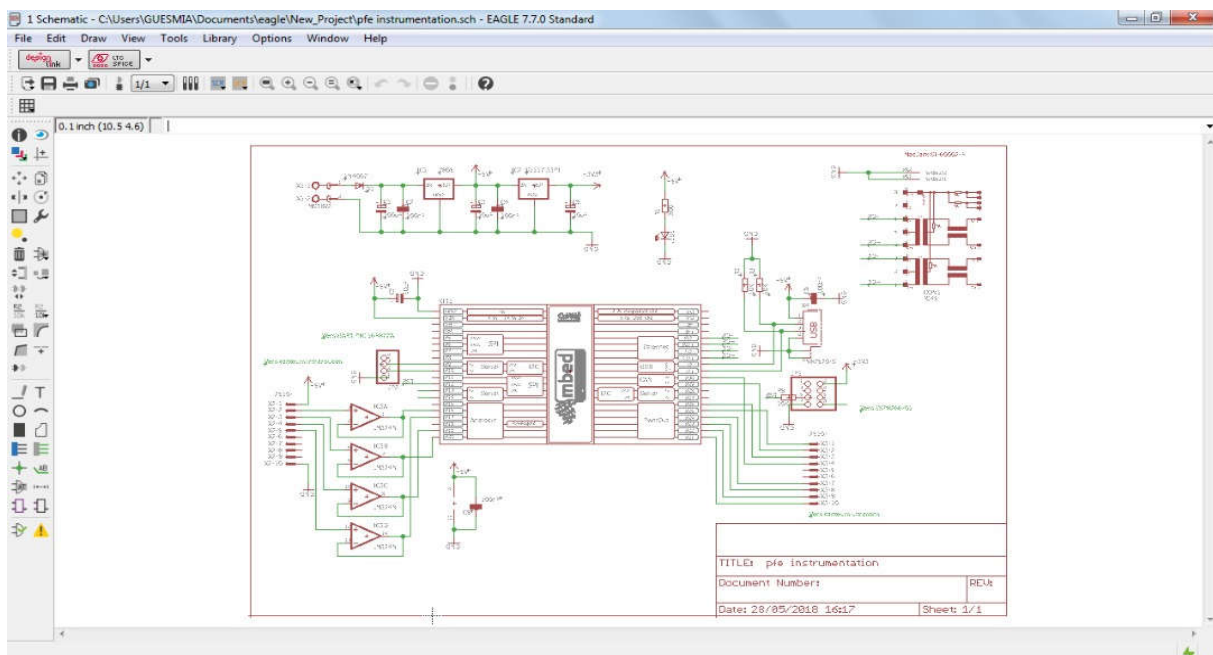


Figure 3.15. Interface de logiciel Eagle

#### 3.4.2. Carte de commande :

C'est la carte qu'on a réalisée pour la commande du robot. Elle est reliée d'une part à la carte d'asservissement du robot via une liaison série UART et d'autre part à un support de capteurs infrarouges et ultrasoniques via des connecteurs. Dans la réalisation de cette carte, on a utilisé plusieurs composants (des régulateurs, des condensateurs, des résistances, un circuit intégré, un support USB, un support model wifi, deux connecteurs un pour les capteurs

infrarouges et l'autre pour les capteurs ultrasons). Les différents étages de cette carte sont représentés sur la figure 3.16.

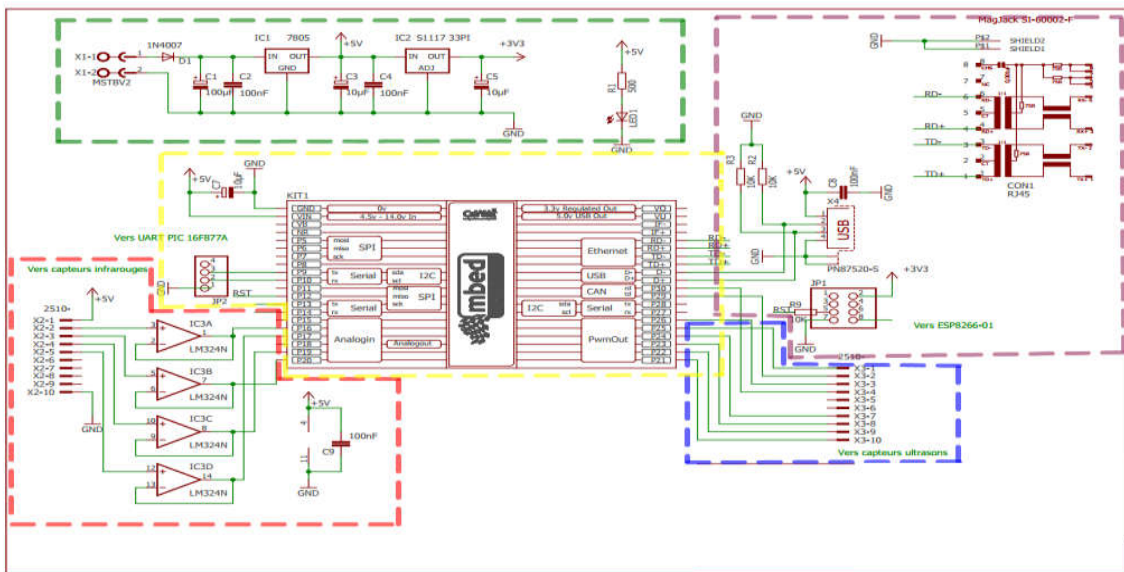


Figure 3.16. Présentation des étages de la carte de commande

- L'étage d'alimentation

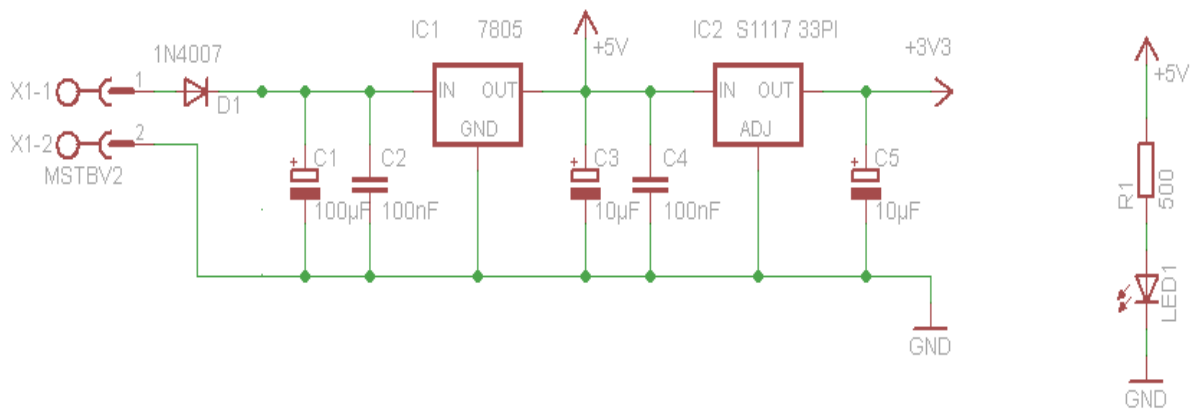


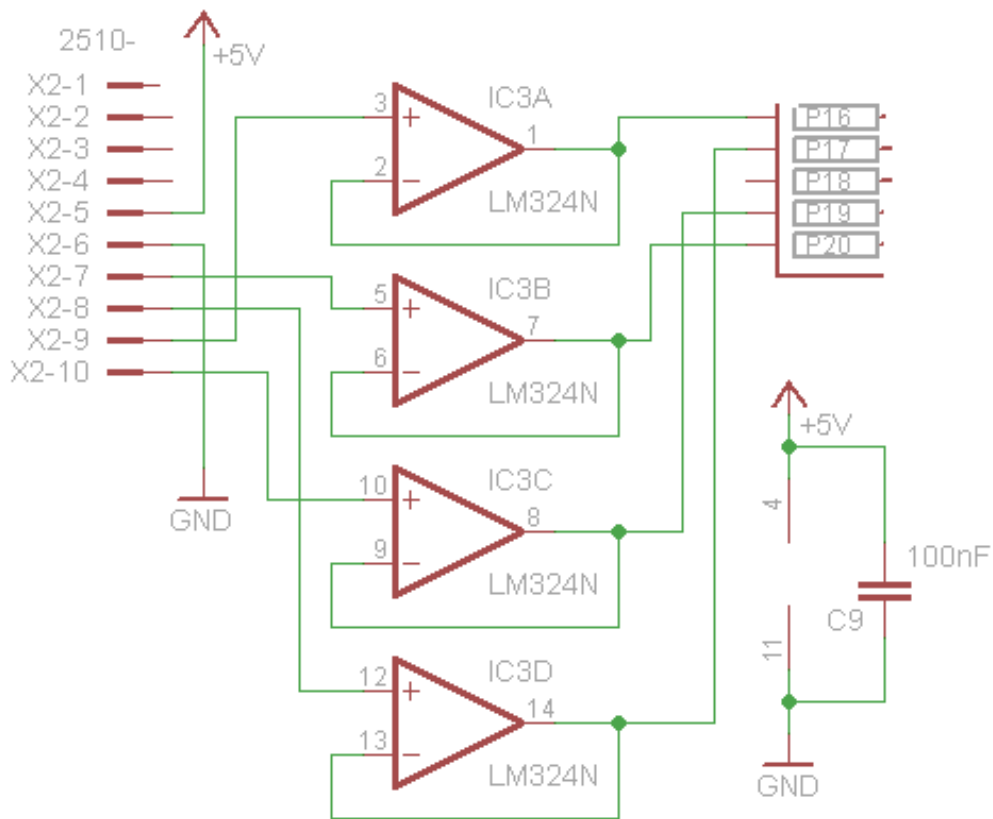
Figure 3.17. Étage d'alimentation

C'est l'étage qui délivre les tensions nécessaires aux différents composants de la carte. C'est le 1<sup>er</sup> étage réalisé. Il reçoit, en entrée, une tension continue de 12 V et délivre, en sortie, des tensions de 5V et 3.3V.

Il est constitué d'un connecteur d'entrée 12V, des condensateurs de filtrage et de limitation de bruits haute fréquence, d'un régulateur de tension 7805 qui délivre la tension 5V et d'un régulateur S1117 qui délivre la tension 3.3V. Un témoin à LED indique la présence de la tension 5V.

- **L'étage des capteurs IR**

Vers capteurs infrarouges



**Figure 3.18. Étage des capteurs infrarouges**

Cet étage contient un connecteur HE10 10 pins qui relie cette carte de commande avec la carte de support capteurs et un circuit intégré LM324 contenant 4 amplificateurs suiveurs assurant l'adaptation d'impédance entre les capteurs infrarouges et le microcontrôleur.

Les capteurs infrarouges sont reliés à la Mbed selon le tableau suivant :

Capteurs IR	Mbed
Capteur 1	P16
Capteur 2	P20
Capteur 3	P19
Capteur 4	P17

**Tableau 3.1. Affectation des sorties capteurs IR**

- **L'étage des capteurs US**

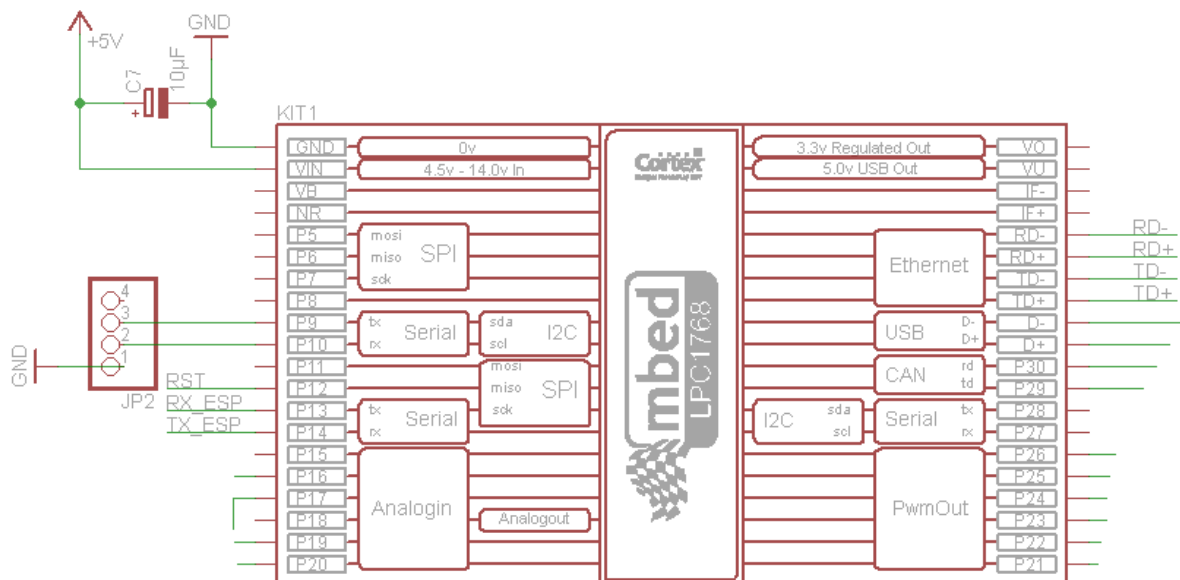
Cet étage comporte l'ensemble des capteurs ultrasons, montés sur une carte support qui est reliée à la carte de commande à travers un connecteur HE10.

Les capteurs ultrasoniques sont reliés à la Mbed selon le tableau suivant :

Capteurs US	Mbed
Echo Capteur 1	P24
Trig Capteur 1	P25
Echo Capteur 2	P29
Trig Capteur 2	P26
Echo Capteur 3	P21
Trig Capteur 3	P30
Echo Capteur 4	P22
Trig Capteur 4	P23

**Tableau 3.2. Affectation des lignes capteurs US**

- **L'étage du microcontrôleur Mbed :**

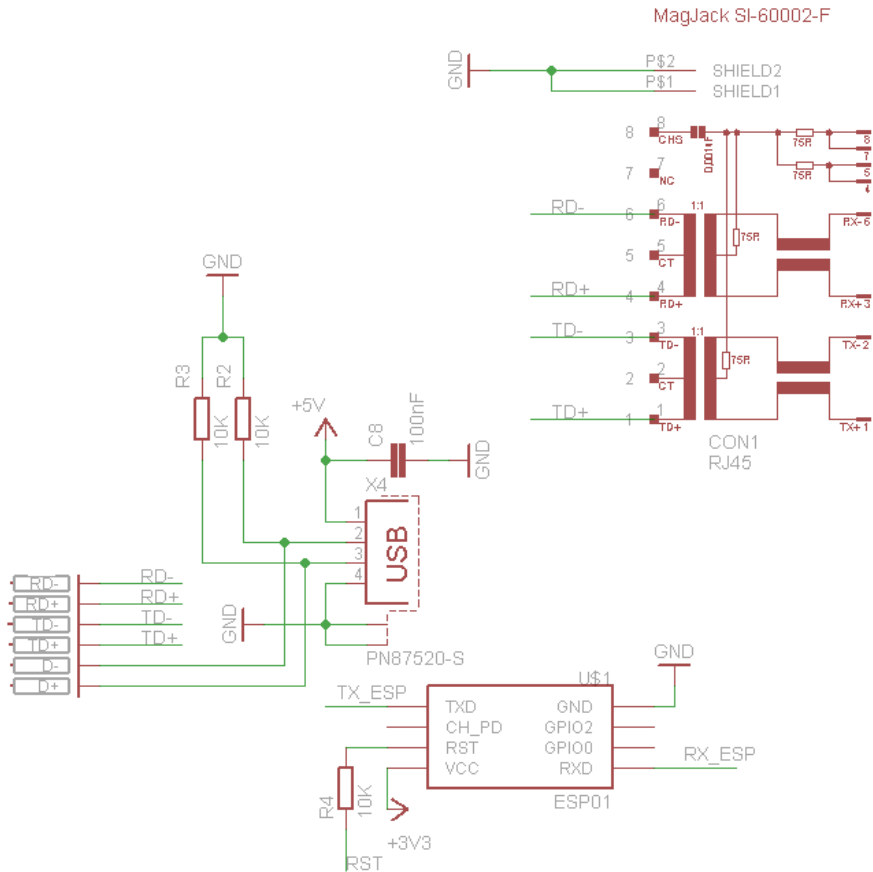


**Figure 3.19. Étage du microcontrôleur Mbed**

Nous trouvons dans cet étage le microcontrôleur Mbed LPC1768 alimenté avec une tension de 5V. La Mbed est reliée avec tous les autres étages via ses 40 pins. La communication

avec le microcontrôleur PIC 16F877A qui assure l'asservissement se fait à travers une liaison série de type UART sur les lignes P9 et P10 présentes sur le connecteur JP2 (figure 3.20).

- **L'étage des périphériques :**



**Figure 3.20. Étage de périphérique**

Cet étage contient un module ESP8266-01 pour établir une connexion sans fil Wifi avec un module distant, un port USB et une prise RJ45 pour la connexion Ethernet filaire.

ESP8266-01	Mbed
Rx	P13
Tx	P14
Reset	P12

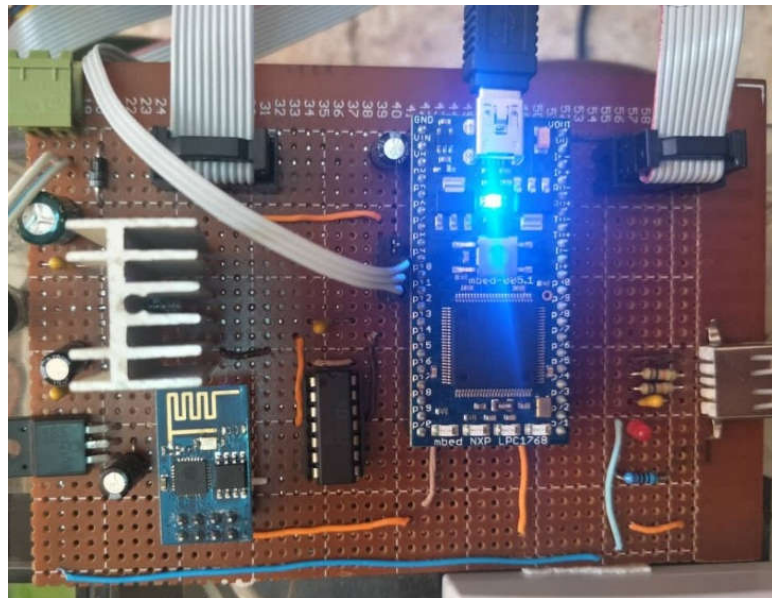
**Tableau 3.3. Affectation des lignes du module ESP8266-01**

USB	Mbed
2	P32 (D-)
3	P31 (D+)

**Tableau 3.4. Affectation des lignes du port USB**

Prise RJ45	Mbed
1	P33 (TD+)
3	P34 (TD-)
4	P35 (RD+)
6	P36 (RD-)

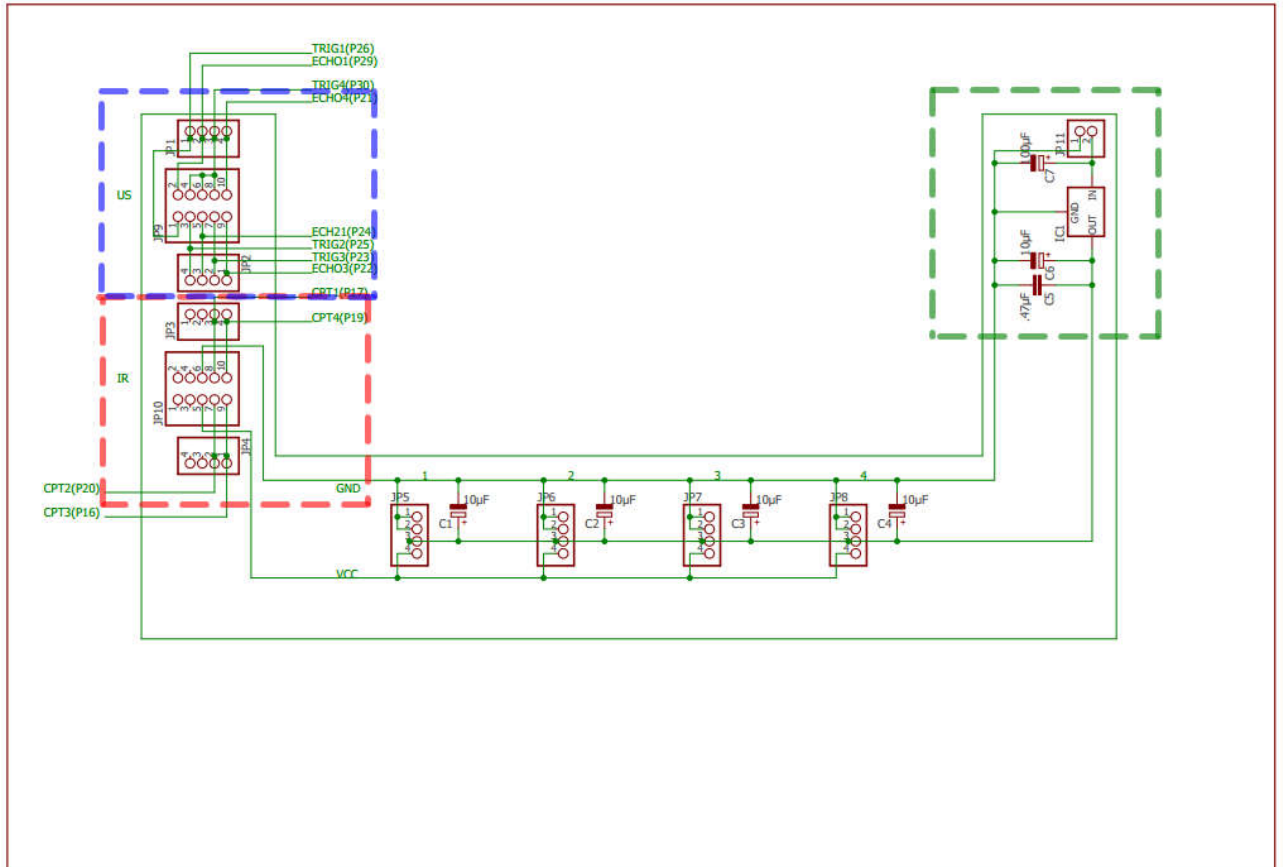
**Tableau 3.5. Affectation des lignes de la prise RJ45**



**Figure 3.21. Carte de commande réalisée**

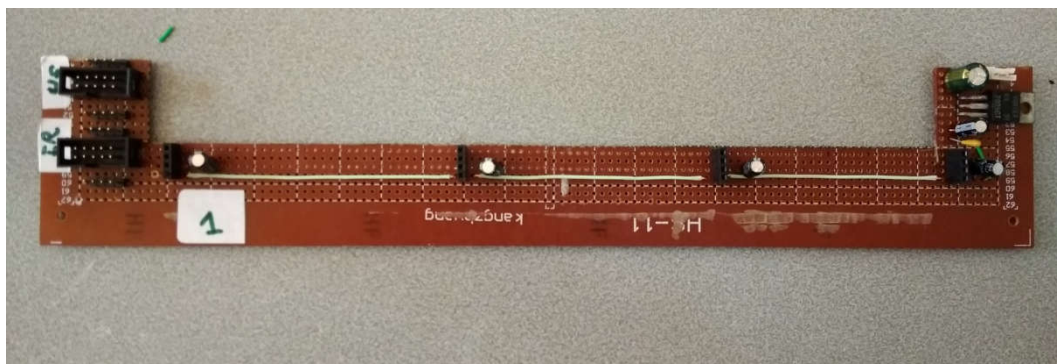
### 3.4.3. La carte support capteurs

Cette carte a été réalisée dans le but de pouvoir assurer une bonne disposition des capteurs utilisés. Elle est reliée à la carte de commande à travers des fils en nappe. Cette carte nous permet de positionner chaque capteur.



**Figure 3.22. Les modules de la carte support capteurs**

La carte de support capteurs est reliée avec la carte de commande à travers deux connecteurs HE10 10 pins visibles sur la partie gauche de la figure ci-dessus. Les capteurs IR et US sont reliés à la carte à travers des connecteurs Dupont 4 pins. Nous trouvons aussi un étage d'alimentation de 5V pour alimenter les capteurs IR alors que les capteurs US sont alimentés par l'étage de la carte commande.



**Figure 3.23. Carte support capteurs**

### 3.4.4. Les schémas des cartes réalisées

Les schémas des cartes de commande et de support capteurs ont été élaborés avec le logiciel 'Eagle'. Ils sont donnés en [Annexe 1].

Les deux cartes sont reliées par deux nappes de fils. (Figure 3.24) :

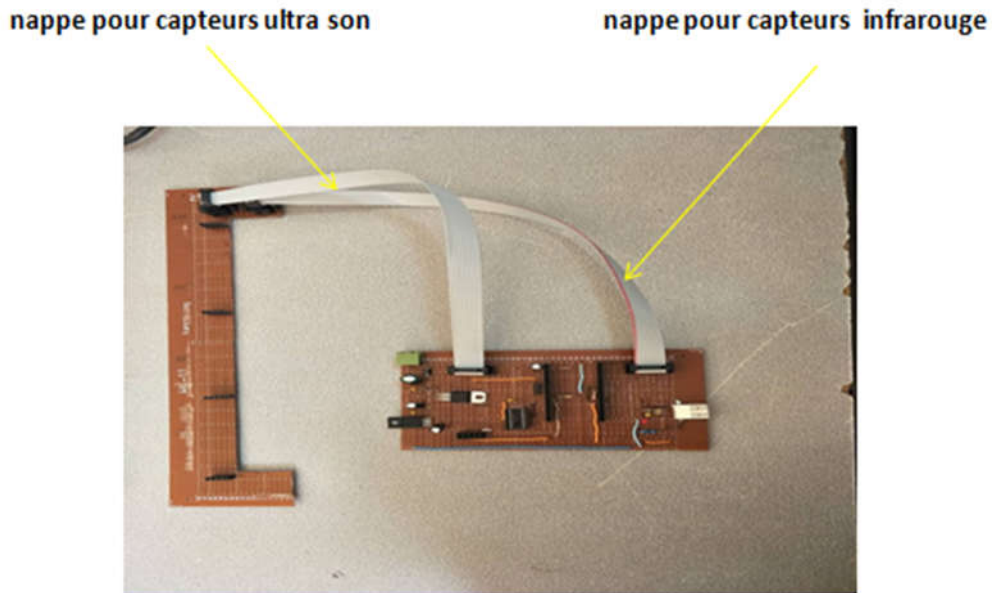


Figure 3.24. Liaison des deux cartes

### 3.4.5. Positionnement des capteurs

Tout d'abord et puisque la tâche principale de ce robot est la navigation et la détection des obstacles, ce robot a besoin d'un système de perception basé sur des capteurs.

Vu que le robot est appelé à se déplacer dans des différents environnements et dans différentes conditions, il peut être entravé par la présence d'obstacles, l'utilisation de plusieurs capteurs de distance devient nécessaire. Nous avons choisi le capteur ultrason **HC-SR04** et le capteur infrarouge **Sharp GP2Y0A02YK**

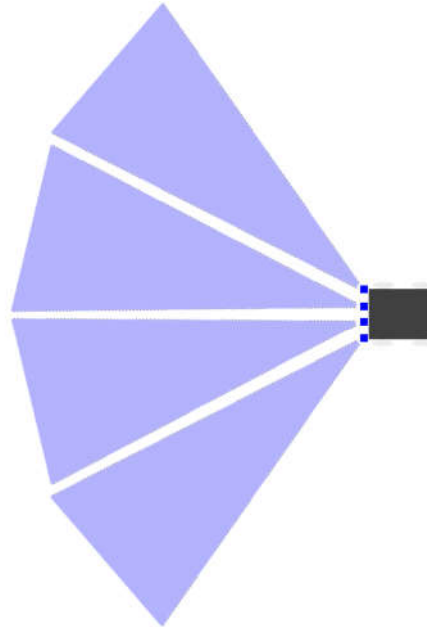
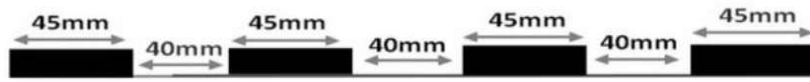
Pour le positionnement de ces capteurs, nous avons utilisé la formule suivante :

$$Arc = 2\pi \left( \frac{x}{360} \right) r$$

- x : angle en degrés
- r : 400 cm champ de vision du capteur
- Arc (120°) = 837cm Arc de vision qu'il faut pour le robot
- Arc (30°) = 209cm Arc de vision de chaque capteur
- 837/209=4 est le nombre de capteurs qu'il faut pour assurer un arc de 120°

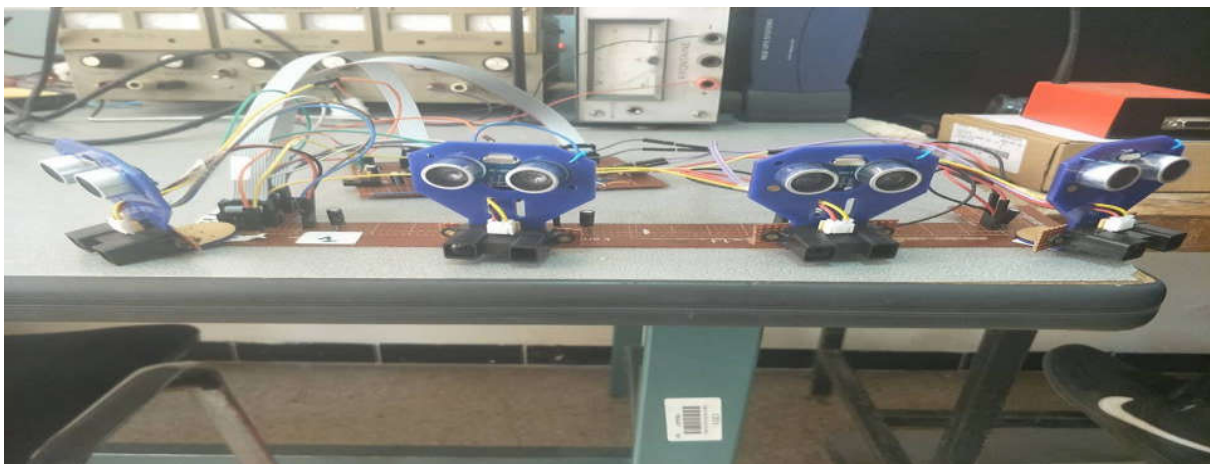


La longueur de chaque capteur étant de 45 mm, on laisse 40mm entre chaque capteur (Figure3.25).



**Figure 3.25. Schéma positionnement des capteurs**

Donc nous avons utilisé 4 capteurs ultrasons (**HC-SR04**) et 4 capteurs infrarouges (**Sharp GP2Y0A02YK**) montés sur le même support pour la bonne détection (Figure 3.26)

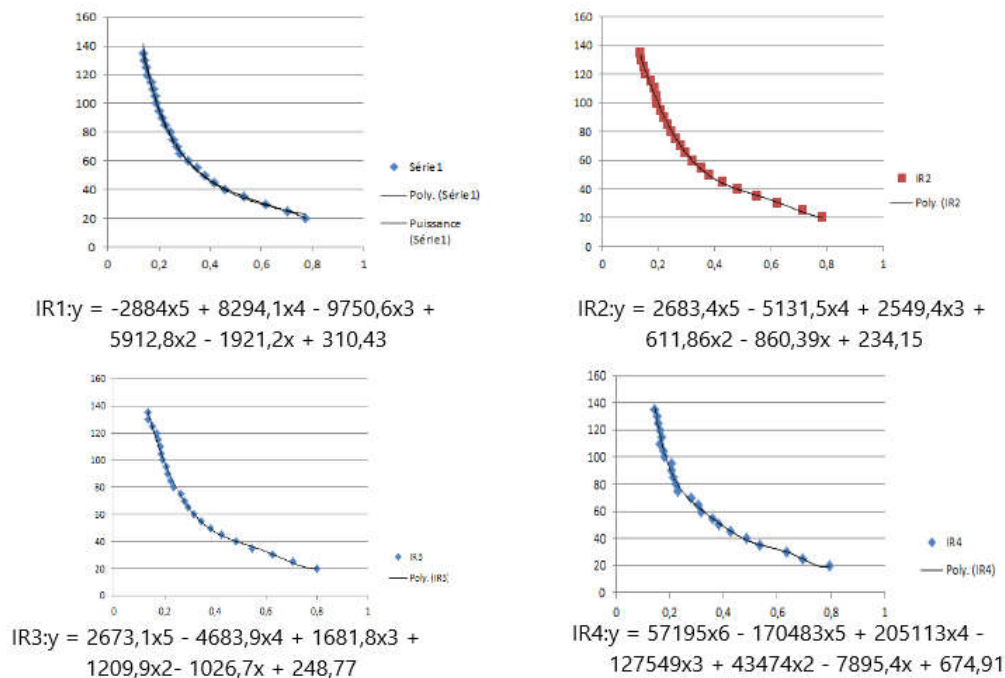


**Figure 3.26. Positionnement des capteurs sur la carte support**

### 3.4.6. L'étalonnage des capteurs infrarouges

Le but de cet étalonnage est de déterminer de manière expérimentale la courbe de réponse de chaque capteur infrarouge et par la suite l'équation analytique de la distance. Cette procédure consiste à déplacer l'obstacle devant le capteur par pas de 5cm et de prélever la tension correspondante convertie par le module Mbed. On répète l'étalonnage plusieurs fois [Annexe 2].

Les résultats d'étalonnage des quatre capteurs sont traités par 'Excel '. La figure 3.27 montre les courbes de chaque capteur avec les équations utilisées.



**Figure 3.27. Courbes étalonnage capteurs infrarouge**

On remarque que :

- Les graphes d'étalonnage des capteurs commencent à prendre la même forme à partir de la valeur 20 cm. La variation de la valeur mesurée et la distance sont proportionnelles.
- Entre 20 cm et 40 cm la valeur mesurée est relativement stable.
- Entre 40 cm et 80 cm la relation entre la distance et la valeur mesurée est une relation presque linéaire.
- Entre 80 cm et 160 cm la valeur mesurée a subi des petites variations.

### **3.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'environnement matériel et les outils utilisés dans notre projet. Nous avons présenté les étages du robot mobile « Romorob » ainsi que la carte Mbed NXP LPC1768. Ensuite, nous avons présenté les capteurs utilisés et leurs principes de fonctionnement. La procédure d'étalonnage des capteurs infrarouges a permis le tracé de la courbe de réponse de chacun des capteurs et la détermination des équations correspondantes qui vont être utilisées dans la phase de calcul de distances.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les résultats expérimentaux ainsi que leur interprétation.

## Chapitre 4 Implémentation, tests et résultats

---

### 4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'environnement software qui comprend essentiellement le compilateur Mbed, émulateur Tera Term et les procédures d'implémentation. Nous présentons aussi les différents tests et nous finissons par présenter les résultats obtenus.

### 4.2. Partie software

Cette partie comprend les outils mis en œuvre pour la programmation de la Mbed.

#### 4.2.1. Compilateur Mbed

Mbed est une plate-forme et un système d'exploitation pour les appareils connectés à Internet basés sur des microcontrôleurs ARM Cortex-M 32 bits. De tels dispositifs sont également connus sous le nom de dispositifs Internet de choses.

Le compilateur Mbed fournit un IDE en ligne C / C ++ léger qui est préconfiguré pour permettre d'écrire rapidement des programmes, de les compiler et de les télécharger pour les exécuter sur le microcontrôleur Mbed. En fait, ce n'est pas important d'installer ou de configurer quoi que ce soit pour fonctionner avec Mbed. Parce qu'il s'agit d'une application Web, vous pouvez vous connecter depuis n'importe où et continuer là où vous l'avez laissé, et vous êtes libre de travailler sur Windows, Mac, Ios, Androïde, Linux ou autres [20].

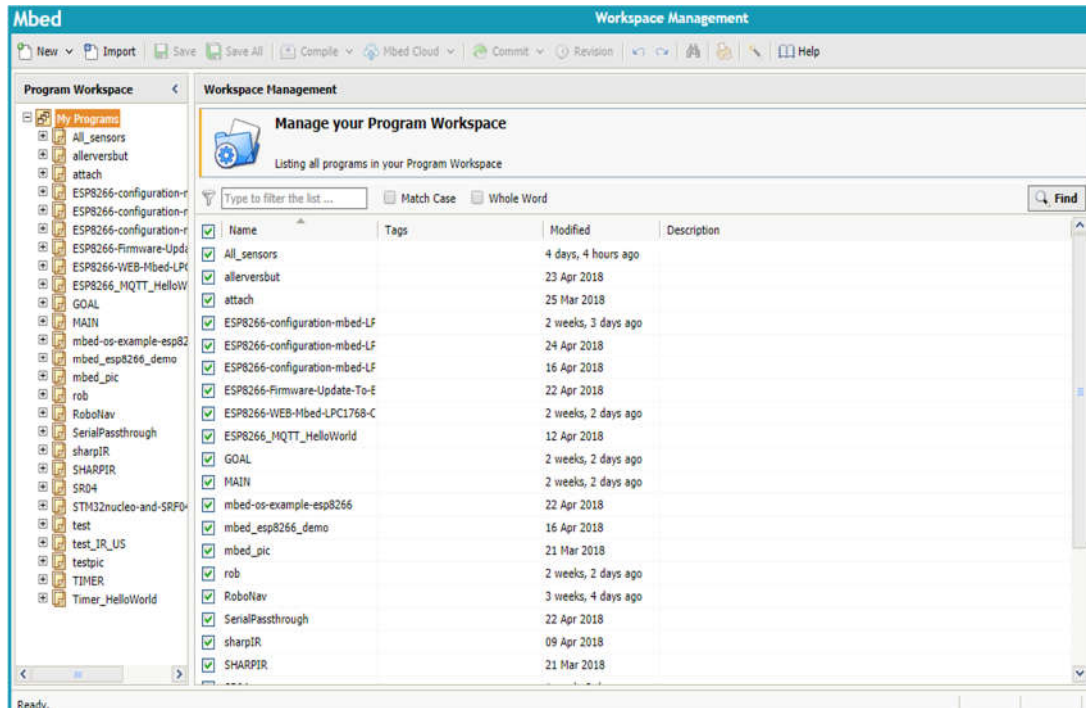


Figure 4.1. Compilateur Mbed Enligne

#### 4.2.2. Emulateur Tera Term

Tera Term est un terminal émulateur (communications) open-source. Il émule les différents types de terminaux informatiques. Il prend en charge les connexions de port série utilisées dans la programmation du microcontrôleur. Son rôle est d'afficher les variables calculées et les résultats obtenus dans le microcontrôleur.

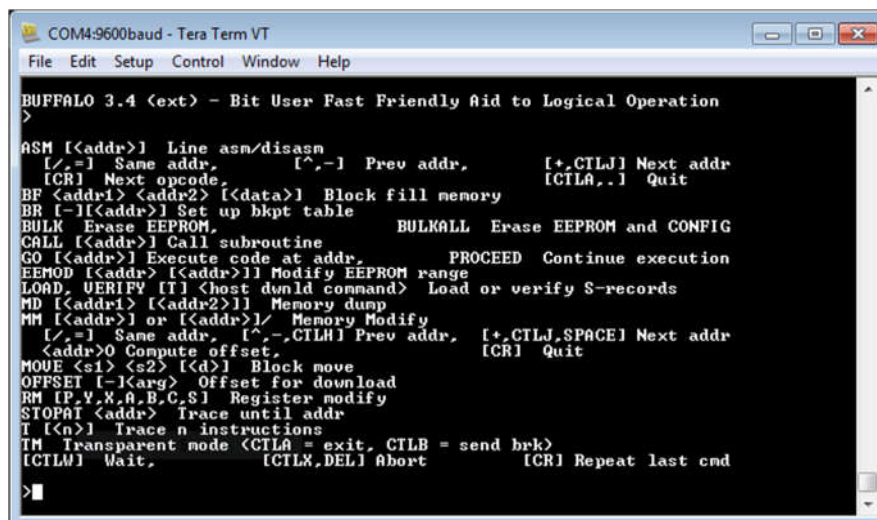


Figure 4.2. Tera Term

### 4.3. Implémentations

Dans cette partie, nous avons implémenter les différentes méthodes utilisées pour la localisation, la perception et la navigation du robot mobile dans la carte Mbed via son compilateur.

#### 4.3.1. Odométrie

Dans cette implémentation, nous avons tout d'abord établi une connexion entre la carte Mbed et la carte d'asservissement. Cette connexion permet à la Mbed d'envoyer les consignes à la carte d'asservissement d'une part, et de recueillir les données de l'encodeur d'une autres part. ces données recueillies par les encodeurs sont le nombre de tick  $N$  par une période de 30ms qu'il faut calculer à chaque fois. D'après la formule (3.1) le calcul de vitesse de rotation est :  $\omega$  (tour/mn) =  $5,554.N$  Cette valeur  $\omega$  est ensuite converti en (m/s).

Vu qu'on dispose de 2 encodeurs gauche et droite, nous obtenant ainsi  $V_g$  et  $V_d$  dont leur moyenne est la vitesse global  $V$  (équation 2.1). La différence entre  $V_d$  et  $V_g$  divisée par la distance entre les roues est égale à l'angle de translation  $\Delta\theta$  (équation 2.4).

Les coordonnées du robot calculées à chaque itération sont calculées d'après les équations (2.2) et (2.3) ainsi que les coordonnées globales  $(X,Y,\theta)$  sont calculées par les équations (2.5), (2.6) et (2.7).

#### 4.3.2. Fusion de données

Dans cette implémentation, nous avons utilisé le filtre Kalman avec les paramètres suivants :

$$\dot{x}_{k|k-1} = A.x_{k-1|k-1} \quad (2.9)$$

$$P_{k|k-1} = A.P_{k-1|k-1}.A^T + Q \quad (2.10)$$

$$K_k = P_{k|k-1} C^T / (C P_{k|k-1} C^T + R) \quad (2.11)$$

$$\dot{x}_{k|k} = \dot{x}_{k|k-1} + K_k(Z_k - C\dot{x}_{k|k-1}) \quad (2.12)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k C) P_{k-1} \quad (2.13)$$

Avec :

$$A=1; Q= 10; C= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}; R= \begin{bmatrix} 0.03^2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; Z= [MeasureUS \quad MeasureIR]; I= 1$$

La procédure de l'implémentation du filtre de Kalman est de mesurer les distances avec les 2 capteurs US et IR. La plage de mesure à filtrer est entre 20 cm et 140 cm car hors cet intervalle, on prend la valeur de l'ultrason brute. Ensuite, utiliser les équations précédentes pour filtrer les 2 valeurs pour avoir une seule valeur plus fiable.

### 4.3.3. Détection d'obstacle

Dans cette étape, nous positionnons les obstacles détectés dans un repère global avec leurs coordonnées  $(x,y)$ . Pour cela, il fallait positionner les obstacles par rapport au robot d'abord en utilisant les équations suivantes :

$$x'=D.\cos(\varphi) \quad (4.1)$$

$$y'=D.\sin(\varphi) \quad (4.2)$$

Avec :

$(x',y')$  : coordonnées de l'obstacle par rapport au robot.

D : distance entre le point de centre du robot mobile et l'obstacle (la mesure + position capteur par rapport au centre)

$\varphi$  : angle d'orientation du capteur.

Ensuite, nous utilisons la fonction de changement du repère pour passer du repère robot au repère global

$$x=x_0+x'\cos(\theta)-y'\sin(\theta) \quad (4.3)$$

$$y=y_0+x'\sin(\theta)+y'\cos(\theta) \quad (4.4)$$

Avec :

$(x',y')$  : coordonnées de l'obstacle dans le repère global.

$(x_0,y_0)$  : coordonnées actuelles du robot mobile.

$\theta$  : angle du robot mobile par rapport au repère global.

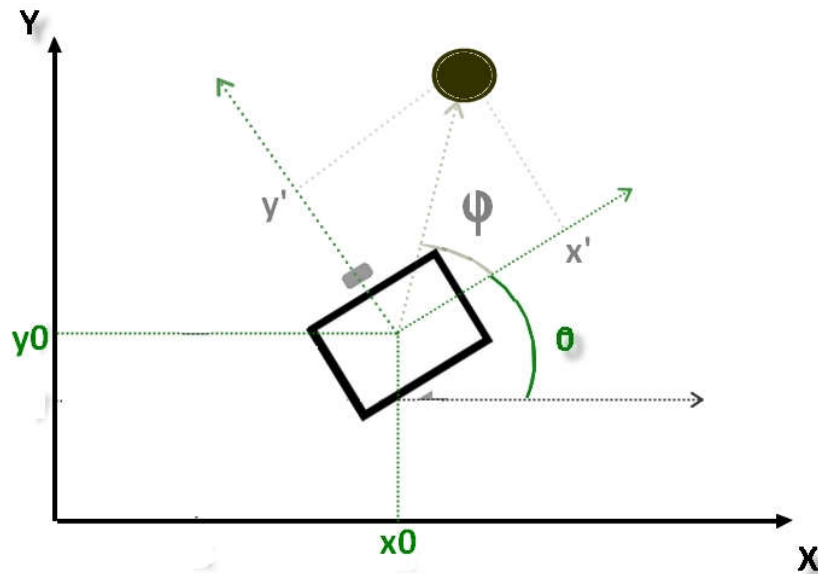


Figure 4.3. Detection d'obstacle dans les repères

#### 4.3.4. Navigation aller vers un but

Dans cette implémentation, nous avons supposé le but comme étant le champ de force attractive. Tout d'abord, nous faisons appel à la fonction odométrie. Nous calculons le module entre les coordonnées du but souhaité est la position du robot mobile et nous faisons ça pour chaque itération. Et nous calculons l'angle correspondant au but par rapport au robot. Les consignes des vitesses roues gauche et droite sont calculés à chaque itération aussi à partir des paramètres précédents :

$$Vg = \frac{V - 0.15w}{0.05} \quad (4.5)$$

$$Vd = \frac{V + 0.15w}{0.05} \quad (4.6)$$

Avec :

V : module entre le but et le robot.

W : l'angle entre l'orientation du robot et le but.

0.15 : distance entre les roues divisée par 2 (m)

0.05 : rayon des roues (m)

#### 4.3.5. Navigation avec évitement d'obstacles

C'est l'implantation qui met en œuvre tout notre travail, tout comme la navigation sans obstacle, nous faisons appel à la fonction odométrie. Nous calculons la distance entre les coordonnées du but souhaité est la position du robot mobile. Ensuite, nous mesurons les



obstacles par la fonction détections d'obstacle. Si l'obstacle est détecté, nous calculons de même façon que le force attractive le module et l'angle de la force répulsive et on les associés pour avoir un seul module et un seul angle dont le robot mobile se déplace avec de même façon que la force attractive seule.

## 4.4. Test et résultats

### 4.4.1. Test odométrie

Dans les tests de l'odométrie, nous avons lancé un programme avec un nombre limité d'itérations, après l'épuisement des nombres d'itérations nous calculons la distance parcourue par le robot avec un mètre ruban et nous la comparons avec la distance totale parcourue calculée par le programme, nous faisons ça pour différentes situations et différentes distances.

Les résultats obtenus étaient satisfaisants pour un mouvement rectiligne, mais quand il s'agit d'un mouvement non-rectiligne, nous remarquons des résultats moins fiables.

Test	Résultat réel (m)	Résultat calculé
Test 1	3.6	3.65
Test 2	3.6	3.57

**Tableau 4.1. Résultat test odométrie**

Ces résultats obtenus sont dus aux erreurs systématiques (modèle géométrique) et non-systématiques (glissements des roues) du robot mobile.



a) Position initial du robot



b) Position final du robot

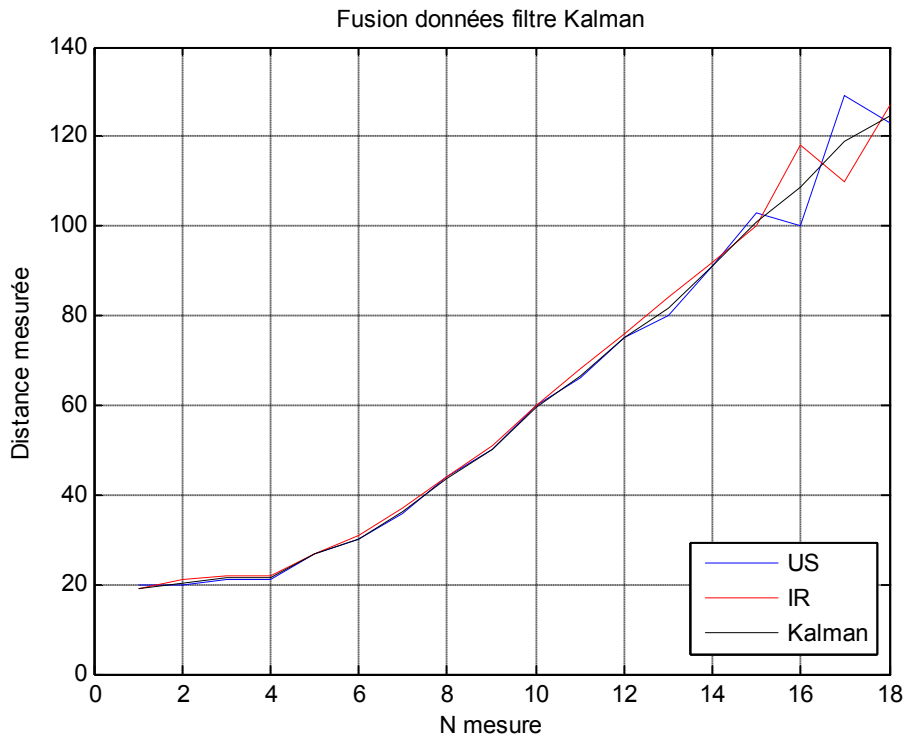
*Figure 4.4. Position initiale et finale d'un des tests d'odométrie*

#### 4.4.2. Test fusion de données

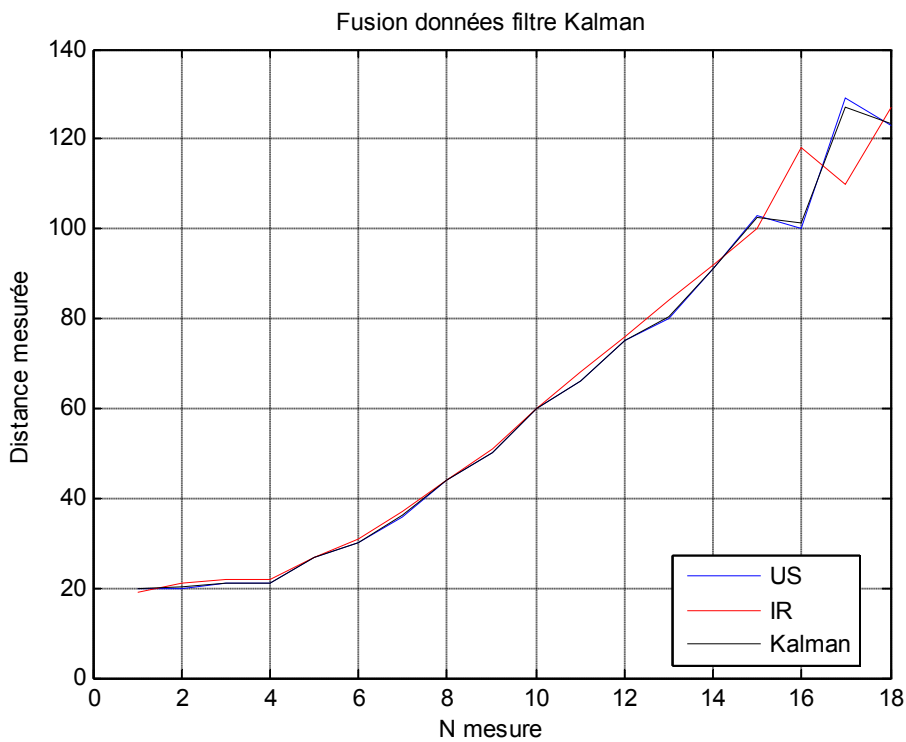
Ensuite, nous avons positionné des obstacles à des différentes distances du robot. Nous remarquons que l'obstacle est détecté par les 2 capteurs US et IR. Alors, la mesure exacte estimée se situe sur un intervalle borné par ces 2 valeurs.

La matrice de bruit de mesure R contient les valeurs des incertitudes des capteurs. En variant ces incertitudes, nous obtenant des données différentes avec un résultat fusionné qui converge vers le capteur avec moins d'incertitude. Dans notre cas, nous avons toujours un résultat plus proche de la valeur du US vu que son incertitude est plus petite.

Nous avons testé avec  $R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  (figure 4.5) et  $R = \begin{bmatrix} 0.3^2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  (figure 4.6)



**Figure 4.5. Données brutes et la fusion par filtre Kalman avec incertitudes égales**



**Figure 4.6. Données brutes et la fusion par filtre Kalman avec incertitudes différentes**

On remarque que lorsque les incertitudes sont égales, le résultat obtenu est une moyenne des 2 mesures. Autrement, le résultat converge vers la mesure avec moins d'incertitude.

#### 4.4.3. Test navigation aller vers un but

Dans ce test, nous avons choisi un point  $(x,0)$  le robot s'est déplacé vers le but et il s'est arrêté après avoir atteint le rayon du but (figure 4.7).

Dans la 2eme phase, nous avons programmé des points  $(x,y)$  avec un  $y \neq 0$ , mais nous remarquons que le robot n'atteint pas réellement le but alors que ce but est supposé atteint dans le microcontrôleur, ce problème est dû au point suivant :

- Les erreurs de l'odométrie.
- La faible puissance des moteurs de robot par rapport au poids du robot.
- L'emplacement des encodeurs au niveau des moteurs au lieu des roues.
- Des roues gommées qui glissent dans des milieux en céramique.



**a) Position initial du robot**



**b) Position finale du robot**

**Figure 4.7. Position initiale et finale du test de navigation**

## 4.5. Test navigation et évitement d'obstacle

Dans ce test, nous avons repris le test précédent avec un ajout d'obstacle, nous avons aussi choisi un point  $(x,0)$  et on a mis un obstacle dans la trajectoire du robot et on a lancé le programme, le robot a pu éviter l'obstacle une fois arrivé à une distance moins d'un mètre et s'est déplacé vers le but et il s'est arrêté après avoir atteint le rayon du but.

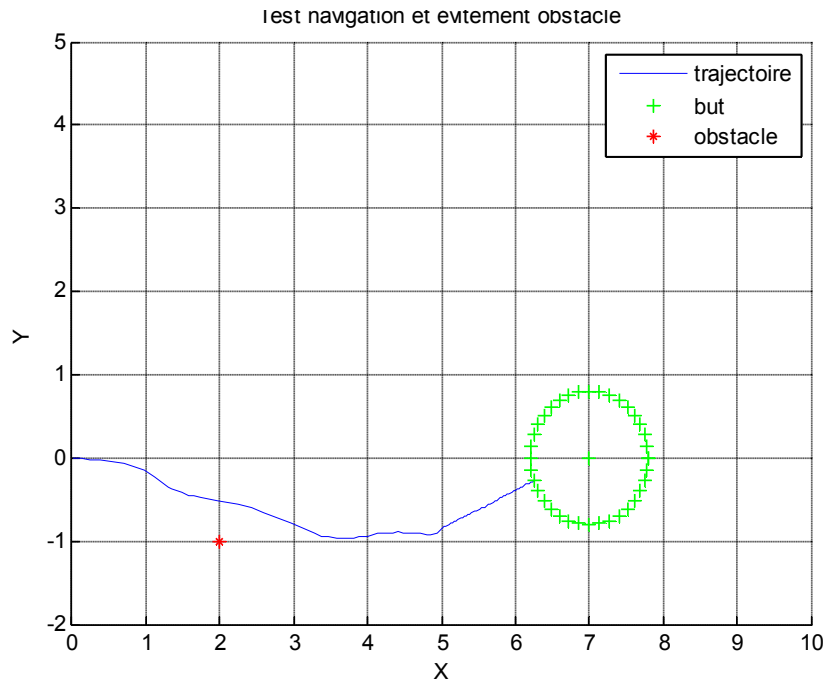


Figure 4.8. Trajectoire du test navigation et évitement d'obstacle

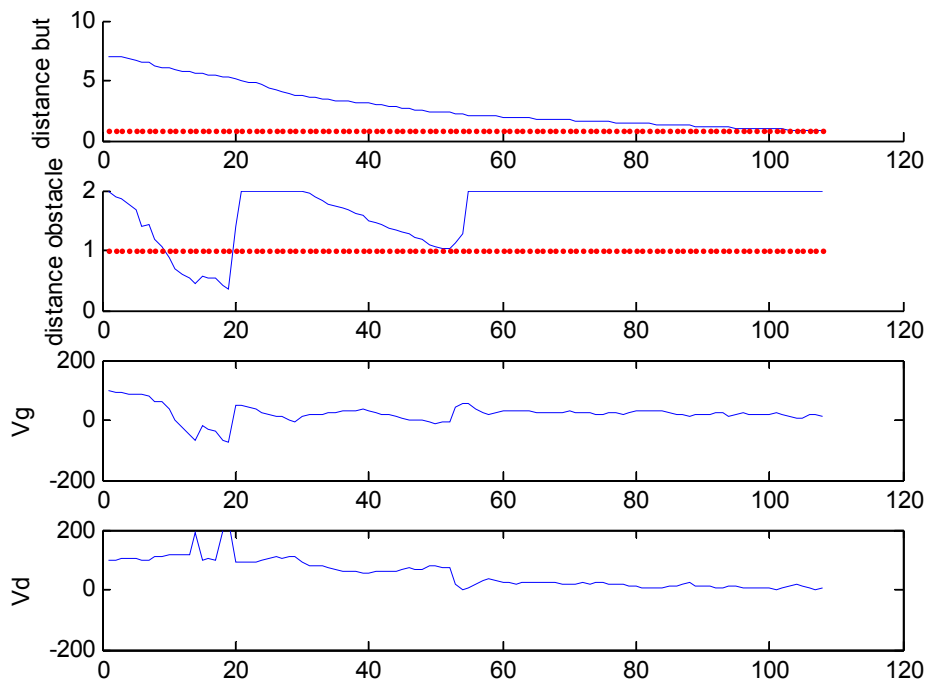


Figure 4.9. Données de la tâche

Nous remarquons que lorsque l'obstacle est loin du robot de 1 m ou moins, les consignes des vitesses gauche et droite changent d'une façon importante. Cela signifie que le robot mobile essaie effectivement d'éviter l'obstacle.

## 4.6. Contrôle à distance

### 4.6.1. Présentation logiciel Android studio

Android Studio est un environnement de développement pour développer des applications Mobile. Il est basé sur un IDE Java commercial. Android Studio permet principalement d'éditer les fichiers Java/Kotlin et les fichiers de configuration XML d'une application Android.

Il propose des outils pour gérer le développement d'applications multilingues et permet de visualiser la mise en page des écrans sur des écrans de résolutions variées simultanément. Les fichiers sont de forme APK.

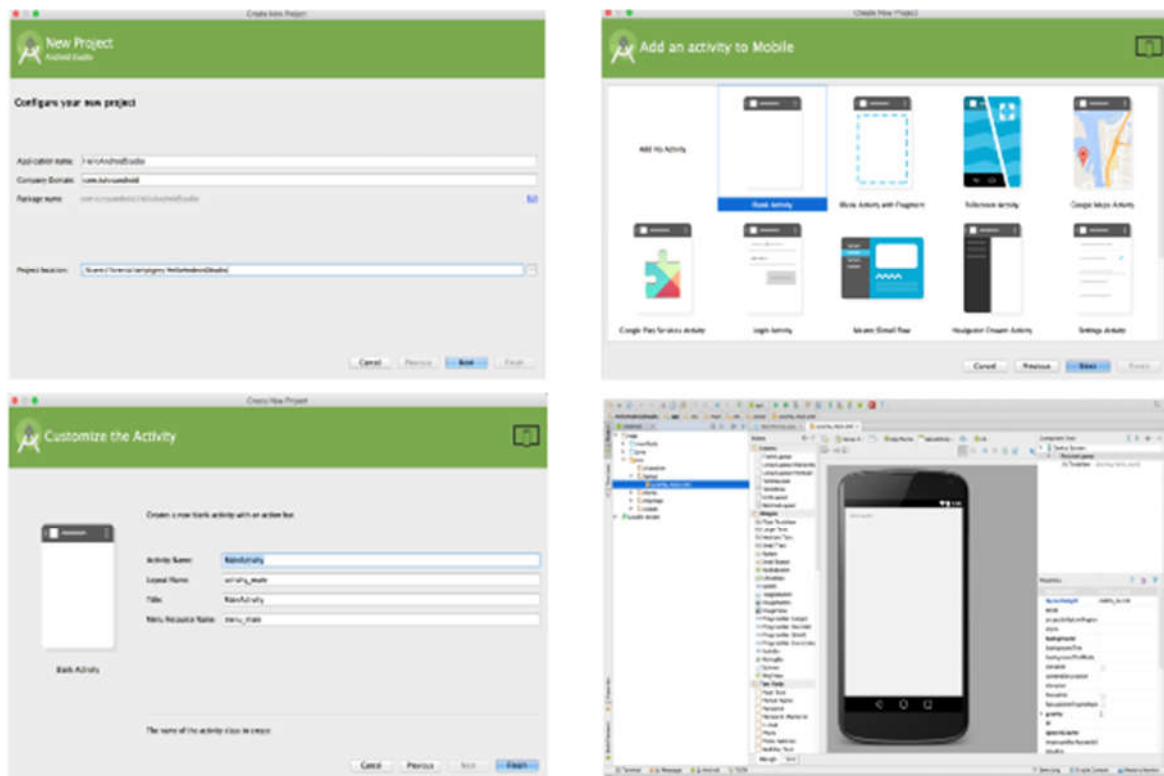


Figure 4.10. Interface de logiciel Android studio

## 4.6.2. Présentation des interfaces de l'application

L'application développée contient deux méthodes de fonctionnement, soit automatiquement ou manuellement.



*Figure 4.11. Interface application Robots\_cdta*

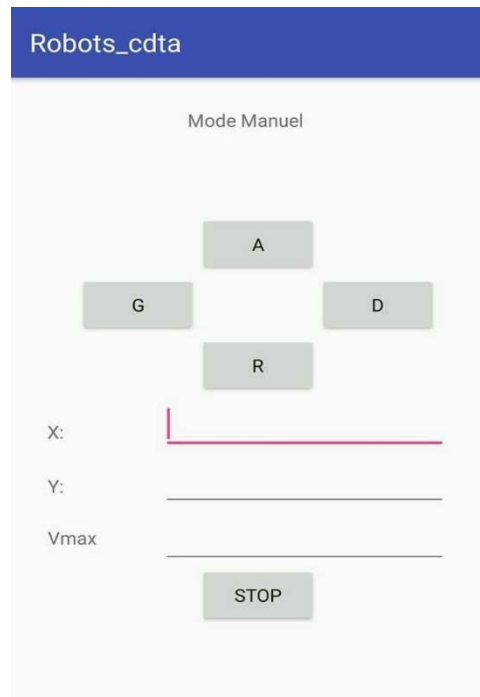
- **Bouton Mode Manuel :**

Nous permet d'afficher une autre fenêtre pour faire commander le robot en mode manuelle c'est-à-dire de faire déplacer le robot en appuyant sur des boutons.

- **Bouton Mode Autonome :**

Nous permet d'afficher une autre fenêtre pour faire commander le robot en mode autonome c'est-à-dire qu'on donne des informations pour le déplacement voulu du robot mobile.

## ❖ Mode Manuel :

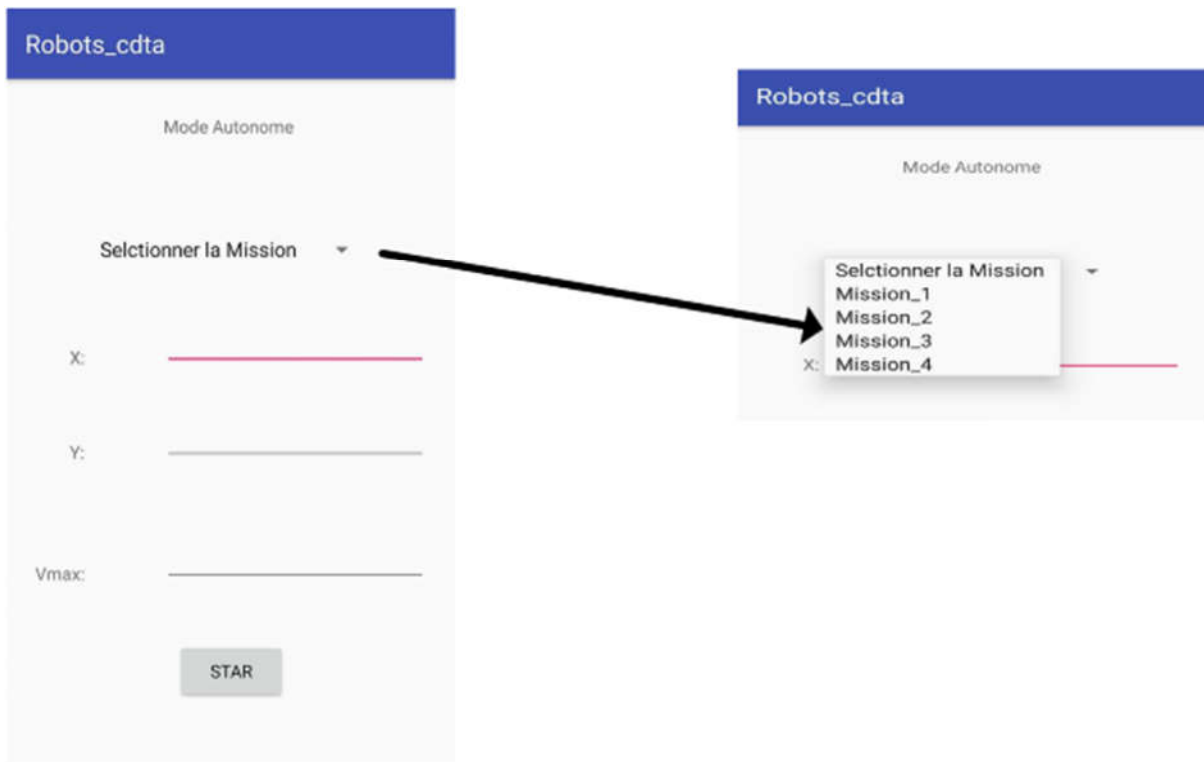


*Figure 4.12. Interface Mode manuel*

- **Bouton A** : Avance
- **Bouton D** : Tourne à droite
- **Bouton G** : Tourne à gauche
- **Bouton R** : Recule
- **Bouton Stop** : Arrêt robot
- **X, Y** : Affichage coordonnées de l'emplacement
- **Vmax** : Affichage de la vitesse du robot



## ❖ Mode Autonome :



*Figure 4.13. Interface mode autonome*

- **Les coordonnées X, Y** : coordonnées de déplacement
- **Vmax** : la vitesse donnée par l'utilisateur

- **Mission : Faire un cercle**

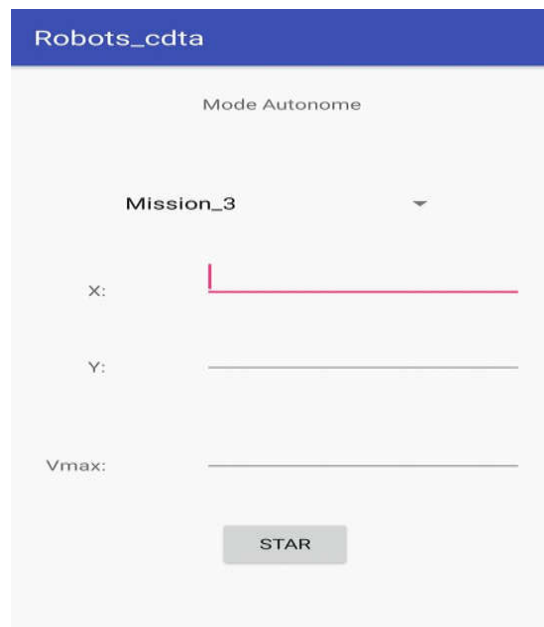
Dans cette mission, l'utilisateur donne la donnée R (rayon cercle) ainsi que la vitesse de robot puis appuie sur le bouton start pour le démarrage du robot.



**Figure 4.14. Interface mission cercle**

- **Mission : aller vers un but**

Dans cette mission, l'utilisateur donne l'emplacement du but (coordonnées X, Y) ainsi que la vitesse du robot puis appuie sur le bouton start pour le démarrage du robot.



**Figure 4.15. Interface mission Aller vers un but**

**Remarque :** La connexion entre l'application et le module Esp8266-01 n'est pas encore faite à cause de la limite du temps.

## **4.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux de la réalisation. Nous avons tout d'abord présenté les différents logiciels d'implémentation nécessaire. Par la suite, nous avons présenté les tests que nous avons faits. Enfin, nous avons aussi présenté l'outil de contrôle à distance.

## Conclusion générale

---

Dans ce mémoire, nous avons présenté un travail sur l'instrumentation multi-capteurs et la fusion de données pour la perception des robots mobiles, en utilisant de la fusion de données à partir des capteurs ultrasons et des capteurs infrarouges pour la détection d'obstacles et la navigation autonome dans un environnement inconnu.

Dans un premier temps, nous avons introduit quelques notions sur la robotique mobile, et nous nous sommes intéressés aux différentes méthodes de localisation, navigation et fusion des données. Cela nous a conduit à adopter la méthode du filtre de Kalman passons par la méthode du champ de potentiel et le calcul de l'odométrie. Aussi, par la prise en compte des caractéristiques du robot pour qu'il puisse se déplacer dans son environnement de manière autonome.

La première tâche réalisée dans ce projet était la réalisation de deux cartes « Carte de commande » et « carte support capteurs » ensuite faire un choix des capteurs à utiliser et aussi le nombre et le positionnement de ces capteurs pour l'acquisition des données de l'environnement.

La deuxième tâche réalisée consiste à développer des programmes de navigation (aller vers un but, détection d'obstacle, évitement d'obstacle) on a alors implémenté des programmes basés sur les méthodes étudiées auparavant.

La troisième tâche consiste à développer une application mobile pour faire piloter le robot à distance.

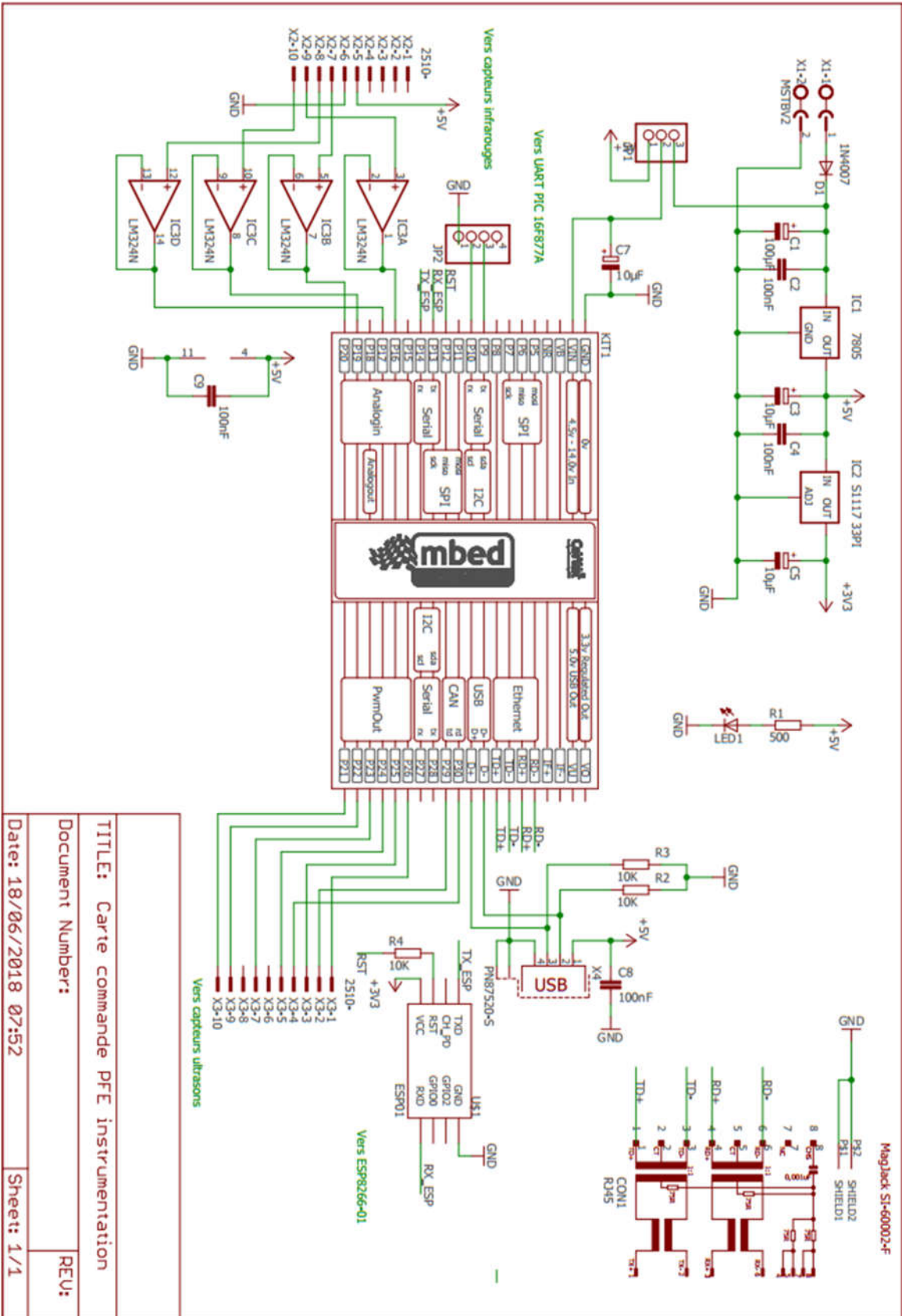
La tâche principale de ce mémoire est d'assurer une perception plus fiable qui induit une navigation autonome et sécurisée du robot. Pour arriver à faire cela, nous avons combiné les méthodes de localisation et de navigation qui prend en compte la dynamique du Romorob et amène le robot vers le but choisi avec évitement des obstacles.

Pour élargir les applications, améliorer les performances du robot 'Romorob' et compléter ce travail, nous proposons les perspectives suivantes :

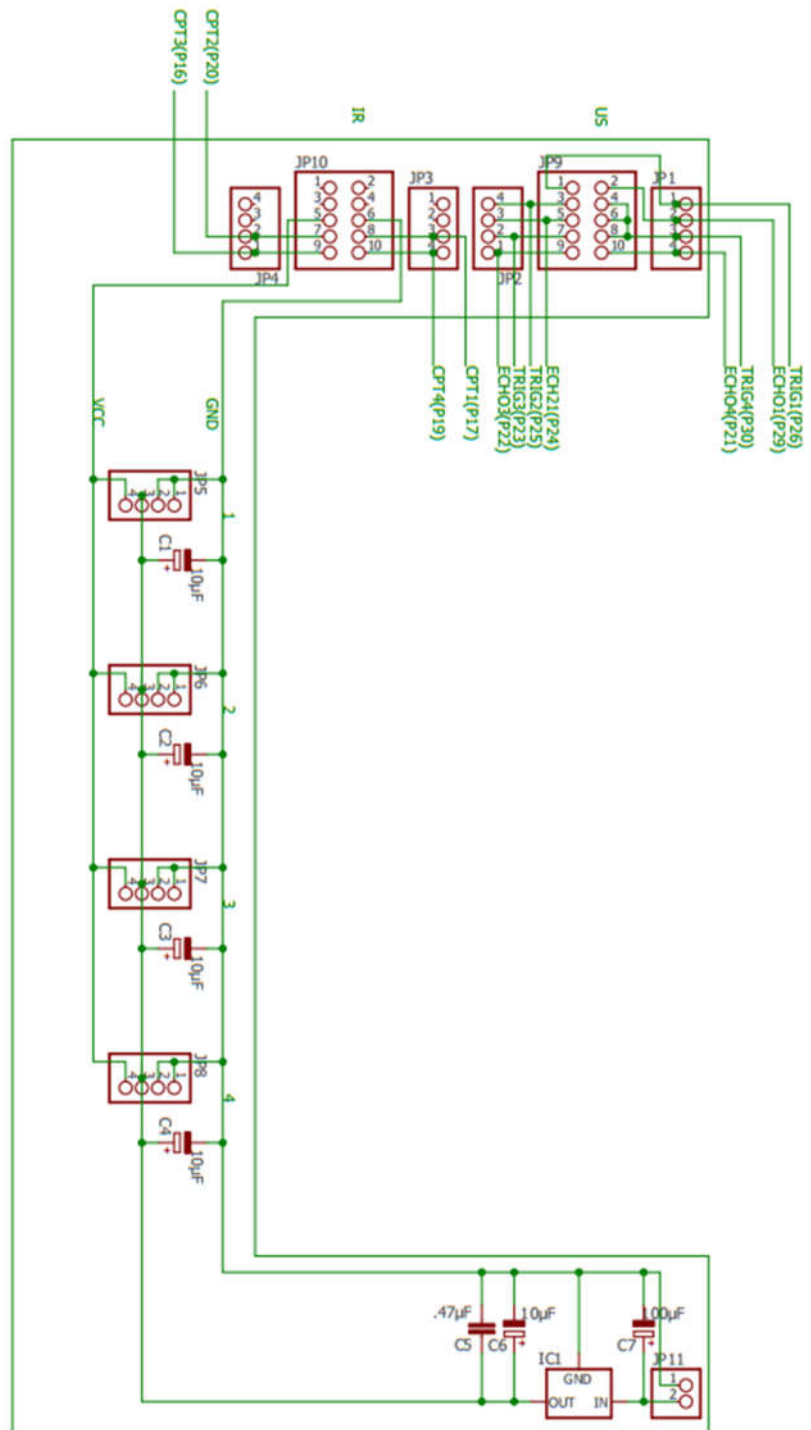
- Ajouter d'autres capteurs extéroceptifs plus performants (laser, caméra).
- Utiliser la fusion de données pour corriger la position.

- Utiliser une méthode de navigation plus pertinente.
- Continuer le travail sur une commande à distance.
- Intervenir au niveau de la partie mécanique du 'Romorob'.

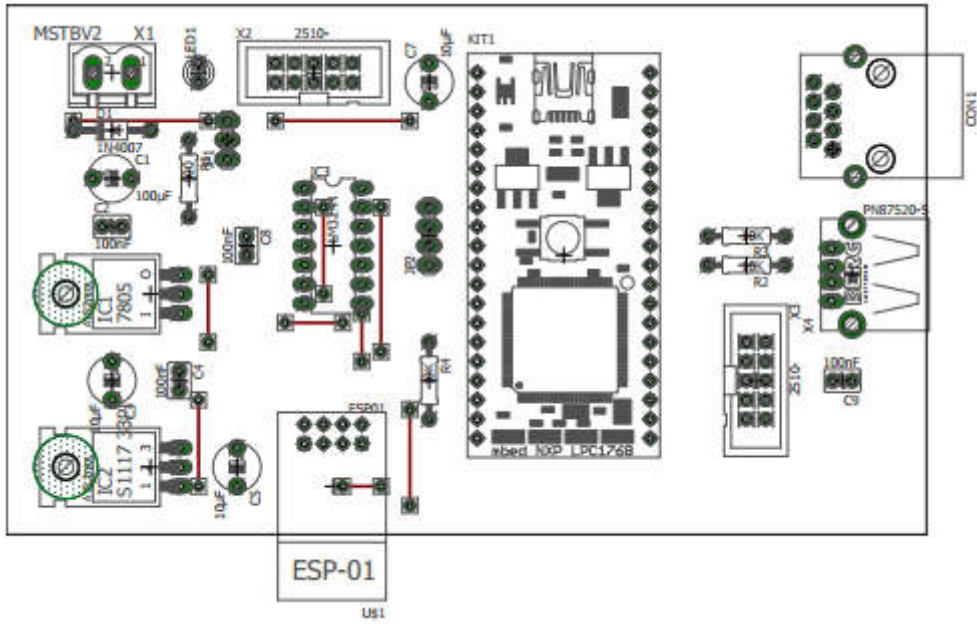
# Annexe 1



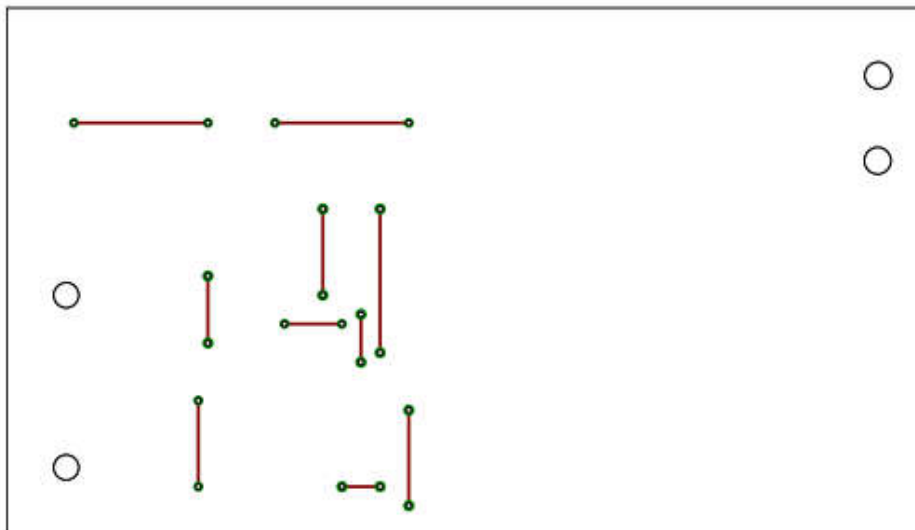
TITLE: Carte commande PFE instrumentation	
Document Number:	
Date: 18/06/2018 07:52	Sheet: 1/1
REV:	



TITLE: Carte support capteurs PFE instrumentati	
Document Number:	
REV:	
Date: 06/06/2018 21:02	Sheet: 1/1

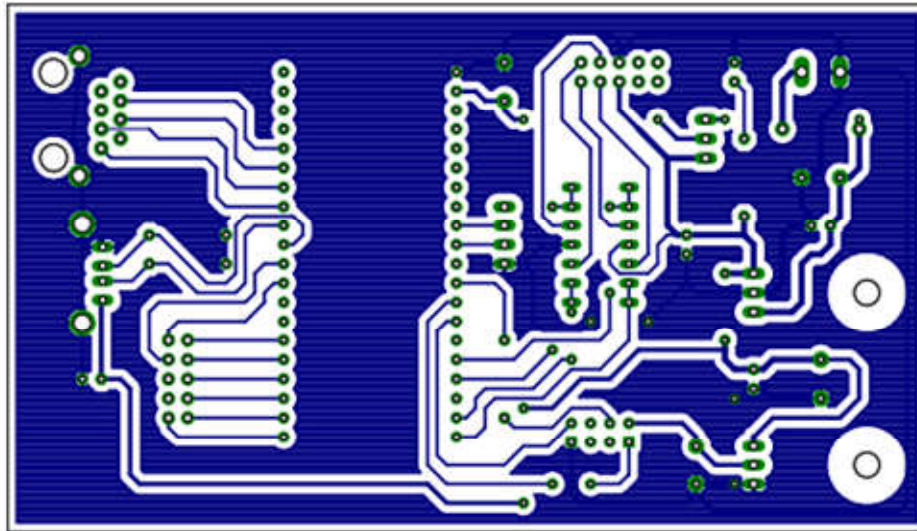


*Carte de commande vu du côté composants (échelle 1/1)*

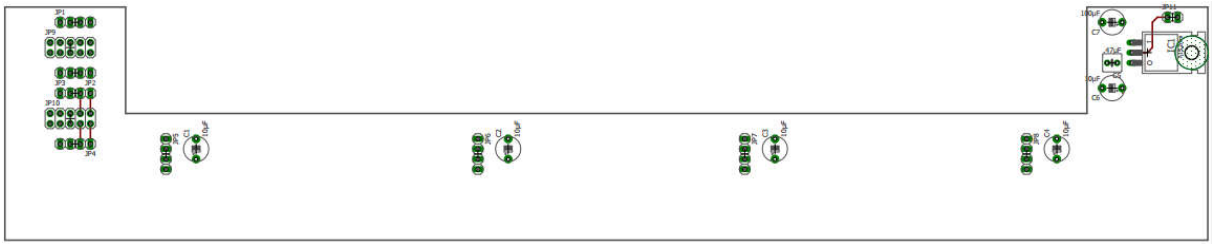


*Circuit imprimé carte commande vu du côté composants (échelle 1/1)*

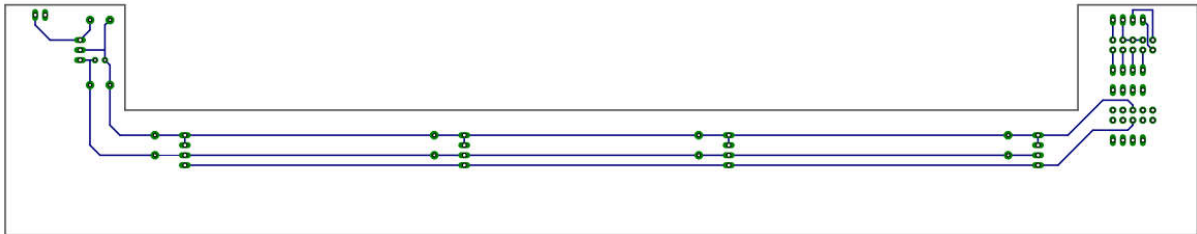




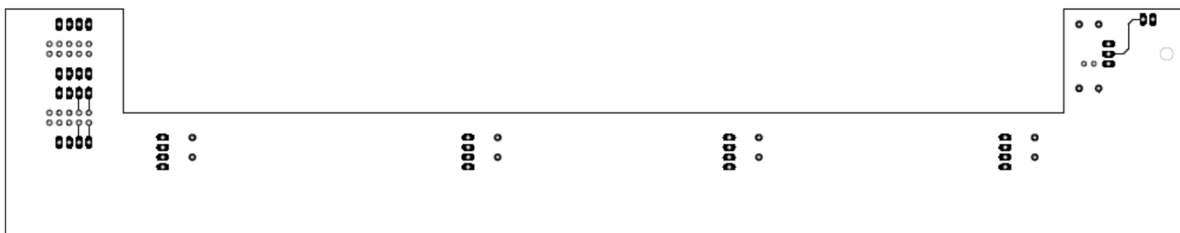
*Circuit imprimé carte commande vu du côté connexion (échelle 1/1)*



*Carte support de capteurs vu du côté composants (échelle 1/2)*



*Circuit imprimé support de capteurs vu du côté connexion (échelle 1/2)*



*Circuit imprimé support de capteurs vu du côté connexion composants (échelle 1/2)*

## Annexe 2

---

Distances (cm)	Capteur IR 1	Capteur IR 2	Capteur IR 3	Capteur IR 4
20	0,773	0,785	0,8	0,796
25	0,703	0,714	0,706	0,696
30	0,616	0,625	0,625	0,634
35	0,532	0,55	0,545	0,536
40	0,458	0,482	0,483	0,484
45	0,415	0,429	0,426	0,426
50	0,382	0,38	0,381	0,383
55	0,35	0,352	0,346	0,359
60	0,314	0,322	0,316	0,317
65	0,285	0,296	0,294	0,306
70	0,27	0,28	0,278	0,278
75	0,257	0,262	0,264	0,23
80	0,243	0,247	0,235	0,223
85	0,226	0,232	0,224	0,212
90	0,214	0,22	0,212	0,206
95	0,203	0,209	0,206	0,205
100	0,192	0,197	0,194	0,181
105	0,185	0,192	0,188	0,175
110	0,18	0,185	0,184	0,162
115	0,171	0,175	0,175	0,171
120	0,157	0,154	0,169	0,163
125	0,152	0,149	0,152	0,157
130	0,144	0,138	0,136	0,152
135	0,138	0,136	0,134	0,144

*Etalonnage des capteurs IR*

## Bibliographie

---

- [1] Domaine robot mobile, (consulté le 10 décembre 2017), disponible sur <https://sites.google.com/site/technovhugogassinc36fg5/la-robotique-actuelle>
- [2] Belkhadria Khemisti, « commande d'un robot mobile par réseaux de neurones artificiels », Mémoire de magister en électronique, Université El Hadj Lakhdar Batna
- [3] David Filliat, « Robotique Mobile », document scientifique ENSTA ParisTech, Engineering school, 2011.
- [4] Capteur LAZER, (consulté le 26mai2018), disponible sur <https://www.micro-epsilon.fr/displacement-position-sensors/laser-sensor/>
- [5] Caméra, (consulté le 10 juin 2018), disponible sur <https://www.generationrobots.com/fr/>
- [6] Capteur, (consulté le 10juin 2018), disponible sur <http://www.optique-ingenieur.org/>
- [8] Moteur à courant continu, (consulté le 3 mars 2018), disponible sur <https://coursenligne1s6.fr/si-moteur-courant-continu>
- [9] Moteur pas à pas, (consulté 3 mars2018), disponible sur <https://coursenligne1s6.fr/si-terminale-moteur-pas-a-pas>
- [10] Anthony Mallet, « Localisation d'un robot mobile autonome en environnements naturels », Thèse doctorat Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2001.
- [11] Omar Ait Aider, « Localisation référencée modèle d'un robot mobile d'intérieur », thèse doctorat Université d'Evry-Val d'Essonne, 2002.
- [12] F. CHENAVIER ; I. LECOEUR TALBI ; L. CROWLEY ; » Estimation de la Position d'un Robot par Odométrie et Vision Monoculaire », thèse doctorat Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble,1995
- [13] C. ROUCHOUZE, « Fusion de données exemples Défense et axes de recherche », Traitement du Signal ,18 mai 1994
- [14] C. Keramsi ; T.Porteboeuf ; F.Thorey, « Les filtres de Kalman », mars 2011.
- [15] Jacques Ferber, « Algorithmes d'exploration et de mouvements GMIN20A Champs de potentiel et évitement de collision #2 », LIRMM-Université de Montpellier II, mars 2017.
- [16] Carte développement Mbed, (consulté le 27 février 2018), disponible sur <https://www.generationrobots.com/>

[17] Hc-sr04-datasheet, (consulté le 22 décembre 2017), disponible sur <https://www.electroschematics.com/8902/hc-sr04-datasheet/>

[18] Capteur infrarouge Sharp GP2Y0A02YK0F , (consulté le 25decembre 2017), disponible sur <https://www.mouser.co.uk/>

[19] Logiciel eagle, (consulté le 4 mars 2018), disponible sur <http://www.elektronique.fr/logiciels/eagle.php>

[20] Compilateur Mbed, (consulté le 22 novembre 2017), disponible sur <https://os.mbed.com/>