

# Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma gratitude envers tous ceux qui ont fait de cette expérience un moment profitable.

Je remercie Monsieur Yassine Hachaïchi, Maître assistant à l'ENICarthage , pour m'avoir encadré et prodigué ses précieux conseils.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur Mondher Ben Ammar, ingénieur prototypage à Telnet pour m'avoir accompagné et aidé tout au long de ce travail . Je remercie également toute l'équipe prototypage, en particulier Monsieur Bassem Kboubi, responsable prototypage, Monsieur Jihed Jaouabi, Ingénieur Prototypage et Monsieur Anis Youssef, responsable du département Innvoation Labs, pour m'avoir accueilli au sein du leur équipe.

Un merci s'adresse aussi à Monsieur Mr Raed KOUKI PDG d'HIMILICO pour sa collaboration

Finalement, je remercie Mesdames Messieurs les jurys de bien vouloir évaluer mon travail.

---

**Abstract:** ici abstract Recently, mobile robots become more and more used in many fields such as intelligent home, military applications, etc. In this work, we introduce a solution for autonomy?s problem by proposing an automatic system of charging. This system is based on an indoor localization of the robot, its orientation and infrared guiding to the dock station. **Keywords:**mobile robots, dock station, indoor localization, infrared guiding.

---

---

**Résumé:** De nos jours, les robots mobiles sont devenus de plus en plus utilisés dans plusieurs domaines tels que la domotique, les applications militaires, etc. Dans ce travail, nous proposons une solution au problème de l'autonomie de ces robots. Elle consiste en un système de recharge automatique basé sur la localisation indoor, l'orientation vers la station de recharge et le guidage par infrarouge.

**Mots clés:** robot mobile, Station de recharge, localisation indoor, guidage par infrarouge.

---

---

## ملخص

في الوقت الحاضر، أصبحت الروبوتات المتحركة تستخدم بشكل متزايد في العديد من المجالات مثل المنازل الذكية، والتطبيقات العسكرية. في هذا العمل، نقترح حل لاستقلالية هذه الروبوتات وذلك بتمكينها من تحديد موقعها في مكان مغلق من خلال موجات الراديو، وإحالتها إلى محطة الشحن أوتوماتيكية من خلال توجيهها بالأشعة تحت الحمراء.

**كلمات البحث:** الروبوت المتحرك، محطة شحن، موجات راديوية، تمركز داخلي، توجيه بالأشعة تحت الحمراء.

---

# Table des matières

<b>Liste des figures</b>	<b>6</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>8</b>
<b>Liste des acronymes</b>	<b>10</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>2</b>
<b>1 Problématique des robots auto-rechargeables et modélisation de la solution proposée</b>	<b>3</b>
1.1 Présentation du projet . . . . .	3
1.2 Étude de l'existant . . . . .	3
1.2.1 Robot aspirateur Roomba . . . . .	3
1.2.2 Robot de surveillance . . . . .	4
1.3 Problématique . . . . .	5
1.4 Solution proposée . . . . .	5
1.5 Description du fonctionnement du robot . . . . .	6
1.6 Environnement de test . . . . .	8
<b>2 Etat de l'art des techniques et algorithmes de localisation</b>	<b>9</b>
2.1 Localisation et positionnement . . . . .	9
2.2 Technique de localisation . . . . .	11
2.2.1 Triangulation - Trilateration . . . . .	11
2.2.2 Proximité . . . . .	15
2.3 Synthèse des techniques associées aux paramètres du canal . . . . .	16
<b>3 Etude et conception du système</b>	<b>18</b>
3.1 Etude de la localisation . . . . .	18
3.1.1 La stratégie du choix des capteurs . . . . .	18
3.1.2 Caractérisation du canal de propagation RF . . . . .	20
3.1.3 Localisation par trilateration . . . . .	21
3.2 Détermination de l'orientation du robot . . . . .	23
3.3 Choix des cartes de développement . . . . .	25
3.4 Guidage par balise infrarouge . . . . .	26
3.4.1 Circuit de réception infrarouge . . . . .	27
3.4.2 Circuit d'émission infrarouge . . . . .	29
3.5 Evitement d'obstacle . . . . .	30
3.6 Etude de l'autonomie du système . . . . .	33
3.6.1 Caractéristiques de la batterie du robot . . . . .	33
3.6.2 Indication des niveaux des batteries du système . . . . .	33
3.7 Conception mécanique . . . . .	35

## TABLE DES MATIÈRES

---

3.7.1	Support Ultrason . . . . .	35
3.7.2	Station de recharge . . . . .	35
3.7.3	Système de guidage . . . . .	36
3.7.4	Boitiers des stations fixes . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Réalisation</b>	<b>38</b>
4.1	Implémentation de l'algorithme de localisation . . . . .	38
4.1.1	Configuration des capteurs . . . . .	38
4.1.2	Détermination des paramètres du canal de propagation . . . . .	39
4.1.3	Calcul des coordonnées . . . . .	43
4.2	Carte électronique de la station de recharge . . . . .	44
4.3	Carte électronique du robot . . . . .	44
4.4	Assemblage du robot . . . . .	45
	<b>Bibliographie</b>	<b>48</b>

# Liste des figures

1.1	Roomba en position de recharge . . . . .	4
1.2	Prototype du robot de surveillance et de sa station de recharge . . . . .	4
1.3	Diagramme de pieuvre du robot auto-rechargeable . . . . .	6
1.4	Schéma en bloc du robot auto-rechargeable . . . . .	6
1.5	Organigramme de fonctionnement du robot . . . . .	7
1.6	Environnement de test de la localisation . . . . .	8
2.1	Principe de la localisation et du positionnement . . . . .	9
2.2	Principe d'un système de localisation . . . . .	10
2.3	Principe système de positionnement . . . . .	10
2.4	Intersection des régions de présence . . . . .	12
2.5	Technique de mesure basée sur l'angle d'arrivée du signal . . . . .	13
2.6	Région d'intersection des hyperboles . . . . .	14
2.7	Positionnement en utilisant la phase du signal . . . . .	15
3.1	Diagramme de rayonnement de l'antenne filaire . . . . .	19
3.2	Détermination de la position par trilateration . . . . .	22
3.3	Orientation du robot vers la station de recharge . . . . .	24
3.4	Cartes de développement utilisées . . . . .	25
3.5	Arduino Fio . . . . .	26
3.6	Batterie Polymère . . . . .	26
3.7	Récepteur infrarouge TSOP1838 . . . . .	27
3.8	Configuration du NE555 en mode monostable . . . . .	27
3.9	Forme d'onde des signaux d'entrée/Sortie . . . . .	28
3.10	Forme d'onde du signal de sortie . . . . .	28
3.11	Circuit électrique de la réception infrarouge . . . . .	28
3.12	Configuration en mode astable . . . . .	29
3.13	Forme d'onde du signal de sortie en mode astable . . . . .	29
3.14	Circuit d'émission infrarouge . . . . .	30
3.15	Détecteur d'obstacle ultrason SRF-05 . . . . .	30
3.16	Chronogramme de fonctionnement du capteur ultrason HY-SRF05 . . . . .	31
3.17	Robot éviteur d'obstacle . . . . .	32
3.18	Organigramme d'évitement d'obstacle . . . . .	32
3.19	Batterie Lithium-Ion rechargeable 14.8V . . . . .	33
3.20	Schéma électrique d'un pont diviseur de tension . . . . .	34
3.21	Schéma électrique d'un pont diviseur de tension . . . . .	34
3.22	Support Ultrason . . . . .	35
3.23	Station de recharge . . . . .	36
3.24	Pare choc robot . . . . .	36
3.25	Boîtier de station fixe . . . . .	37

## LISTE DES FIGURES

---

4.1	XBee explorer . . . . .	38
4.2	Interface X-CTU . . . . .	39
4.3	Mesure à 1m du récepteur . . . . .	40
4.4	Evolution du Path Loss en fonction de la distance (Pt=18dBm) . . . . .	40
4.5	Evolution du Path Loss en fonction de la distance (Pt=10dBm) . . . . .	41
4.6	Evolution du Path Loss en fonction de la distance (Pt=0dBm) . . . . .	42
4.7	Linéarisation du Path Loss . . . . .	42
4.8	Comparaison entre la distance réelle et la distance calculée . . . . .	43
4.9	Carte électronique de la station de recharge . . . . .	44
4.10	Carte électronique du robot . . . . .	45
4.11	Robot en cours d'assemblage . . . . .	45

# Liste des tableaux

2.1	Résumé des principales techniques de localisation . . . . .	17
3.1	Etude comparative entre les 3 capteurs disponible sur le marché . . . . .	19
3.2	Caractéristiques de l'Arduino Mega et de l'STM NUCLEO . . . . .	25
3.3	Caractéristiques du capteur HY-SRF05 . . . . .	31
4.1	Variation de la puissance du signal en fonction de la distance $P_t = 18dBm$ . . . . .	40
4.2	Variation de la puissance du signal en fonction de la distance $P_t = 10dBm$ . . . . .	41
4.3	Variation de la puissance du signal en fonction de la distance $P_t = 0dBm$ . . . . .	41

# Liste des acronymes

## A

**ACK:** Acknowledgement

**ADC:** Analog Digital Converter

**AOA:** Angle Of Arrival

**API:** Application Programming Interface

**AT:** ATtension

## L

**LCD** Liquid-Cristal Display

**LOS** Line Of Sight

## P

**POA** Phase Of Arrival

## R

**RSSI** Reiceived Signal Strength Indication

## T

**TDOA** Time Difference Of Arrival

# Avant propos

Notre projet s'est déroulé au sein de Telnet Innovation Labs. Il s'agit d'une filiale du groupe Telnet Holding dont le but est d'assurer des activités de recherche et développement pertinentes et innovantes.

Telnet Innovation Labs est composé d'une équipe de recherche qui a pour mission de développer des nouvelles notions théoriques et d'une équipe d'ingénieurs responsables de la réalisation des prototypes innovants.

Telnet Innovation Labs bénéficie de partenaires assez importants à l'occurrence du CEA (Commissariat de l'énergie Atomique), l'IFT (Institut Français de Tunisie) et l'EPFL (Ecole polytechnique fédérale de Lausanne). Ce projet entre dans le cadre d'une coopération entre Telnet Innovation Labs et l'IFT.

# Introduction générale

Avec le développement rapide des systèmes embarqués et des technologies de communication sans fils, les robots mobiles sont devenus très utilisés dans l'industrie évoluée, la domotique, les hôpitaux, etc. De nouvelles fonctionnalités ont vu le jour et elles ont fait paraître de nouveaux problèmes, tels que l'autonomie du système qui est inversement proportionnelle à l'exploitation de ces nouvelles fonctionnalités.

Par conséquent, L'utilisateur du robot mobile doit choisir entre une entière exploitation des fonctionnalités et l'économie de l'énergie fournie par le robot. Pour trouver un compromis entre ces deux alternatives, certaines recherches se sont intéressées à la gestion optimale des ressources du robot pour améliorer son autonomie. Certes, cette solution est très efficace, mais elle requiert, tôt ou tard, une intervention humaine pour recharger le robot. Nous avons donc pensé à concevoir un système intelligent implémentable sur les robots mobiles qui leur permettra une recharge automatique et donc une autonomie continue. En effet, pour pouvoir se recharger automatiquement, le robot mobile doit connaître sa position par rapport à une station de recharge fixe lorsque le niveau de sa batterie est faible. Une fois localisé, le robot doit s'orienter vers la station de recharge et se déplacer vers elle en évitant tout obstacle pouvant survenir sur son chemin pour, finalement, se mettre en position de recharge.

Notre rapport est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre traitera la problématique des robots auto-rechargeables. Le deuxième chapitre présentera les principales méthodes de localisation indoor. Le troisième chapitre à l'étude et conception du système. Finalement, le dernier chapitre s'adressera à la réalisation où nous allons décrire les différents tests effectués et interpréter les résultats obtenus.

# CHAPITRE 1

# Problématique des robots auto-rechargeables et modélisation de la solution proposée

---

## Introduction

L'objectif de ce chapitre est de se mettre dans le contexte du projet. Pour cela, dans un premier lieu, nous commençons par une présentation du projet. En deuxième lieu, une étude de l'existant sera présentée pour pouvoir mettre en oeuvre les défauts des systèmes auto-rechargeables déjà présents dans le marché et nous terminons par la présentation de la solution proposée et la description du fonctionnement de notre système.

### 1.1 Présentation du projet

Ce projet entre dans le cadre de la coopération entre TELNET INNOVATION LABS et l'institut Français de Tunisie afin de mettre en oeuvre des nouvelles technologies.

L'objectif de ce projet est de concevoir un système intelligent implémentable sur n'importe quel robot afin de lui assurer une autonomie continue. Pour effectuer cette tâche, le robot doit connaître sa position par rapport à celle de sa station de recharge qui est placée dans un endroit connue d'avance, puis se déplacer vers elle et se mettre en position de recharge.

### 1.2 Étude de l'existant

De nos jours, Il existe plusieurs systèmes déjà dans le marché et d'autres en phase de prototypage qui sont capable de se recharger automatiquement lorsque leur niveau de batterie est faible. Parmi ces systèmes, nous citons le robot aspirateur Roomba [1] et le robot de surveillance [2]

#### 1.2.1 Robot aspirateur Roomba

L'autonomie de ce robot aspirateur est d'environ deux heures. Une fois sa batterie est faible, il suspend ses activités et retourne pour se connecter automatiquement au chargeur. Cette opération est effectuée grâce au récepteur infrarouge situé sur son pare-chocs avant.

## 1.2 Étude de l'existant

---

Lorsque la batterie est faible, le robot commence à chercher le signal infrarouge émis par le chargeur. Une fois trouvé, Roomba suit le signal en évitant les obstacles apparaissant sur son chemin et se met en charge. Certains robots aspirateurs qui incluent cette fonctionnalité d'auto-recharge peuvent reprendre le nettoyage dans la zone où ils étaient avant la recharge une fois la batterie est totalement rechargée. La figure 1.1 représente l'aspirateur Roomba en position de recharge.



Figure 1.1: Roomba en position de recharge

### 1.2.2 Robot de surveillance

Ce robot de surveillance est capable de fonctionner dans un environnement vide pendant plusieurs jours sans aucune intervention humaine vu qu'il est capable de se recharger automatiquement lorsque son niveau de batterie est faible. Il est équipé de deux moteurs avec encodeurs qui lui permettent de connaître sa position et son orientation à tout instant t et d'où il est capable de revenir à sa station de recharge qui connaît sa position d'avance lorsque son niveau de batterie est faible en évitant les obstacles apparaissant sur son chemin. Cette station de recharge est équipée de deux émetteurs infrarouge qui aident le robot à se mettre en position de recharge lorsqu'il entre dans la zone de couverture de ces capteurs. La figure 1.2 représente ce robot ainsi que sa station de recharge.

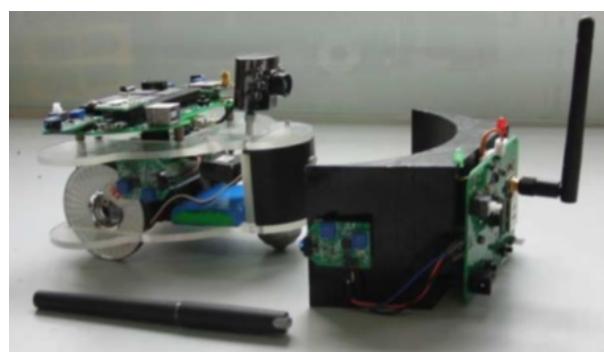


Figure 1.2: Prototype du robot de surveillance et de sa station de recharge

## 1.3 Problématique

En faisant l'évaluation des systèmes qui existent déjà sur le marché, nous pouvons remarquer que la phase la plus compliquée dans le procédés de recharge automatique est la localisation du robot dans un environnement indoor lorsque son niveau de batterie est faible. Cette localisation est généralement assurée soit par un système permettant le calcul de la position à chaque instant  $t$ , soit en faisant référence à des dispositifs qui ont une position fixe connue d'avance par le robot. Prenons à titre d'exemple les deux robots que nous avons déjà présentés dans le paragraphe 1.2. Pour le robot aspirateur Roomba, nous pouvons remarquer qu'il ne peut retourner à sa station de recharge que lorsqu'il est dans la zone de couverture des émetteurs infrarouge qui est estimée à environ 5m dans des conditions d'éclairage bien spécifique. Pour le robot de surveillance, nous pouvons remarquer qu'il se localise en calculant à chaque instant  $t$  sa position actuelle par rapport à sa position précédente donc à chaque fois la distance parcourue augmente l'erreur de mesure augmente. En plus, ce robot fonctionne généralement dans un environnement vide vu qu'il ne supporte pas un déplacement manuel lors de son fonctionnement. Nous pouvons ainsi conclure que la proposition d'un nouveau système de localisation est nécessaire dans notre projet.

## 1.4 Solution proposée

La solution que nous avons proposée pour pouvoir réaliser ce projet était de faire l'étude d'un système de géolocalisation indoor bien spécifique que nous pouvons l'implémenter après dans un robot permettant d'assurer les fonctions suivantes :

- FC1** : Détection du niveau bas de la batterie.
- FC2** : Auto-localisation dans le plan ( $x,y$ ).
- FC3** : Détermination de l'orientation par rapport à la station de recharge.
- FC4** : Evitement d'obstacles fixes et mobiles qui apparaissent dans sa trajectoire.
- FC5** : Déplacement vers la station de recharge.
- FC6** : Positionnement du robot dans la station de recharge grâce à un guidage par infrarouge.

Le diagramme présenté par la figure 1.3 décrit les diverses fonctionnalités qui doivent exister dans notre robot afin de pouvoir effectuer sa tâche avec succès.

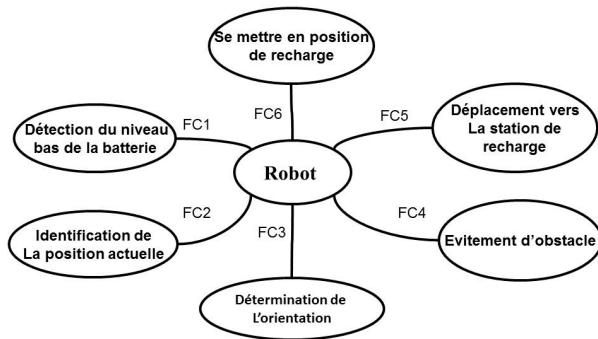


Figure 1.3: Diagramme de pieuvre du robot auto-rechargeable

Pour la station de recharge, son rôle est d'émettre un signal infrarouge indiquant son emplacement exact au robot et d'assurer l'opération de la recharge de la batterie.

Pour pouvoir évaluer les diverses fonctionnalités de notre système, nous avons proposé de réaliser un prototype d'essai du robot et de la station de recharge.

## 1.5 Description du fonctionnement du robot

Notre robot auto-rechargeable est une plateforme composé d'un ensemble de matériel et logiciel permettant l'exécution des tâches bien définies . Ceci est assuré par l'intermédiaire des équipements mécaniques et électriques que présente la figure 1.4

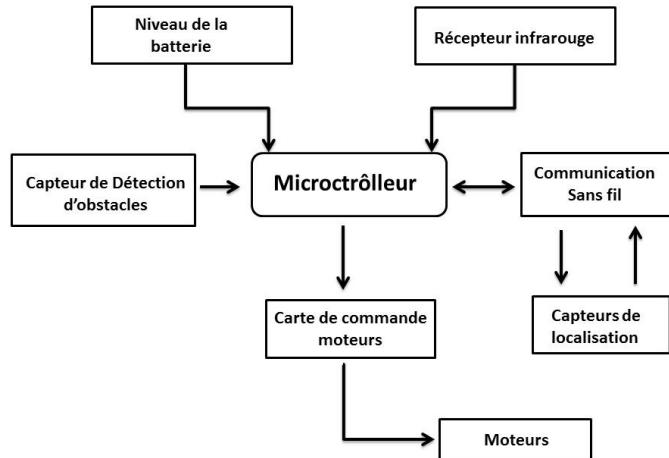


Figure 1.4: Schéma en bloc du robot auto-rechargeable

Lorsque le robot est en cours de fonctionnement normal et détecte le niveau bas de sa batterie, il suspend ses activités et se localise dans le plan (x,y) grâce à des capteurs

## 1.5 Description du fonctionnement du robot

---

qui lui permettent d'effectuer cette tâche. Une fois la position du robot est connue, il s'oriente vers la station de recharge et se déplace vers elle. Si un obstacle apparaît dans sa trajectoire, le robot l'évite, se relocalise et s'oriente de nouveau vers la station de recharge pour continuer son chemin. Ce procédé se répète jusqu'à ce que le robot entre dans la zone de couverture du signal infrarouge émis par la station de recharge. Si cette condition est vérifiée, notre robot ajuste son positionnement et continue son déplacement jusqu'à atteindre la position de recharge. Une fois la batterie est complètement rechargée, le robot se détache de cette station et reprend ses activités. La figure 1.5 représente l'organigramme du fonctionnement du robot.

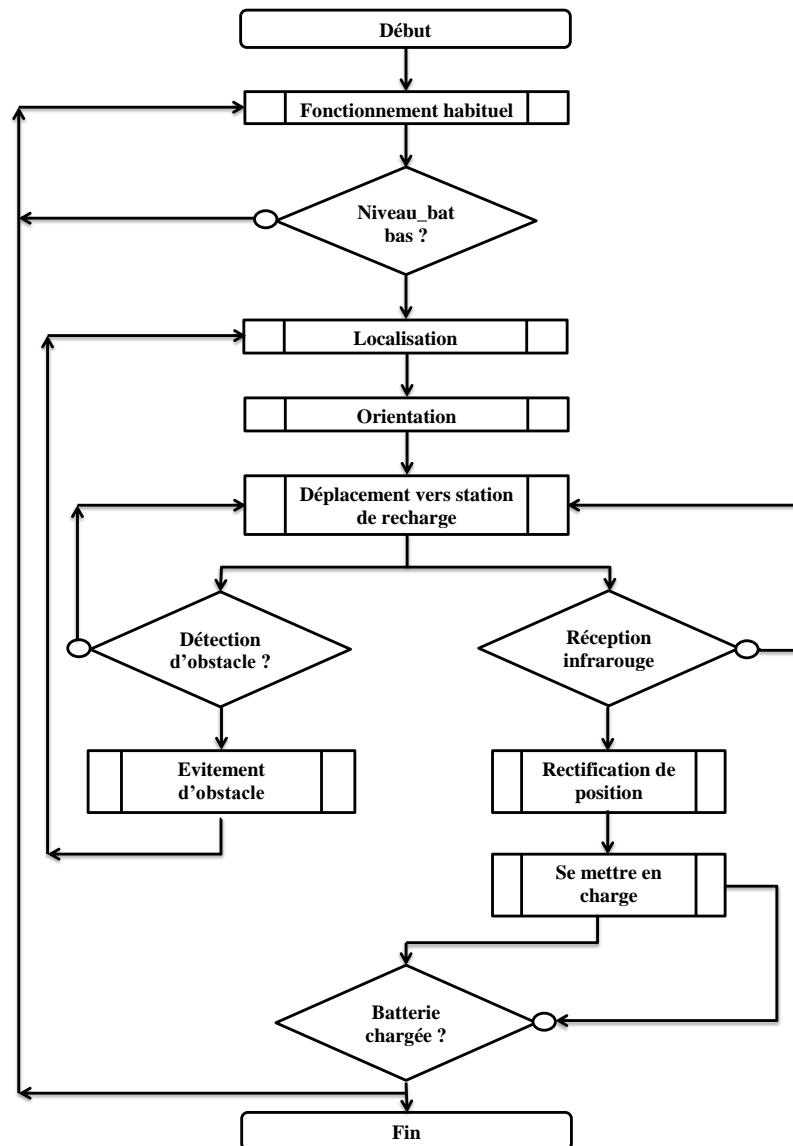


Figure 1.5: Organigramme de fonctionnement du robot

## 1.6 Environnement de test

L'environnement dans lequel nous allons tester le prototype du robot et de la station de recharge a les caractéristiques suivantes :

- Surface plane de 10m\*10m.
- Pas d'obstacles (ni fixes, ni mobiles)
- La station de recharge et le robot sont dans la même surface (pas d'obstacles entre le robot et la station de recharge).
- L'environnement est supposé invariant au cours du temps (les caractéristiques de propagation sont invariantes).

La figure 1.6 représente cet environnement de test.



Figure 1.6: Environnement de test de la localisation

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit notre projet ainsi que la solution proposée après être passé par une étude de l'existant et dégagé les défaillances de quelques systèmes déjà existant. Pour pouvoir entamer la partie de l'étude et conception du projet, nous devons tout d'abord fixer la méthode de localisation que nous allons adopter pour notre projet. Pour cela une étude comparative a été faite et sera présentée dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE 2

# Etat de l'art des techniques et algorithmes de localisation

---

## Introduction

La radiolocalisation est un ensemble de techniques qui permettent l'identification des positions d'un mobile, objet ou individu dans un milieu donné. Ce milieu peut être le milieu confiné ou l'espace libre. Depuis l'apparition du GPS, la demande en systèmes de localisation est toujours croissante. En particulier, la localisation indoor de précision trouve une multitude d'applications non seulement dans le domaine grand public mais également dans celui de la sécurité publique et militaire (suivi des pompiers, des détenus etc.). On peut citer comme exemple d'applications commerciales, les systèmes de surveillance des personnes âgées ou des enfants, des systèmes d'aide à la mobilité des malvoyants et également la localisation de mobile ou de colis dans des entrepôts. D'autres applications des systèmes de positionnement indoor concernent la mobilité autonome des robots. Dans ce chapitre, nous décrivons l'état de l'art des différentes techniques et algorithmes de localisation en milieu confiné indépendamment de la technologie utilisée en distinguant celles que nous pouvons appliquer dans notre projet.

## 2.1 Localisation et positionnement

La réalisation d'un système de localisation implique une infrastructure contenant un ensemble des capteurs permettant d'acquérir les informations nécessaires sous diverses formes (acoustique, électrique, etc.), une référence par rapport à laquelle la position de l'objet à localiser est déterminée et une partie intelligente permettant de traiter les échantillons acquis et d'extraire l'information nécessaire pour déterminer la position.

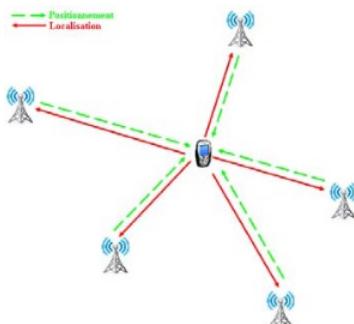


Figure 2.1: Principe de la localisation et du positionnement

## 2.1 Localisation et positionnement

---

Le traitement des données peut être effectué à un emplacement dédié du réseau ou au niveau de l'objet mobile souhaitant se localiser. Dans le premier cas le procédé est appelé localisation tandis que dans le deuxième il est connu sous le nom de positionnement. Si l'information sur la position est calculée au niveau du réseau et retransmise à l'objet mobile ou inversement, les deux notions peuvent être inter-changées. Une autre nomination qui existe dans plusieurs ressources, c'est l'approche où on désigne la localisation par l'approche ascendante et le positionnement par l'approche descendante. Dans la localisation, le mobile est l'émetteur et sa localisation est effectuée au niveau d'un serveur central fixe. Par contre, dans l'approche descendante, le mobile est le récepteur et sa localisation se fait à son propre niveau. Les figures 2.2 et 2.3 illustrent la différence entre un système de localisation et un système de positionnement.

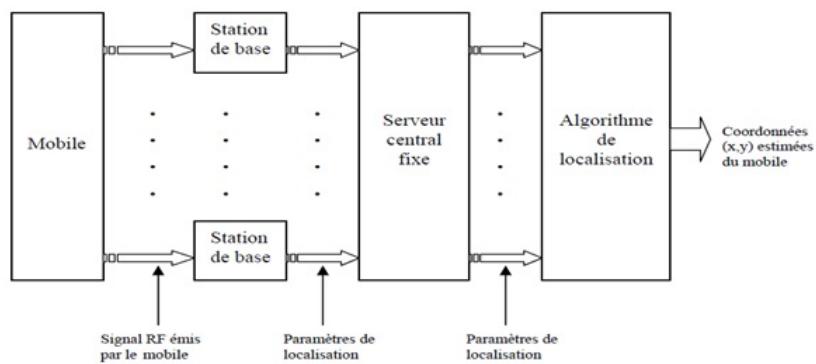


Figure 2.2: Principe d'un système de localisation

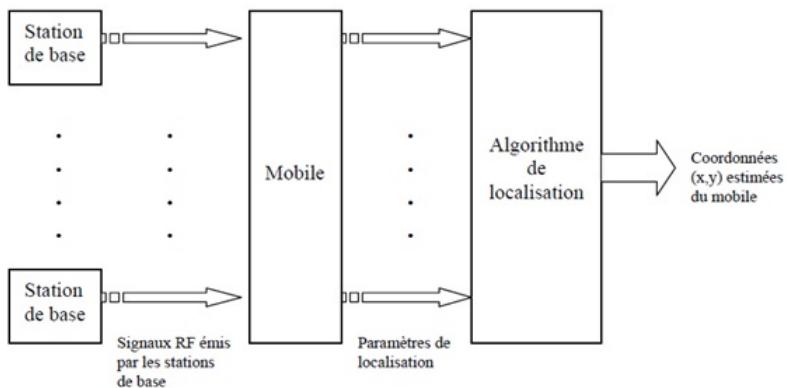


Figure 2.3: Principe système de positionnement

S'il existe une liaison de données ou un canal de communication bidirectionnel, les informations de positionnement ou de localisation peuvent être transmises entre les différentes parties du système. Si, par exemple, on dispose d'un mobile qui effectue du positionnement et il peut transmettre des données vers la partie fixe du réseau (site distant), cette dernière est appelée positionnement indirect à distance. Le deuxième cas, c'est l'auto-positionnement indirect qui consiste à transmettre les résultats de mesure à

distance vers le mobile via une liaison sans fil de données.

La plupart des systèmes de localisation nécessitent l'existence d'une ou plusieurs stations de base à des emplacements fixes. Le mobile est l'émetteur et la station de base est le récepteur des signaux émis par le mobile ou inversement selon l'approche utilisée. A la réception des signaux, on mesure les paramètres qui vont servir à la localisation. Selon la technique, les paramètres peuvent être:

- La puissance du signal reçu RSSI
- L'angle d'arrivée des signaux AOA
- Le Temps d'arrivée des signaux TOA
- La différence de temps d'arrivée des signaux TDOA.

Les paramètres présentés ci-dessus constituent les entrées de l'algorithme de localisation qui ensuite donnera la position estimée du mobile. La prochaine section présente les différentes techniques de mesures utilisées pour la localisation en milieu confiné.

## 2.2 Technique de localisation

### 2.2.1 Triangulation - Trilateration

Le principe de la triangulation [3], est l'utilisation des propriétés géométriques des triangles pour estimer l'emplacement d'un objet à détecter. On distingue les techniques basées sur la mesure du temps de propagation (TOA, TDOA) et la puissance du signal (RSS) qui sont appelées « lateration techniques » ou trilateration et celle basées sur l'estimation des angles (AOA) appelées « angulation techniques » ou triangulation. Dans ce qui suit les principales techniques de mesure qui utilisent l'algorithme de triangulation sont présentées :

#### 2.2.1.1 La puissance du signal reçue (RSS)

C'est une des techniques [3] classique de localisation que ce soit dans les réseaux locaux sans fils ou dans les réseaux radios mobiles. Son principe, très simple, consiste à déterminer la distance entre le système de transmission et celui de réception en calculant la perte en énergie du signal reçu. Dépendant du milieu de transmission, on peut obtenir l'expression du gain du canal ou on peut aussi le modéliser par des formules mathématiques qui donnent la perte de puissance et relient cette perte à la distance ou par la valeur de la puissance reçue qui s'exprime en fonction de la distance. Les expressions de la puissance reçue et du gain statique du canal de propagation sans fil sont abordées dans le chapitre 3.

Dans le cas général, trois stations de base sont requises pour effectuer la localisation. Supposant que les paramètres sont connus à l'avance, on peut alors calculer la distance  $d1$  séparant la première station de base du mobile. Ainsi, on refait les calculs pour les deux autres distances  $d2$  et  $d3$ . On obtient donc trois cercles de rayons  $d1, d2$  et  $d3$ . La position

du mobile est connue par le point d'intersection de ces trois cercles. La figure 2.4 illustre le principe de localisation par la puissance du signal reçue.

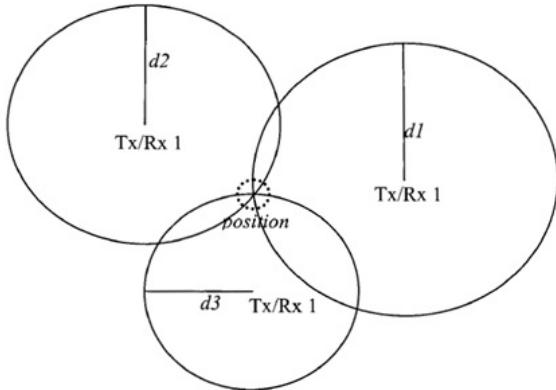


Figure 2.4: Intersection des régions de présence

Connaissant la formule d'un cercle, et avec les trois cercles qu'on a déjà représenté, on peut obtenir trois équations à trois inconnus et donc il est possible de calculer les coordonnées exactes du mobile. Il faut noter aussi que dans le cas idéal, c'est-à-dire quand il y a présence d'un trajet direct (LOS), la localisation est parfaite. Mais en l'absence de trajet direct et considérant des trajets multiples par diffusion ou par réflexion, cette technique n'est plus précise. Il y aura donc des erreurs dans la position du mobile. Par contre, l'avantage de ce cette techniques c'est qu'elle ne requiert l'ajout d'aucun matériel, est utilisable dans n'importe réseau sans fil et ne demande pas de synchronisation entre les stations de bases ni entre les stations de bases et le mobile.

### 2.2.1.2 L'angle d'arrivée (AOA)

Cette technique [3] utilise les angles pour estimer la position du mobile. Dans le cas d'une localisation bidimensionnelle, il faut au moins deux angles et une distance qui est la distance séparant les deux stations de bases. Par contre, dans le cas d'une localisation tridimensionnelle, il faut deux mesures d'angles, une mesure de distance et une mesure d'élévation pour pouvoir estimer la position du mobile. Cette technique de mesure ne demande pas de synchronisation entre les points de référence ou les stations de base. le principe de cette technique est illustrée sur la figure 2.5. Les directions en pointillé sont les directions du trajet direct (LOS : Line Of Sight) qui font respectivement les angles  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  par rapport à un axe prédéfini aux stations de bases SB1 et SB2. Leur intersection donne la position exacte du mobile. Si les antennes de réception dispose d'une marge d'erreur  $\pm\theta_s$ , alors chaque station localise le mobile dans un faisceau équivalent à la direction mesurée plus ou moins la marge d'erreur. Ainsi, le mobile se trouve dans la région hachurée formée par l'intersection des deux faisceaux. Un autre problème peut se présenter, c'est que dans un milieu confiné, il y a des obstacles. Ces derniers peuvent engendrer l'absence du trajet direct et la présence des trajets réfléchis, ce qui induit des erreurs d'estimation de la position exacte du mobile.

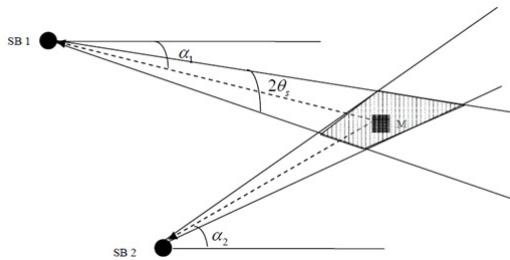


Figure 2.5: Technique de mesure basée sur l'angle d'arrivée du signal

Plus le mobile s'éloigne des stations de base, plus la zone d'intersection est grande. La précision de cette technique se dégrade au fur et à mesure que le mobile s'éloigne des stations de base. L'inconvénient de cette technique c'est qu'elle demande beaucoup de complexité côté matériel.

### 2.2.1.3 Le temps d'arrivée (TOA)

Cette technique [3] de mesure permet d'estimer la position du mobile grâce à l'information temporelle tirée du signal. Elle est l'une des méthodes les plus précises et est plus efficace que celle basée sur la puissance du signal reçu. Par contre, elle est plus complexe puisqu'elle demande une synchronisation exacte entre les différents équipements formant le réseau. Puisque le signal reçu contient une information sur le moment d'émission, on peut déduire le temps de propagation en faisant la différence entre le temps de transmission et le temps d'arrivée au récepteur. C'est pourquoi la synchronisation joue un rôle essentiel pour obtenir la durée exacte du trajet. Or les ondes électromagnétiques ou les ondes optiques se propagent à la vitesse de la lumière ( $c = 3 * 10^8 m/s$ ), on peut ainsi calculer la distance entre l'émetteur et le récepteur par la formule 2.1 :

$$d = c * t \quad (2.1)$$

Cette distance représente le rayon d'un cercle centré sur la station de base. Comme pour le cas de la technique de la puissance reçue, on pourra estimer la position d'un objet en combinant trois régions couvertes par trois stations de base. Ainsi, le point d'intersection, qui représente la position, sera calculable. Donc le calcul des coordonnées du mobile se fait de la même manière que dans la technique RSS. Dans le cas des trajets multiples, il se peut que le signal reçu ne soit pas celui du trajet direct. Il se peut aussi qu'un signal reçu soit retardé et qu'il soit aussi issu d'une localisation antérieure. Pour éviter ces problèmes, il existe différents techniques qui peuvent être matérielles ou logicielles. Par exemple, on peut ajouter un numéro identificateur avec les informations contenues dans le signal pour que le récepteur puisse vérifier si le signal est utilisable pour la localisation. Ceci augmente la complexité.

### 2.2.1.4 La différence de temps d'arrivée (TDOA)

Cette technique [4] est considérée comme une variante de la technique TOA. Contrairement à la TOA, le réseau doit être synchronisé seulement au niveau des stations

## 2.2 Technique de localisation

---

de base. Cependant, le temps considéré n'est pas celui mis pour effectuer le trajet, mais plutôt la différence de temps entre les stations qui ont reçu le signal. Puisque les positions des stations de base sont connues à l'avance et que le signal émis par le mobile à localiser se propage dans toutes les directions avec la même vitesse, en comparant les différences d'arrivée du signal entre les stations de base, le mobile sera localisable. Si on considère qu'on a trois stations de base désignées par A, B et C, les différences de temps seront

$$t_{A,B} = t_A - t_B \quad (2.2)$$

$$t_{A,C} = t_A - t_C \quad (2.3)$$

$$t_{B,C} = t_B - t_C \quad (2.4)$$

En considérant que les positions des trois stations sont connues à l'avance et sont respectivement  $(x_A, y_A, z_A), (x_B, y_B, z_B), (x_C, y_C, z_C)$  et supposant que  $(x, y, z)$  sont les positions du mobile à localiser, nous obtenons les trois équations des hyperboles  $R_{AB}, R_{BC}, R_{AC}$ :

$$R_{A,B} = \frac{1}{c} \sqrt{(x_A - x)^2 + (y_A - y)^2 + (z_A - z)^2} - \sqrt{(x_B - x)^2 + (y_B - y)^2 + (z_B - z)^2} \quad (2.5)$$

$$R_{A,C} = \frac{1}{c} \sqrt{(x_A - x)^2 + (y_A - y)^2 + (z_A - z)^2} - \sqrt{(x_C - x)^2 + (y_C - y)^2 + (z_C - z)^2} \quad (2.6)$$

$$R_{B,C} = \frac{1}{c} \sqrt{(x_B - x)^2 + (y_B - y)^2 + (z_B - z)^2} - \sqrt{(x_C - x)^2 + (y_C - y)^2 + (z_C - z)^2} \quad (2.7)$$

Donc avec l'utilisation de la technique TDOA, au lieu d'avoir la position comme l'intersection de trois cercles, elle sera l'intersection de trois hyperboles. La figure 2.6 illustre cette technique :

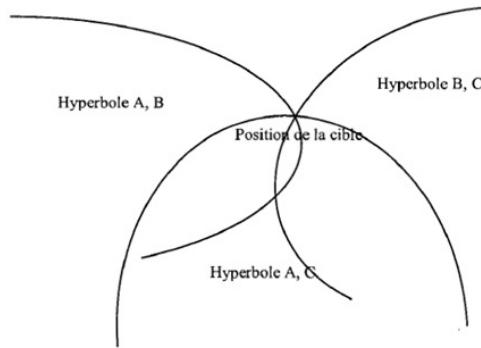


Figure 2.6: Région d'intersection des hyperboles

S'il y a des erreurs, comme pour les techniques précédentes, l'intersection des trois hyperboles ne se résume pas en un point mais elle couvre une zone.

### 2.2.1.5 La phase d'arrivée (POA)

La méthode de la phase d'arrivée [3], ou appelée aussi méthode de phase du signal reçu, utilise la phase de la porteuse pour déterminer la distance. On suppose que toutes les stations de bases émettent des signaux purement sinusoïdaux et qui sont de la même fréquence  $f$ , avec une phase de décalage égale à zéro. Afin de déterminer les phases des signaux reçus en un point de la cible, le signal émis par chaque station de base vers le mobile a besoin d'un temps de transit fini. Par exemple dans la figure ci-dessous, les stations émettrices de A à D sont placées à des emplacements particuliers à l'intérieur d'un cube. Le retard est exprimé comme une fraction de la longueur d'onde du signal et est donné par le terme  $\phi(i) = \frac{2\pi f D_i}{c}$  dans l'équation  $S_i(t) = \sin(2\pi f t + \phi)$  avec  $i \in (A, B, C, D)$  et  $c$  la vitesse de la lumière. Ainsi on peut estimer la distance séparant l'objet à la station  $i$  par l'expression  $D_i = \frac{c\phi(i)}{2\pi f t}$ . Donc, on peut se servir des mêmes algorithmes de positionnement que ceux utilisés avec la technique TOA. De plus, le récepteur peut mesurer la différence de phase entre les différents signaux émis par les stations de base et les systèmes de positionnement sont en mesure d'utiliser des algorithmes utilisant la mesure TDOA afin de localiser une cible.

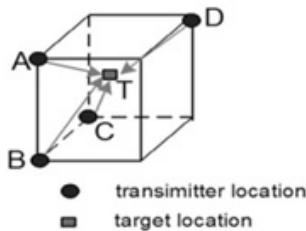


Figure 2.7: Positionnement en utilisant la phase du signal

Pour un système de positionnement indoore, il est possible d'utiliser la méthode POA combinée avec la méthode TOA, TDOA ou RSS pour affiner le positionnement du mobile. Cependant, la méthode POA a beaucoup de problème de précision en l'absence du trajet direct (LOS). Donc, il y aura des erreurs dans un environnement indoore en l'absence de ce dernier.

### 2.2.2 Proximité

Les algorithmes de proximité [5] fournissent des informations relatives de localisations. Généralement, ils s'appliquent dans un réseau dense d'antennes, ayant chacune une position bien connue. Quand un mobile est détecté par une seule station, il est considéré être colocalisé avec elle. Lorsque plus d'une antenne détecte le mobile cible, il est considéré être co-implanté avec celle qui reçoit l'intensité du signal la plus forte. Ce procédé est relativement simple à mettre en oeuvre sur différents types de support physiques. En particulier, les systèmes utilisant un rayonnement infrarouge (IR) et de l'identification par radiofréquence (RFID) sont souvent basés sur cette méthode. Un autre exemple est l'identification de cellule (Cell-ID) ou la méthode de la cellule d'origine (COO). Cette méthode repose sur le fait que les réseaux cellulaires mobiles peuvent identifier la position

approximative d'un téléphone mobile en connaissant le site de cellule que le dispositif utilise à un moment donné.

## 2.3 Synthèse des techniques associées aux paramètres du canal

Le tableau 2.1 résume sur les principales techniques de radiolocalisation.

## Conclusion

Durant ce chapitre, nous avons fait le tour des différentes techniques de radiolocalisation en milieu confiné ou indoor. L'étude comparative montre que certaines techniques de localisation, donne une meilleure qualité, ne peuvent pas s'appliquer dans des systèmes sans la présence du trajet direct. Vu que nous avons choisi de traiter que le cas de la présence d'un trajet direct LOS dans notre projet, donc nous avons choisi d'adopter l'algorithme de trilateration en se basant sur la puissance de signal reçue RSS comme paramètre de calcul de distance combiné avec un système de guidage par infrarouge pour réduire l'incertitude.

## 2.3 Synthèse des techniques associées aux paramètres du canal

---

Table 2.1: Résumé des principales techniques de localisation

Technique de radiolocalisation	Avantages	Inconvénients
Technique basée sur la puissance des signaux reçus (RSS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simple à implémenter</li> <li>- Peu coûteuse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erreur de localisation importante en absence du trajet direct (LOS)</li> <li>- Disponibilité des modèles mathématiques du canal</li> </ul>
Technique basée sur l'angle d'arrivée des signaux reçus (AOA)	<p>Moins de stations de bases pour une localisation en 2D (seulement deux)</p> <p>Algorithme simple à mettre en œuvre</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessité d'avoir le trajet direct (LOS)</li> <li>- Coût d'implantation élevé</li> </ul> <p>Précision faible</p> <p>Erreur importante en milieu diffus (NLOS)</p> <p>Plus complexe à implémenter que RSS</p>
Technique basée sur le temps d'arrivée des signaux reçus (TOA)	<p>Paramètres généralement bien estimés</p> <p>Précision plus élevée en milieu confiné</p>	<p>Synchronisation d'horloge nécessaire entre le mobile et les stations de base</p> <p>Nécessité d'une résolution temporelle élevée au récepteur</p> <p>Complexe à implémenter</p>
Technique basée sur la différence des temps d'arrivée des signaux reçus (TDOA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Paramètres généralement bien estimés</li> <li>Algorithme de positionnement simple</li> <li>Précision plus élevée en milieu confiné</li> <li>Pas besoin de synchronisation d'horloge entre le mobile et les stations de base</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessité d'avoir le trajet direct (LOS)</li> </ul> <p>Synchronisation d'horloge nécessaire entre les paires de stations de base</p> <p>Nécessité d'une résolution temporelle élevée au récepteur</p> <p>Très complexe à implémenter</p>
Technique basée sur les signatures	<p>Implantation facile</p> <p>Prise en compte du profil de propagation</p> <p>Précision généralement plus élevée en milieu confiné</p>	<p>Ne peut être utilisé que dans un espace limité</p> <p>Les performances se dégradent dans un canal non stationnaire</p> <p>Les signatures ne sont pas toujours uniques et répétitives</p>

## CHAPITRE 3

# Etude et conception du système

---

## Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude approfondie des différentes étapes permettant la localisation via trilateration ainsi qu'une étude approfondie sur les différents autres modules du système. C'est au cours de cette phase du projet que nous allons fixer les méthodes et le matériel que nous allons utiliser pour la réalisation du système.

### 3.1 Etude de la localisation

#### 3.1.1 La stratégie du choix des capteurs

Notre stratégie dans le choix des capteurs que nous avons utilisé pour la localisation était la suivante.

Il faut tout d'abord que ces capteurs soient disponibles sur le marché tunisien. En plus, ils doivent être simple dans la manipulation et ne nécessite pas des cartes spécifiques pour leur fonctionnement. Nous n'avons pas à oublier aussi que notre objectif était d'extraire la puissance du signal reçu de chaque paquet échangé entre l'émetteur et le récepteur ce qui a rendu la tâche plus difficile car cette information n'est pas disponible sur tous les émetteur/récepteur RF. Après des recherches approfondies, nous avons pu sélectionner trois types de capteurs qui sont le Wifly RN-171 [6], le Bluetooth HC-05 [7] et l'XBee [8]. Pour pouvoir évaluer les performances de chacun de ces capteurs, une comparaison a été faite. Le tableau 3.1 illustre cette comparaison.

Nous pouvons remarquer à partir de cette comparaison que le HC-05 et le WIFLY RN-171 se ressemblent dans leurs modes de fonctionnement alors que les XBee peuvent communiquer en mode API. Par défaut, tous ces capteurs sont en mode data ce qui leur permet d'envoyer et de recevoir des données via une communication série simple. Pour les configurer, il suffit de leur envoyer des caractères spéciaux pour passer en mode AT et puis modifier le paramètres de la communication sans fil. Lors du fonctionnement en mode API, les XBee communiquent par l'envoi et la réception de paquets et peuvent même envoyer et recevoir des messages de diffusion (broadcast). Lorsque l'émetteur envoi un paquet, il reçoit un accusé de réception ACK indiquant que le paquet a été envoyé avec succès. Si l'émetteur ne reçoit pas un ACK, il renvoie le paquet de nouveau. En plus, ces paquets contiennent des autres informations comme l'adresse de l'émetteur et la puissance du signal reçu que l'on trouve seulement dans l'XBee Série 1. Le type d'antenne était aussi

### 3.1 Etude de la localisation

---

Table 3.1: Etude comparative entre les 3 capteurs disponible sur le marché

Caractéristiques	Wifly RN-171	HC-05	XBEE
Protocole	Wifi	Bluetooth	802.15.4 (Série 1) ZigBee(Série 2)
Mode de fonctionnement	AT Command Mode Data mode	AT Command Mode Data mode	AT Command Mode Data mode API Mode
Consommation d'énergie	Faible	Faible	Faible
Portée Indoor	35 m	10 m	Jusqu'à 100 m (XBee Pro)
Type de liaison	Point-to-point	Point-to-point	Point-to-point peer to peer Point-to-multipoint
Antenne	Chip Whip	PCB	Chip Whip

parmi les critères importants de notre choix car son diagramme de rayonnement affecte d'une manière directe la qualité du signal donc il était préférable de choisir un capteur ayant une antenne omnidirectionnelle pour avoir la même puissance de signal pour une distance fixe et quel que soit la direction de l'émetteur. la figure 3.1 montre le diagramme de rayonnement de l'antenne filaire choisie.

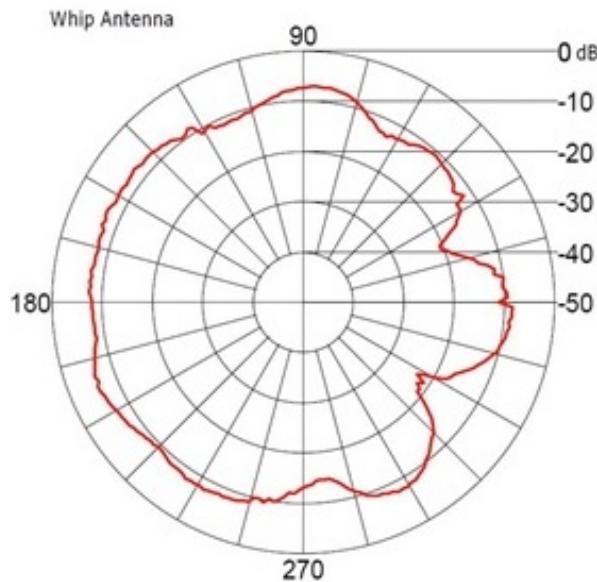


Figure 3.1: Diagramme de rayonnement de l'antenne filaire

L'algorithme de trilateration que nous voulons implémenter dans notre robot pour la localisation nécessite le calcul de trois distances différentes au minimum. Vu que ces distances dépendent directement des puissances des signaux des données échangées, donc le choix des XBee série 1 à antenne filaire comme dispositif de transmission-réception

entre les différents noeuds va nous faciliter la tâche car ce sont les seuls qui permettent l'extraction et l'identification de la puissance du signal de chaque paquet de données reçu.

### 3.1.2 Caractérisation du canal de propagation RF

En se basant sur [9], la relation entre la puissance émise, la puissance reçue des signaux sans fil et la distance entre les deux noeuds est décrite par l'équation 3.2. Avec  $P_r$  est la puissance reçue des signaux sans fil,  $P_t$  est la puissance émise,  $d$  est la distance entre l'émetteur et le récepteur et  $n$  est le facteur de transmission qui dépend de l'environnement.

$$P_r = P_t \left(\frac{1}{d}\right)^n \quad (3.1)$$

Si nous faisons 10 fois le logarithme de part et d'autre de 3.2., nous obtenons l'équation 3.1

$$10 \log(P_r) = 10 \log(P_t) - 10n \log(d) \quad (3.2)$$

$P_t$ , la puissance d'émission est déjà connue d'avance et  $10 \log P$  est l'expression de la puissance en dBm d'où l'équation 3.1 peut être décrite par l'équation 3.3

$$P_r(dBm) = A - 10n \log d \quad (3.3)$$

Les valeurs des paramètres  $A$  et  $n$  déterminent la relation entre la puissance du signal reçu et la distance. Actuellement, il existe plusieurs modèles de propagation de la puissance du signal dans les réseaux sans fil. Parmi ces modèles, nous citons le free-space model, le ground bidirectional reflectance model et le log normal shadow model. Le free-space-model n'est applicable que si les conditions suivantes sont vérifiées : Il faut tout d'abord que la distance de transmission est beaucoup plus grande que la taille de l'antenne et la longueur d'onde et qu'il n'existe pas d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur. La puissance reçue du signal d'un noeud située à une distance  $d$  d'un autre noeud pour ce modèle peut être exprimé par les équations 3.4 et 3.5

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda}{4\pi^2 d^2 L^2} \quad (3.4)$$

$$PL(dB) = 10 \log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = -10 \log\left(\frac{\lambda^2}{4\pi^2 d^2}\right) \quad (3.5)$$

Dans 3.4,  $G_t$  et  $G_r$  sont les gains des antennes d'émission et de réception,  $L$  est le facteur Loss f du système et qui n'intervient pas dans la transmission. Généralement, nous prenons  $G_t=G_r=L=1$ .

L'équation 3.5 est la formule de l'atténuation du signal en utilisant une expression logarithmique. Pour le modèle Surface Bidirectional Reflectance, nous ne pouvons l'appliquer que lorsque la distance de transmission est de quelques kilomètres ou plus et la longueur des antennes de l'émetteur et du récepteur est de 50m ou plus. Ce modèle est très précis lorsqu'il est appliqué en milieu urbain. La puissance reçue est déterminée par les équations 3.6 et 3.7

$$P_r(dB) = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (3.6)$$

$$PL(dB) = 40 \log d - 10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r \quad (3.7)$$

$h_t$  et  $h_r$  sont les longueurs des antennes de l'émetteur et du récepteur.

le modèle Log-normal Shadowing est le modèle le plus général. Il est adapté à la fois pour les environnements Indoor et Outdoor. En plus, ce modèle fournit des paramètres qui peuvent être configurées en fonction de l'environnement. La formule de calcul de ce modèle est indiquée par l'équation 3.8.

$$PL(d)(dB) = PL(d) + X_\gamma = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3.8)$$

Le paramètre  $d_0$  est la distance de référence near-earth, le paramètre  $n$  est le facteur path loss qui varie selon l'environnement et devient plus grand lorsqu'il y a des obstacles entre l'émetteur et le récepteur.  $X_\sigma$  est une variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle. Ces paramètres décrivent le modèle de propagation des signaux sans fil dans n'importe quel environnement.

Parmi ces trois modèles que nous avons décrits, nous avons adopté le modèle Log-Norma-Shadow car il est universel et peut être configuré selon environnement.

### 3.1.3 Localisation par trilateration

Une fois nous avons déterminé l'équation mathématique qui relie la puissance du signal reçu à la distance  $d_1$  qui sépare l'émetteur du récepteur, nous refaisons le calcul pour les autres distances  $d_2$  et  $d_3$ . Ainsi, nous pouvons appliquer l'algorithme de trilateration décrit déjà dans le chapitre précédent.

#### 3.1.3.1 Méthode classique

Vu que les positions des stations fixes sont connues d'avance et représentées par  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  et  $(x_3, y_3)$ , la position  $(x, y)$  du robot peut être déterminé en résolvant les équations suivantes :

$$\begin{cases} d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = x^2 - 2x_1x + x_1^2 + y^2 - 2y_1y + y_1^2 \\ d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = x^2 - 2x_2x + x_2^2 + y^2 - 2y_2y + y_2^2 \\ d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = x^2 - 2x_3x + x_3^2 + y^2 - 2y_3y + y_3^2 \end{cases} \quad (3.9)$$

Une itération du pivot de Gauss donne :

$$\begin{cases} d_2^2 - d_1^2 - (y_2^2 + x_2^2 - y_1^2 - x_1^2) = 2(x_1 - x_2)x + 2(y_1 - y_2)y \\ d_3^2 - d_1^2 - (y_3^2 + x_3^2 - y_1^2 - x_1^2) = 2(x_1 - x_3)x + 2(y_1 - y_3)y \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} c_1 = a_1x + b_1y \\ c_2 = a_2x + b_2y \end{cases}$$

### 3.1 Etude de la localisation

---

Ce qui donne par la méthode de Cramer :

$$x = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} \text{ et } y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}$$

(3.10)

Pour pouvoir tester les résultats de cet algorithme, un script a été réalisé sur Matlab permettant la résolution des équations 3.10 à partir des positions des stations fixes  $(x_i, y_i)$  et des distances  $d_1, d_2$  et  $d_3$ . Le résultat de ce calcul est illustré par la figure 3.2

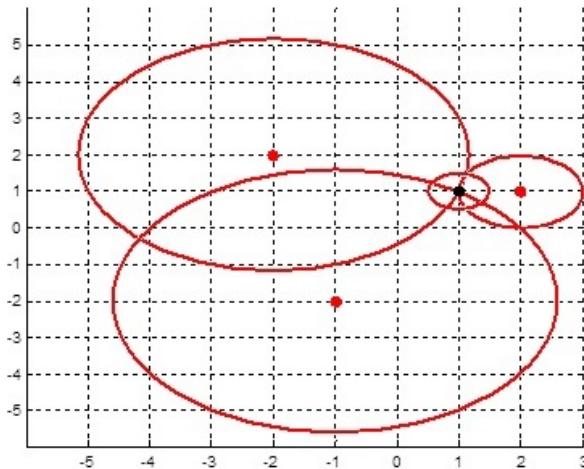


Figure 3.2: Détermination de la position par trilateration

#### 3.1.3.2 Méthode optimisée

En positionnant le premier noeud fixe au point  $M1(0, 0)$ , le deuxième en  $M2 = (0, a)$  et le troisième en  $M3 = (b, 0)$  et en posant  $d_i$  la distance du robot (au point  $(x, y)$ ) par rapport au noeud  $M_i$ , nous aurons le système suivant :

$$x^2 + y^2 = d_1^2 \quad (3.11)$$

$$x^2 + (y - a)^2 = d_2^2 \quad (3.12)$$

$$(x - b)^2 + y^2 = d_3^2 \quad (3.13)$$

Ce qui nous permet d'obtenir les coordonnées 3.14 et 3.15 :

$$x = \frac{b^2 + d_1^2 - d_3^2}{2b} \quad (3.14)$$

$$y = \frac{a^2 + d_1^2 - d_2^2}{2a} \quad (3.15)$$

Nous pouvons remarquer qu'en utilisant cette méthode, nous avons limité le calcul de x et y à deux distances au lieu de trois comme dans l'équation 3.14 et 3.15 ce qui va nous permettre de réduire l'incertitude.

## 3.2 Détermination de l'orientation du robot

Une fois la position du robot est déterminée, nous devons alors savoir l'orientation actuelle du robot pour pouvoir calculer l'angle de rotation que le robot doit effectuer pour pouvoir s'orienter vers la station de recharge qui a la position (0, 0).

Soit  $M_1$  la position du robot à l'instant  $t$  et  $M_2$  la position à l'instant  $t + \Delta t$ .

La direction du déplacement actuel est  $\vec{M_1 M_2} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$ .

La direction du déplacement souhaité est  $\vec{M_2 O} = (-x_2, -y_2)$ .

L'angle de rotation est déterminé par :

$$\cos(\theta) = \frac{\vec{M_1 M_2} \cdot \vec{M_2 O}}{|\vec{M_1 M_2}| |\vec{M_2 O}|} = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 - (x_2^2 + y_2^2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \times \sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \quad (3.16)$$

Le signe de  $\sin(\theta)$  est le même que celui de  $\theta$  et est le même que le signe de

$$\text{Det}(\vec{M_1 M_2}, \vec{M_2 O}) = -y_2(x_2 - x_1) + x_2(y_2 - y_1) = x_1 y_2 - x_2 y_1$$

Si ce déterminant est nul, i.e l'angle est soit 0, soit  $\pi = 180$  degré.

Analytiquement :

$$\theta = \pm \arccos\left(\frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 - (x_2^2 + y_2^2)}{\sqrt{((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2) \times (x_2^2 + y_2^2)}}\right) \quad (3.17)$$

Avec un signe qui est le même que celui de  $x_1 y_2 - x_2 y_1$ . Pour que le robot puisse effectuer cette rotation, nous avons eu l'idée d'ajouter des encodeurs pour les moteurs arrières qui vont nous permettre de déterminer le sens et la vitesse de rotation de chacune de ces roues et d'où obtenir les équations 3.18 et 3.19

$$V = \frac{V_g + V_d}{2} = \frac{1}{2} R(\omega_g + \omega_d) \quad (3.18)$$

$$\omega = \frac{V_g + V_d}{D} = \frac{1}{2} R(\omega_g - \omega_d) \quad (3.19)$$

Avec R est le rayon des roues du robot, Vg et Vd sont les vitesses linéaires des roues du robot, g et d sont les vitesses angulaires des roues du robot, V et  $\omega$  sont respectivement les vitesses linéaires et angulaires dans le plan horizontale.

Soit  $p = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ \phi = 0 \end{pmatrix}$ , la position du robot à la position  $M_2$ . Donc pour orienter le robot,

il suffit de faire tourner les roues du robot dans le bon sens (suivant le signe de  $\theta$ ) et vérifier

### 3.2 Détermination de l'orientation du robot

---

à chaque fois la nouvelle position jusqu'à atteindre l'angle  $\theta$ . Pour pouvoir calculer cette nouvelle position, nous avons eu recours aux équations suivantes 3.20,3.21,3.22, 3.23:

$$\Delta x = \Delta s \cdot \cos(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}) \quad (3.20)$$

$$\Delta y = \Delta s \cdot \sin(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}) \quad (3.21)$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta s_d - \Delta s_g}{b} \quad (3.22)$$

$$\Delta s = \frac{\Delta s_d - \Delta s_g}{2} \quad (3.23)$$

Avec  $\Delta s_g$  et  $\Delta s_d$  sont respectivement les déplacements effectués par la roue gauche et la roue droite, b est la distance entre la roue gauche et droite. Ainsi, nous pouvons obtenir la nouvelle position p' :

$$p' = f(x, y, \Delta s_d, \Delta s_g) = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ \phi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\Delta s_d + \Delta s_g}{2} \cdot \cos(\phi + \frac{\Delta s_d - \Delta s_g}{2b}) \\ \frac{\Delta s_d + \Delta s_g}{2} \cdot \sin(\phi + \frac{\Delta s_d - \Delta s_g}{2b}) \\ \frac{\Delta s_d - \Delta s_g}{b} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Donc le robot continue à tourner jusqu'à ce que  $\phi = \theta$

La figure 3.3 résume l'orientation du robot vers la station de recharge.

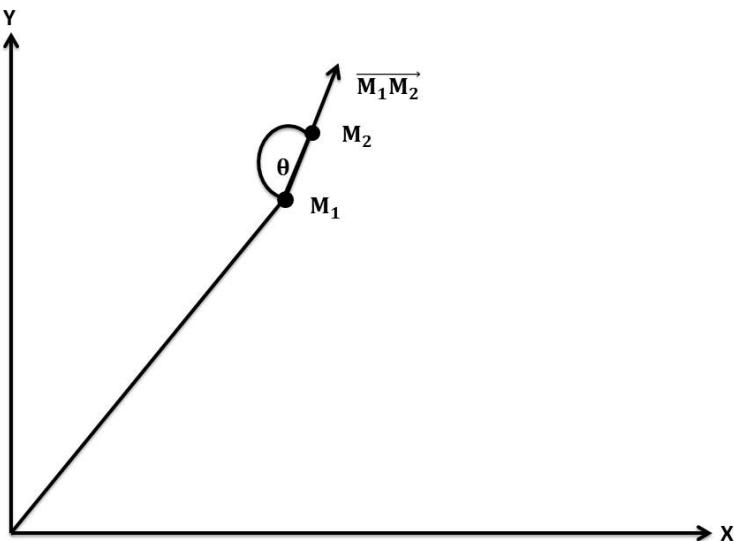


Figure 3.3: Orientation du robot vers la station de recharge

### 3.3 Choix des cartes de développement

Généralement, les cartes embarquées existant sur le marché possèdent au moins un port série ce qui est indispensable pour le fonctionnement des XBee. Parmi ces cartes populaires nous citons Arduino, STM 32 et PIC, etc. En plus, notre choix s'est basé aussi sur le nombre d'entrée /sortie de la carte et la simplicité au niveau de la programmation. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser dans notre projet une carte Arduino Mega qui est indiquée par la Figure 3.4.a au niveau du robot et une carte STM 32 Nucléo indiquée par la figure 3.4.b au niveau de la station de recharge. Ces cartes embarquées sont aussi compatibles avec des cartes d'extension appelé Shield (figure 3.4.c) dédiée aux modules XBee qui ajoutent des leds, un convertisseur 3,3 volts et des cavaliers de configuration permettant de conserver la liaison USB-série utilisé lors du téléchargement du programme dans la carte.



(a) Arduino Mega 2560

(b) STM Nucleo

(c) Shield XBee0

Figure 3.4: Cartes de développement utilisées

Le tableau 3.2 illustre les principales caractéristiques des cartes Arduino Mega et STM NUCLEO

Table 3.2: Caractéristiques de l'Arduino Mega et de l'STM NUCLEO

Caractéristiques	Arduino Mega	STM 32 NUCLEO
Microcontrôleur	ATmega2560	ARM-32 Bit-Cortex
Tension de fonctionnement	5 V	5 V
Vitesse de l'horloge	16 MHz	26Mhz (Configurable)
Mémoire Flash	256 KB	512 KB
SRAM	8 KB	96 KB
Nombre de GPIO	86	50
Nombre des ports série (UART)	4	3
Nombre des ADC	16	16

Pour les autres stations fixes, nous avons choisi les Arduino Fio indiqué par la figure

### 3.4 Guidage par balise infrarouge

---

3.5 car elles sont de tailles réduites. En plus, cette carte est conçue pour interfaçer avec un module XBee. Elle est basée sur le microcontrôleur ATmega328P et elle contient 14 pins d'entrée / sortie, 8 entrées analogiques et une horloge de vitesse 8 MHz. Sa tension d'alimentation est 3.7 V et elle peut être alimentée soit via un câble USB soit par une batterie Lithium Polymère 3.7 V indiquée par la figure 3.6 vu qu'elle contient un connecteur JST. La recharge de la batterie peut être effectuée par la carte Arduino Fio via un câble USB vu qu'elle contient un circuit de recharge. Donc, cette carte sera très pratique au niveau des stations fixes.



Figure 3.5: Arduino Fio



Figure 3.6: Batterie Polymère

## 3.4 Guidage par balise infrarouge

Vu que la précision dans notre système de localisation est estimée à 1m. Nous avons décidé d'ajouter un système d'auto correction basé sur le guidage par balise infrarouge. Lorsque le robot entre dans la zone de couverture des capteurs infrarouge, il va vérifier s'il est dans la bonne de direction ou pas. S'il n'est pas en train de recevoir un signal infrarouge, il tourne soit à droite soit à gauche pour rectifier sa trajectoire vers la station de recharge. Pour que le robot puisse effectuer cette opération, nous avons réalisé un circuit d'émission infrarouge que nous avons placé dans la station de recharge et un circuit de réception que nous avons placé sur le robot.

### 3.4.1 Circuit de réception infrarouge

Pour la réception infrarouge, nous avons utilisé le TSOP 1838 [10] représenté par la figure 3.7. Ce capteur permet de recevoir des signaux modulé à une fréquence de l'ordre de 38 kHz. Il est fréquemment utilisé dans les téléviseurs, les baladeurs CD, etc. pour recevoir des signaux de commande. Lorsqu'il est au repos, la sortie de ce capteur est toujours à l'état haut. Parmi les principales caractéristiques du TSOP1838 c'est qu'il ne reçoit pas des signaux continus même s'ils sont modulés à 38kHz.

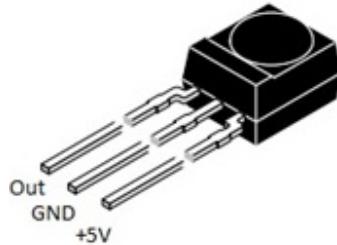


Figure 3.7: Récepteur infrarouge TSOP1838

Vu que notre objectif était de détecter juste la présence du signal infrarouge et non pas de recevoir des informations à travers cette liaison, nous avons eu recours au circuit NE555 [11] que nous avons utilisé en mode monostable et qui nous a permis d'engendrer une impulsion suite à l'application d'un front descendant à l'entrée du circuit (TRIG). La durée de cette impulsion est donnée par l'équation 3.25 :

$$T = 1.1 * R * C \quad (3.25)$$

Les formes d'ondes des signaux d'entrée/sortie ainsi que la configuration du circuit NE555 en mode monostable sont représentées par les figures 3.8 et 3.9

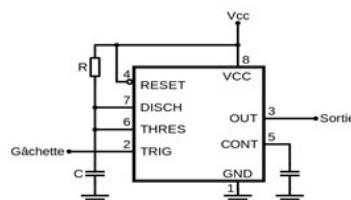


Figure 3.8: Configuration du NE555 en mode monostable

### 3.4 Guidage par balise infrarouge

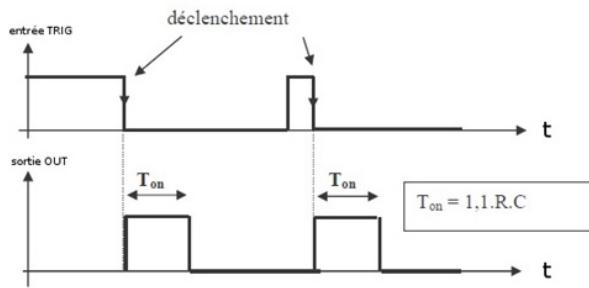


Figure 3.9: Forme d'onde des signaux d'entrée/Sortie

Pour rendre ce signal monostable redéclenchant, il suffit de relier le pin 4 du RE-SET à l'entrée TRIG ce qui permet de réinitialiser le timer à chaque impulsion d'entrée même si l'impulsion précédente n'est pas terminée. Le signal de sortie généré lors du fonctionnement du circuit dans ce mode est représenté par la 3.10.

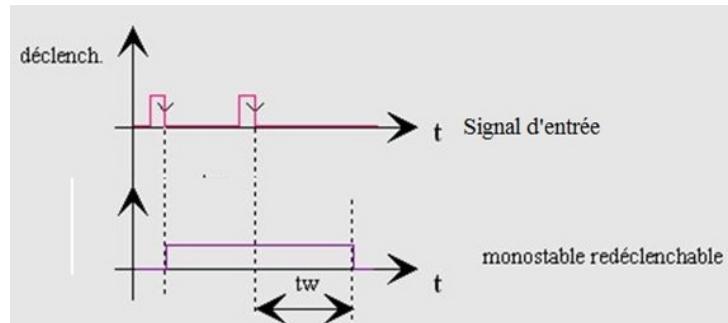


Figure 3.10: Forme d'onde du signal de sortie

D'où L'utilisation de ce montage nous a permis d'obtenir une sortie stable. Lors de la réception d'un signal infrarouge, la sortie passe à l'état haut. Le schéma électrique du circuit de réception infrarouge est représenté par la figure 3.11.

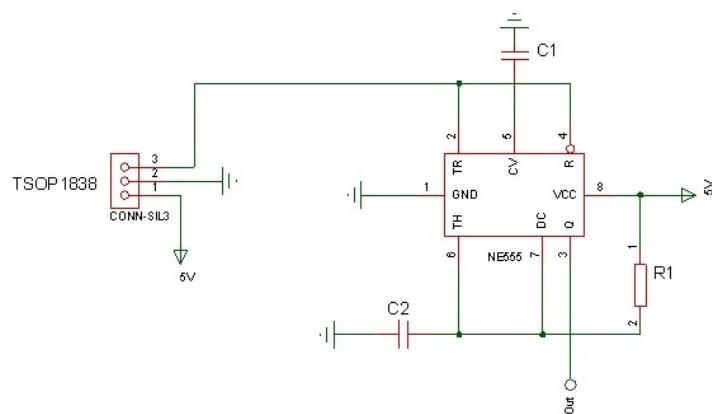


Figure 3.11: Circuit électrique de la réception infrarouge

### 3.4.2 Circuit d'émission infrarouge

Le circuit d'émission d'infrarouge est basé sur le circuit NE556 qui a le même principe de fonctionnement que le circuit NE555. Ce qui diffère du montage de réception, c'est que nous l'avons utilisé cette fois en mode astable pour générer deux signaux oscillatoires. Sa configuration ainsi que les formes d'onde du signal de sortie sont représentées par les deux figures ci-dessous. Le signal à émettre à une fréquence de l'ordre de 1Hz. Cette fréquence ainsi que le rapport cyclique  $\alpha$  ont été obtenu grâce aux résistances R1 et R2 et à la capacité C1 qui ont des valeurs bien spécifiques. Ces valeurs étaient calculées par la formule 3.26 et la formule 3.27 .

$$f = 1.44(R_a + 2R_b)C \quad (3.26)$$

$$\alpha = 1 - \frac{R_b}{R_a + 2R_b} \quad (3.27)$$

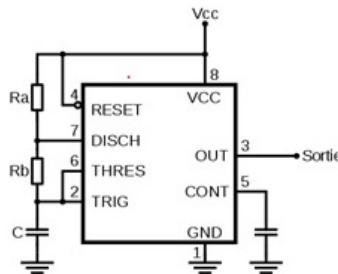


Figure 3.12: Configuration en mode astable

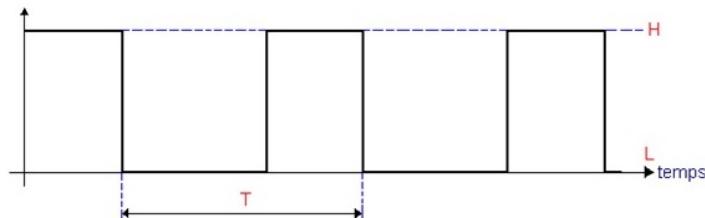


Figure 3.13: Forme d'onde du signal de sortie en mode astable

En appliquant ces deux formules, nous obtenons les valeurs suivantes  $R_1 = 10K$ ,  $R_2$  est une ajustable de l'ordre de  $100K$  et  $C = 10\mu F$ . Pour le deuxième signal qui est le signal modulant, nous avons utilisé deux résistances variables pour ajuster grossièrement puis finement la fréquence sur  $38$  KHz environ. La première ajustable est de l'ordre de  $100$  K et la deuxième est de l'ordre de  $10$  K. Ces deux signaux sont les entrées du circuit 7408 [12] qui réalise la fonction ET logique. A la sortie de circuit, nous avons placé un transistor BC338 qui commande quartes Leds infrarouge qui à leur rôle émettent le signal modulé. La figure 3.14 illustre le schéma électrique du circuit d'émission.

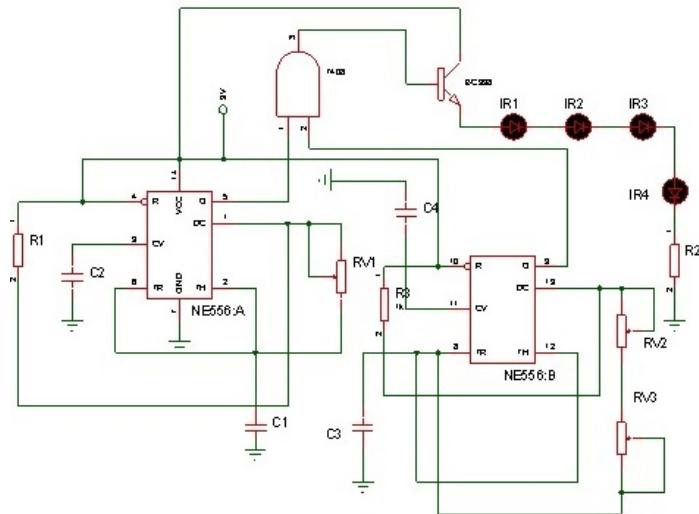


Figure 3.14: Circuit d'émission infrarouge

## 3.5 Evitement d'obstacle

Lorsque le robot est en train d'effectuer une tâche ou bien en route vers la station de recharge et détecte un obstacle à une distance de 50 cm , il doit l'éviter puis continuer son chemin. La détection classique des obstacles est souvent assurée soit par des capteurs infrarouges ou bien des capteurs ultrasons. Vu que nous avons déjà utilisé des capteurs infrarouges pour le guidage du robot, donc pour éviter les interférences qui peuvent se produire entre ces deux modules, nous avons décidé d'utiliser des capteurs ultrasons pour la détection des obstacles.

### 3.5.0.1 Principe de fonctionnement du capteur ultrason HY-SRF05

Le détecteur d'obstacle ultrason HY-SRF05 [13] représenté par la figure 3.15 envoi une onde acoustique dont la fréquence est trop élevée pour être audible par l'être humain. Il peut détecter des objets jusqu'à plusieurs mètres. L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier.



Figure 3.15: Détecteur d'obstacle ultrason SRF-05

L'émetteur envoie un train d'ondes qui va se réfléchir sur l'objet à détecter et ensuite

### 3.5 Evitement d'obstacle

---

revenir à la source. Le temps mis pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source. Plus l'objet sera loin plus il faudra longtemps pour que le signal revienne. La figure 3.16 décrit le diagramme de temps du HY-SRF05

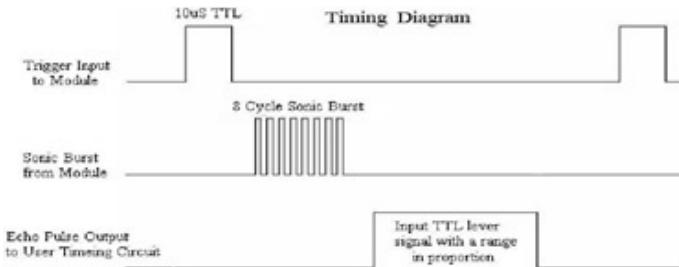


Figure 3.16: Chronogramme de fonctionnement du capteur ultrason HY-SRF05

Les caractéristiques principales du détecteur d'obstacle ultrason HY-SRF05 sont résumées dans le tableau 3.3:

Table 3.3: Caractéristiques du capteur HY-SRF05

Alimentation	5V DC
Courant de repos	<2mA
Angle de mesure	<15°
Gamme de distance	2cm – 400cm
Résolution	0.3 cm

#### 3.5.0.2 Stratégie de l'évitement d'obstacle

Généralement, dans les systèmes robotisés nous plaçons trois capteurs ultrason situés côte à côte à l'avant du robot pour détecter et éviter les obstacles vu que son angle de mesure est faible ce qui permet d'élargir le champ de vision du robot et de le faire tourner le robot du bon côté. Un exemple de ce genre de robot est représenté par la figure 3.17

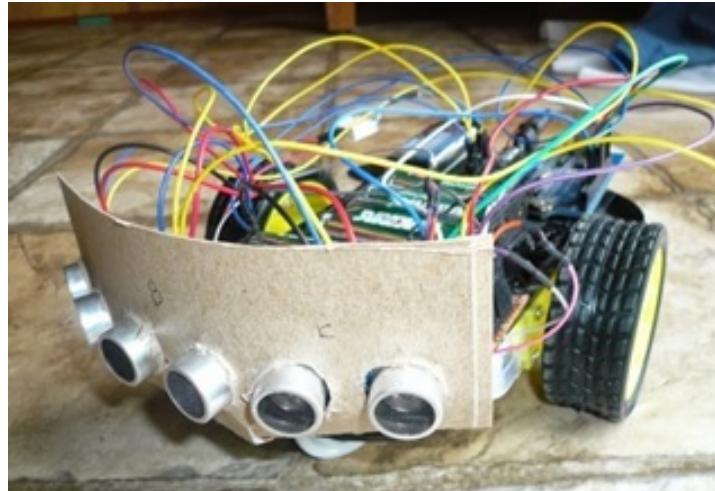


Figure 3.17: Robot éviteur d'obstacle

Cette méthode classique coutre un peu cher vu qu'elle nécessite trois capteurs. En plus, l'utilisation de trois capteurs encombre le robot et préoccupe un nombre important de pins d'entrée / sortie au niveau du microcontrôleur. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser un seul capteur que nous placerons au milieu du robot et que nous attachons par l'intermédiaire d'un support à un servomoteur ce qui permet au capteur de pivoter à droite et à gauche et de vérifier la présence des obstacles. L'organigramme du déplacement du robot lors de la détection d'obstacle est représenté par la figure 3.18

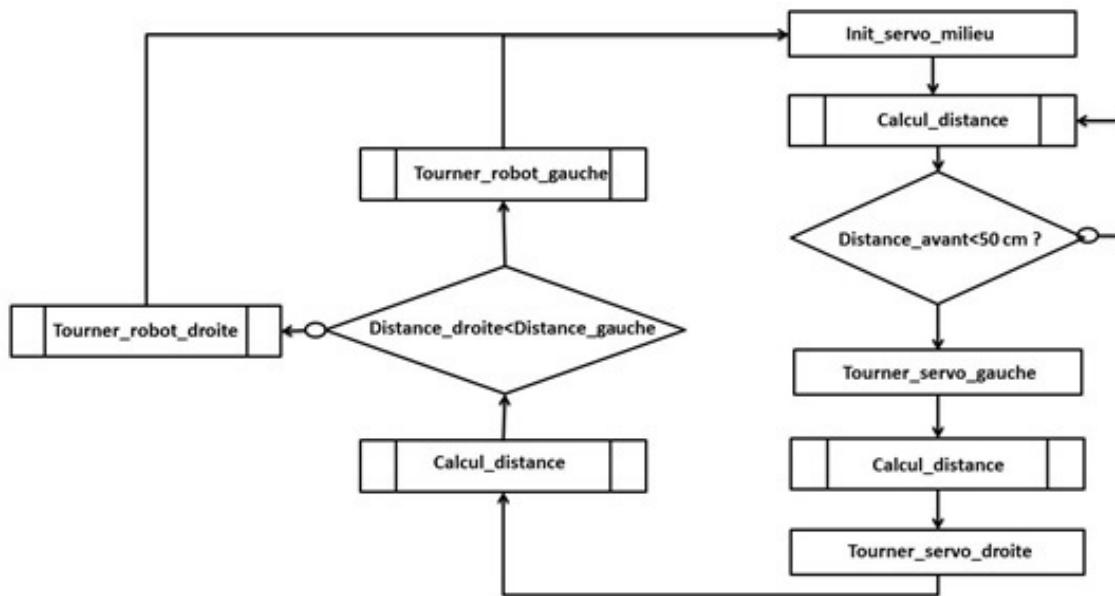


Figure 3.18: Organigramme d'évitement d'obstacle

## 3.6 Etude de l'autonomie du système

### 3.6.1 Caractéristiques de la batterie du robot

La batterie représentée par la figure 3.19 que nous avons utilisée dans notre robot est de type Lithium Ion rechargeable et de tension nominale 14.8 V. Sa tension maximale est 16.8V et sa tension de coupure est de l'ordre de 11V. Sa capacité nominale est de l'ordre de 5200 mAh. Parmi les principales caractéristiques des batteries Lithium c'est qu'ils ont une faible auto-recharge. En plus, ils ne nécessitent pas de maintenance. En comparant ces batteries par rapport aux autres, nous trouvons qu'elles possèdent une haute densité d'énergie pour un poids faible. C'est pour cela qu'elles sont utilisées souvent dans les systèmes embarqués.



Figure 3.19: Batterie Lithium-Ion rechargeable 14.8V

### 3.6.2 Indication des niveaux des batteries du système

Le niveau de charge du robot est toujours affiché sur un LCD attaché au robot. Pour pouvoir effectuer cette tâche, nous avons eu recours à l'utilisation d'un pont diviseur de tension vu que la tension maximale de la batterie est de l'ordre de 16.8V alors que la tension maximale supportée par l'ADC du microcontrôleur est de 5V. Si  $R_1$  est de l'ordre de  $1K$ , en utilisant l'équation 3.28, nous obtenons  $R_2 = 424$ . Donc, nous prenons  $R_2 = 390$

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (3.28)$$

Pour protéger l'ADC de la carte des courts circuits, nous avons ajouté un pont de diode ainsi qu'une diode zener 4.9V. Le montage électrique permettant de mesurer à chaque fois la tension de la batterie est représenté par la figure 3.20.

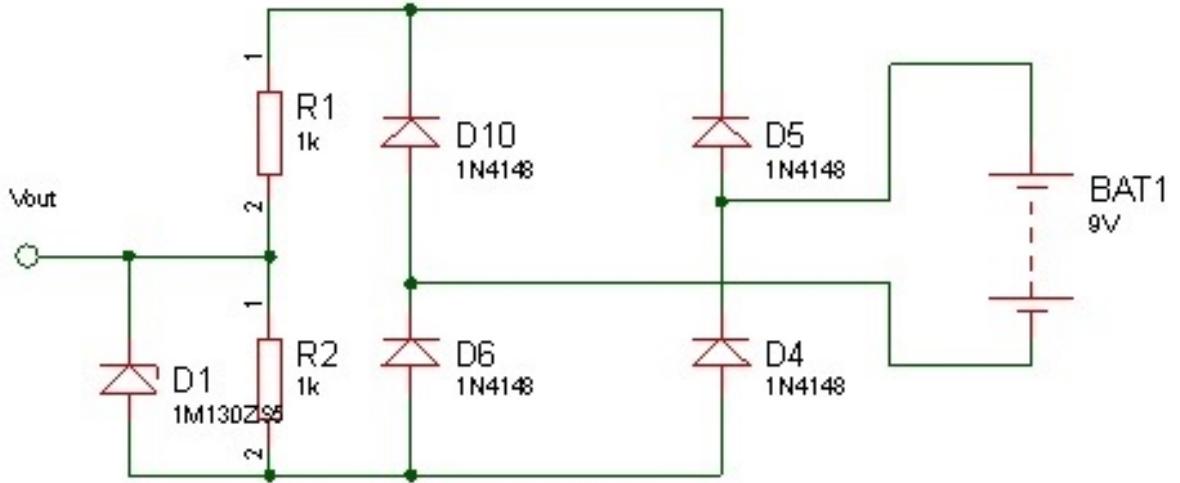


Figure 3.20: Schéma électrique d'un pont diviseur de tension

Vu que lorsque le robot est attaché à la station de recharge, la carte Arduino est hors tension, donc pour détecter la recharge complète de la batterie, nous avons utilisé le même montage mais cette fois la sortie du pont diviseur est reliée à l'entrée d'un comparateur configuré pour changer d'état lorsque la batterie est complètement rechargée. Ce montage est représenté par la figure 3.21

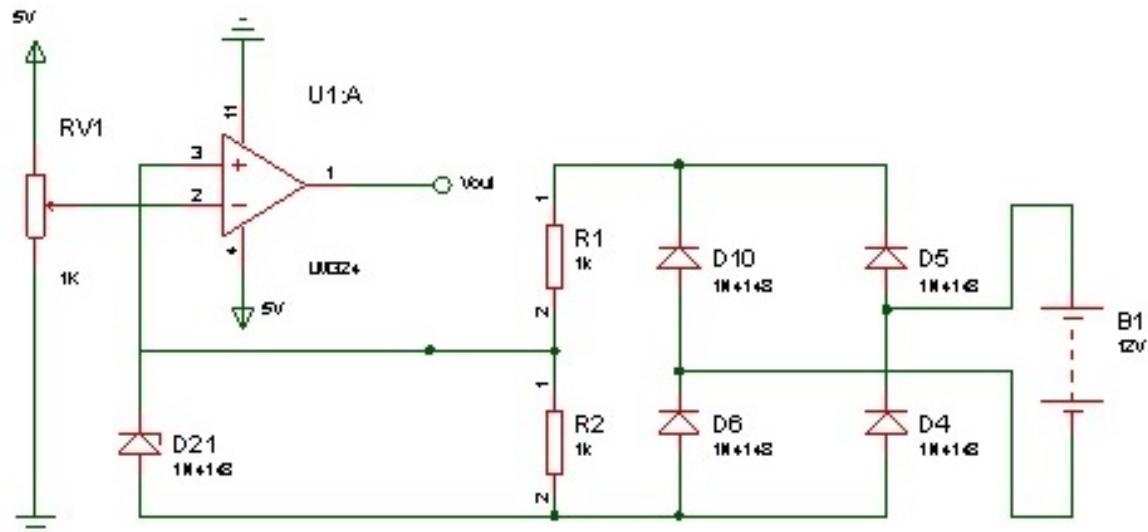


Figure 3.21: Schéma électrique d'un pont diviseur de tension

Pour les batteries des stations fixes, nous avons utilisé le même montage que celui

indiqué par la figure 3.21 sauf que nous avons ajouté une diode LED à la sortie du comparateur qui s'allume lorsque le niveau des batteries de ces stations est faible.

## 3.7 Conception mécanique

Dans ce projet, nous avons utilisé une plateforme de robot classique conçu pour l'essai de ce type d'application. Cette plateforme est composée d'un châssis, de quatre moteurs DC et de quatre roues. Des modifications ont été faites sur cette plateforme pour l'adopter aux besoins de notre projet.

### 3.7.1 Support Ultrason

Le support que nous avons conçu est en forme L permettant ainsi sa fixation d'une part au servomoteur et d'autre part au capteur ultrason. La figure 3.22 représente une vue 3D du capteur ultrason.

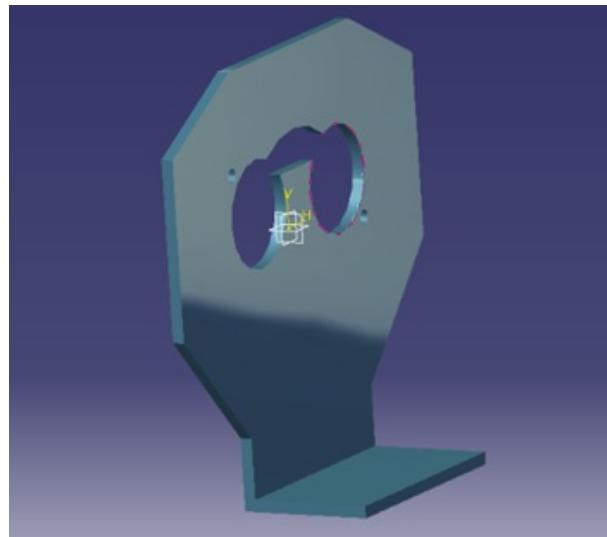


Figure 3.22: Support Ultrason

### 3.7.2 Station de recharge

La représentation 3D de cette station de recharge est indiquée par la figure 3.23

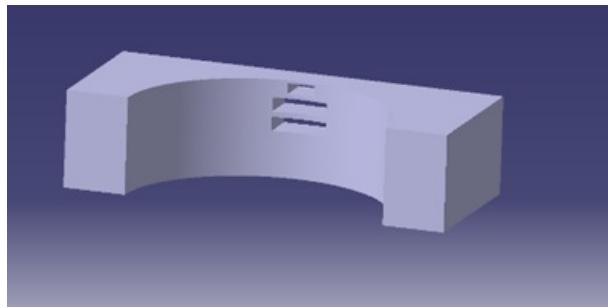


Figure 3.23: Station de recharge

La forme circulaire de la station de recharge facilite le positionnement du robot lors de l'opération de recharge.

### 3.7.3 Système de guidage

La représentation 3D du pare choc du robot est indiquée par la figure 3.24

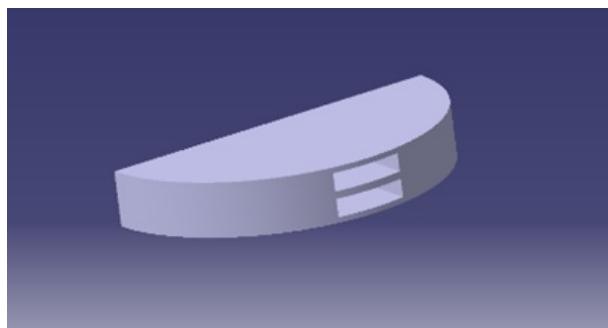
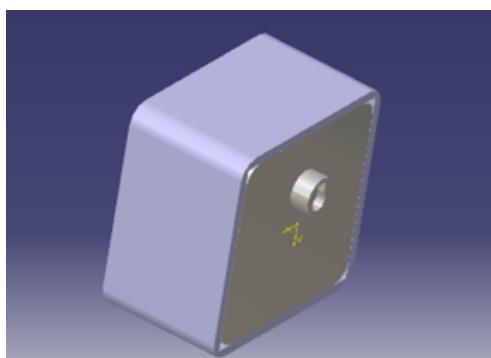


Figure 3.24: Pare choc robot

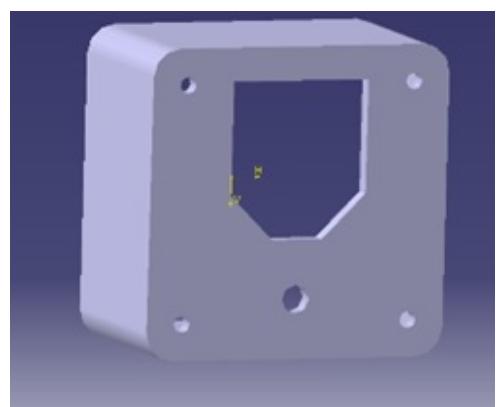
Cette pièce a la même courbure que la station de recharge permettant ainsi au robot de s'assembler à la station et de commencer l'opération de recharge.

### 3.7.4 Boitiers des stations fixes

La figure 3.25 indique le modèle de boîtier que nous avons conçu pour les deux autres stations fixes.



(a) Boitier de station fixe



(b) Couvercle de station fixe

Figure 3.25: Boitier de station fixe

## Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté une étude détaillée sur la localisation par trilateration, ainsi que les méthodes et les stratégies que nous avons fixé pour assurer le fonctionnement des autres modules du système.

# CHAPITRE 4

# Réalisation

---

## Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons décrit les différents études et approches théoriques sur lesquelles nous nous sommes basés pour pouvoir bien dimensionner notre système. Dans ce chapitre nous allons voir les différents tests et essais réalisés lors de la phase du prototypage de notre système et interpréter les résultats obtenus.

### 4.1 Implémentation de l'algorithme de localisation

Dans cette partie, nous allons décrire les différentes étapes que nous avons effectuées pour pouvoir implémenter le système de localisation proposé dans le deuxième chapitre sur le robot.

#### 4.1.1 Configuration des capteurs

La configuration des XBee a été faite par le XBee Explorer USB ( 4.1) qui assure une liaison série entre le PC et l'XBee par l'intermédiaire du logiciel X-CTU (4.2) fourni par le constructeur qui est DIGI International. A travers cette configuration, nous avons pu mettre nos émetteur / récepteur en mode API, modifier leurs adresses de destination et contrôler leurs puissances d'émission (seulement pour les XBee Pro). Nous avons aussi configuré l'émetteur en tant que coordinateur et les récepteurs en tant que End device.



Figure 4.1: XBee explorer

## 4.1 Implémentation de l'algorithme de localisation

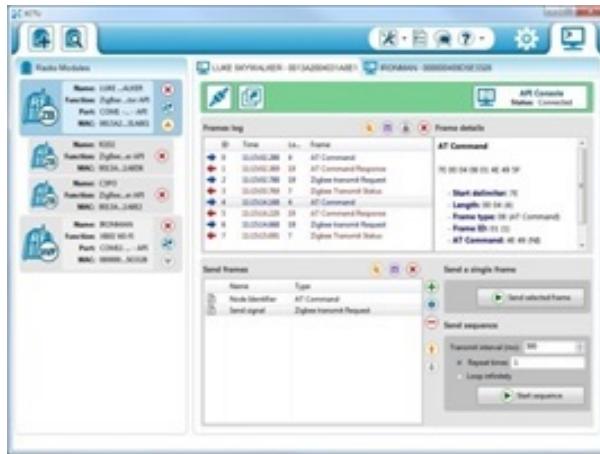


Figure 4.2: Interface X-CTU

### 4.1.2 Détermination des paramètres du canal de propagation

Pour pouvoir calculer la distance qui sépare un capteur d'un autre capteur, nous devons déterminer les paramètres de notre modèle mathématique déjà décrit dans le chapitre précédent

#### 4.1.2.1 Protocole de test

Le récepteur était fixé sur le point de coordonnées (0,0) à 30 cm de hauteur par rapport au sol et nous avons déplacé l'émetteur suivant l'axe y avec un pas de 1m et en gardant la même hauteur du récepteur. La prise de mesure était de la manière suivante : L'émetteur envoie un paquet toutes les 100 ms jusqu'à atteindre 100 paquets. En contrepartie, le récepteur extrait la puissance du signal de chaque paquet reçu et l'affiche dans une courbe en fonction du temps et calcule la moyenne des ces puissances au fur et à mesure. Cette méthode nous a permis de gagner beaucoup de temps et garder des traces de toutes les mesures effectuées. La figure 4.3 montre un exemple de mesure effectuée à 1m du récepteur.

## 4.1 Implémentation de l'algorithme de localisation

---

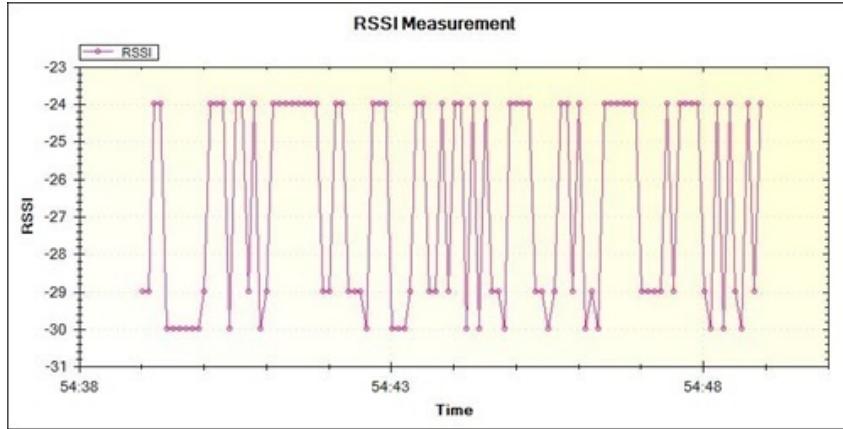


Figure 4.3: Mesure à 1m du récepteur

### 4.1.2.2 Résultats et interprétations

#### Essai avec XBee Pro

Lors du premier essai avec un XBee Pro, nous n'avons pas modifié la puissance d'émission qui était par défaut 18 dBm (maximal) et nous avons obtenu les résultats suivants :

Table 4.1: Variation de la puissance du signal en fonction de la distance  $P_t = 18dBm$

Distance (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PL (dB)	55	55	55	55	55	55	55.3	57.25	63.5	78.4	78.9

Ces valeurs nous ont permis d'obtenir la courbe 4.4 :

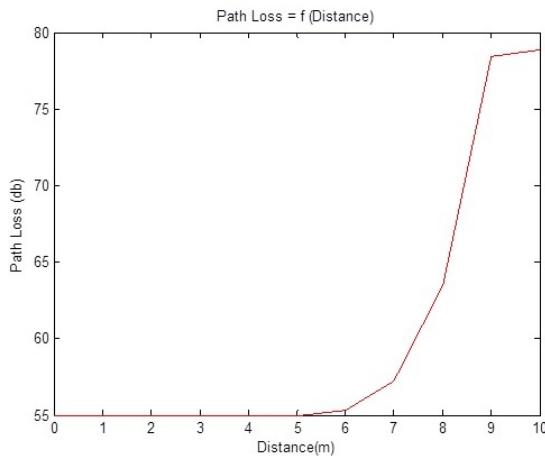


Figure 4.4: Evolution du Path Loss en fonction de la distance ( $P_t=18dBm$ )

Nous pouvons remarquer dans cette courbe que la puissance d'émission n'a pas changé qu'à partir de 5 m et que la diminution de la puissance d'émission n'était pas logarithmique

#### 4.1 Implémentation de l'algorithme de localisation

---

et c'est dû à la puissance d'émission élevée et à la sensibilité du récepteur qui peut atteindre -90 dBm car la portée des XBee Pro peut atteindre 100 m dans un environnement Indoor. Donc, la solution était de diminuer la puissance d'émission de ces capteurs jusqu'à 10 dBm qui est la puissance minimale et de refaire les mesures. Les résultats obtenus sont les suivants :

Table 4.2: Variation de la puissance du signal en fonction de la distance  $P_t = 10dBm$

Distance (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PL(dB)	47	47	47	47	50.76	50.74	51.02	55.31	57.24	63.53	65.03

Ces nouvelles mesures nous ont permis d'obtenir la figure 4.5 :

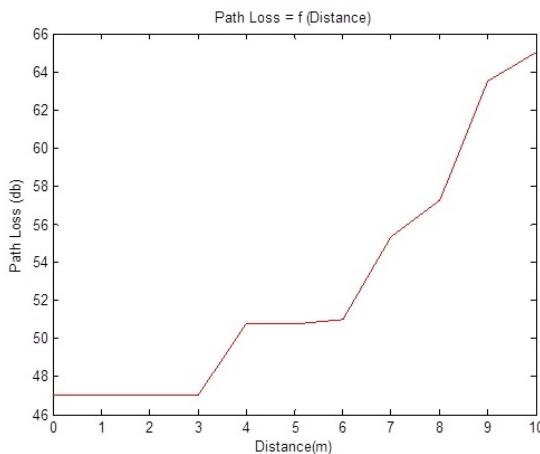


Figure 4.5: Evolution du Path Loss en fonction de la distance ( $P_t=10dBm$ )

Nous pouvons remarquer cette fois que la puissance reçue du signal varie à partir de 3 m mais malgré ça ces mesures ne sont pas encore satisfaisantes. Pour cela, nous avons décidé de changer le type des capteurs.

#### Essai avec XBee non pro

Ces capteurs ont une puissance d'émission fixe et faible par rapport à l'XBee Pro qui est de l'ordre de 0 dBm. L'utilisation de ces capteurs dans les mesures nous a donné les résultats suivants : Ces valeurs nous ont permis d'obtenir la courbe 4.6 :

Table 4.3: Variation de la puissance du signal en fonction de la distance  $P_t = 0dBm$

Distance (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PL (dB)	26.4	51.4	54.87	57.04	60.79	62.79	65.15	67.65	69.54	70.59	71.4

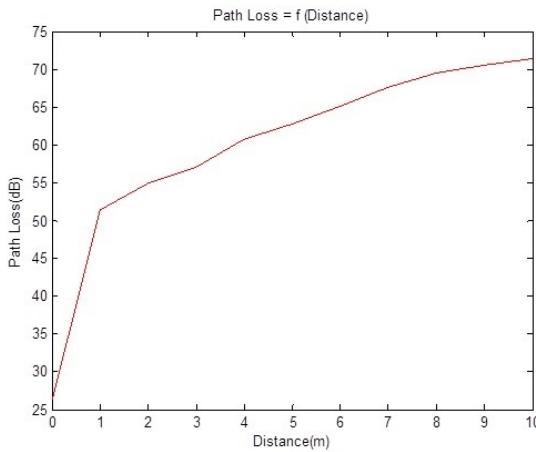


Figure 4.6: Evolution du Path Loss en fonction de la distance (Pt=0dBm)

Nous pouvons remarquer cette fois que la puissance d'émission diminue à partir de 1m et que la puissance du signal décroît logarithmiquement ce qui confirme l'approche théorique de cette méthode. Ces résultats convaincants nous ont encouragés à adopter cette méthode de localisation dans notre système.

#### 4.1.2.3 Détermination des paramètres du modèle log-distance Path Loss

Pour la détermination des paramètres, nous avons préparé un script sur MATLAB qui va nous permettre de calculer le coefficient du Path Loss  $n$  ainsi que d'afficher les courbes résultantes de ce calcul pour avoir une idée sur la marge d'erreur de la distance que notre système va calculer. La droite linéaire résultante de la minimisation de l'erreur quadratique moyenne est présentée dans la figure 4.7

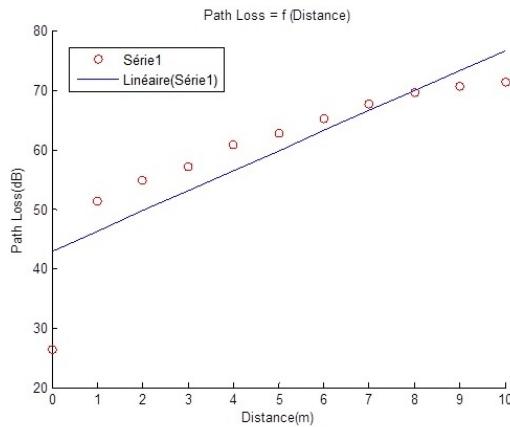


Figure 4.7: Linéarisation du Path Loss

Pour notre modèle, nous avons supposé que  $d_0 = 9m$ . La résolution de  $n$  donne un facteur de PathLoss  $n = 3.05$ . Ainsi, à partir du modèle log-distance PathLoss, la formule approximative des pertes moyennes de signal en fonction de la distance dans

## 4.1 Implémentation de l'algorithme de localisation

---

notre environnement Indoor peut être obtenue par l'équation 4.1 :

$$PL(d) = 70.59 + 10 * 3.05 * \log\left(\frac{d}{9}\right) \quad (4.1)$$

En faisant l'inverse de cette équation, le résultat sera le suivant

$$d = 10^{\frac{PL-70.59}{10*3.05}} * 9 \quad (4.2)$$

En exploitant la formule 4.2, nous pouvons à chaque fois déterminer la distance qui sépare l'émetteur du récepteur à partir de la puissance du signal reçu dans notre environnement. Si nous voulons changer l'environnement, il suffit de prendre des nouvelles mesures et de calculer la nouvelle valeur du PathLoss. Cette opération est appelée phase d'apprentissage. La figure 4.8 illustre une comparaison entre la distance réelle et la distance que notre robot va calculer à chaque fois qu'il veut se localiser.

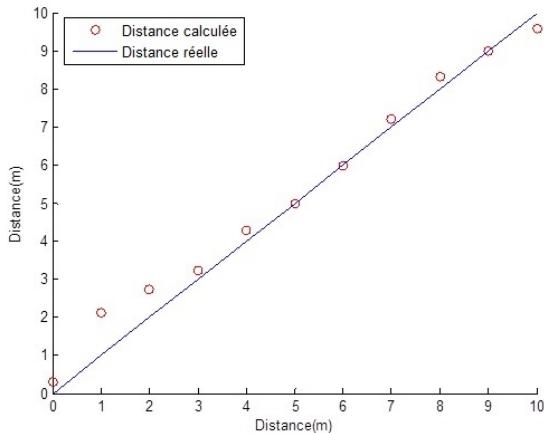


Figure 4.8: Comparaison entre la distance réelle et la distance calculée

Nous pouvons remarquer dans cette figure que la marge d'erreur la plus importante est au niveau des petites distances. Cette erreur est tolérable car nous avons un système d'auto correction qui est le guidage par infrarouge. En plus, ce problème peut être résolu par la programmation car nous avons déjà une idée sur les valeurs de la puissance du signal reçu dans cette zone. Par contre, si tous les points mesurés étaient situé au-dessous ou bien au-dessus de la courbe, nous aurions pu ajouter le facteur de bruit  $X$  (sigma) à notre équation mathématique.

### 4.1.3 Calcul des coordonnées

Pour calculer les coordonnées de notre robot, il suffit que l'émetteur de coordonnées  $(x, y)$  situé sur le robot envoie un message de diffusion (broadcast) vers les stations fixes qui sont de coordonnées  $(0, 0)$ ,  $(0, 3)$  et  $(3, 0)$ . Dès que ces dernières reçoivent le message, il extrait chacune la puissance du signal reçu, calcule la distance qui la sépare de l'émetteur

## 4.2 Carte électronique de la station de recharge

---

et l'envoie au robot. Une fois ce dernier reçoit les trois distances, il les stocke dans trois variables différentes et exécute l'algorithme de trilateration optimisé qui lui permet de connaître sa position dans le plan ( $x, y$ ) par rapport à la station de recharge. Le meilleur résultat a été obtenu lorsque le robot était placé sur le point de coordonnées (3,3) est (2.97, 2.97).

## 4.2 Carte électronique de la station de recharge

Cette carte indiquée par la figure 4.9 est alimentée par un autotransformateur AC/DC 12 V. Elle contient le circuit d'émission infrarouge, un port USB pour la recharge des stations fixes, des régulateurs de tension 5 et 9 V et un connecteur d'alimentation Jack qui joue le rôle d'intermédiaire entre le chargeur de la batterie et les électrodes de la station de recharge.

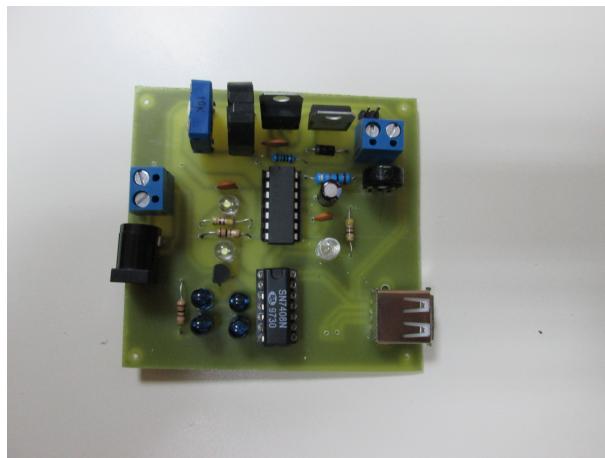


Figure 4.9: Carte électronique de la station de recharge

## 4.3 Carte électronique du robot

Cette carte indiquée par la figure 4.10 contient l'interrupteur de marche / arrêt, le circuit de réception infrarouge, l'afficheur LCD qui va nous permettre d'afficher le niveau de la batterie et la position du robot. Pour assurer l'alimentation de la carte Arduino et des différents capteurs et actionneurs du robot, nous avons placé sur la carte des connecteurs 5 V et GND. Nous avons aussi attaché à la carte un micro switch qui change de position lorsque le robot se met en charge. Ce changement engendre une isolation électrique des capteurs et de la carte de commande. Seul le comparateur qui va détecter la recharge de la batterie reste alimenté. Dès que la batterie est chargée, la sortie du comparateur change d'état et commande les moteurs dans le sens inverse pour détacher le robot de la station de recharge d'où le micro switch retourne à sa position initiale et le robot reprend son fonctionnement habituel. L'utilisation d'un circuit logique OU EX nous a donné la possibilité de commander les moteurs de notre robot par le comparateur lorsque le robot est en charge et par la carte Arduino lorsqu'il est en mode de fonctionnement normal.

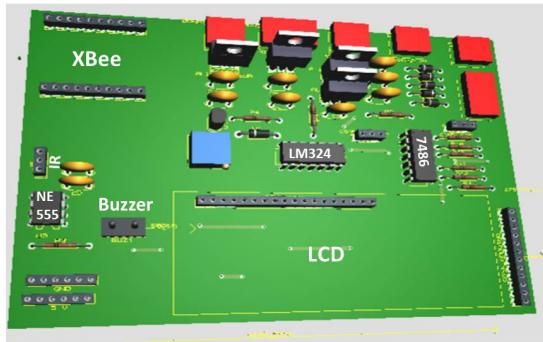


Figure 4.10: Carte électronique du robot

## 4.4 Assemblage du robot

En implémentant la carte électronique et le capteur ultrason sur le robot, nous obtenons un robot qui détecte le niveau bas de sa batterie, se localise dans le plan  $(x, y)$ , détecte la présence su signal infrarouge et évite les obstacles mais ne réagit pas encore lors de la localisation pour se diriger vers la station de recharge vu que n'avons pas encore implanté l'algorithme de l'orientation. La figure 4.11 représente notre robot dans son état actuel.

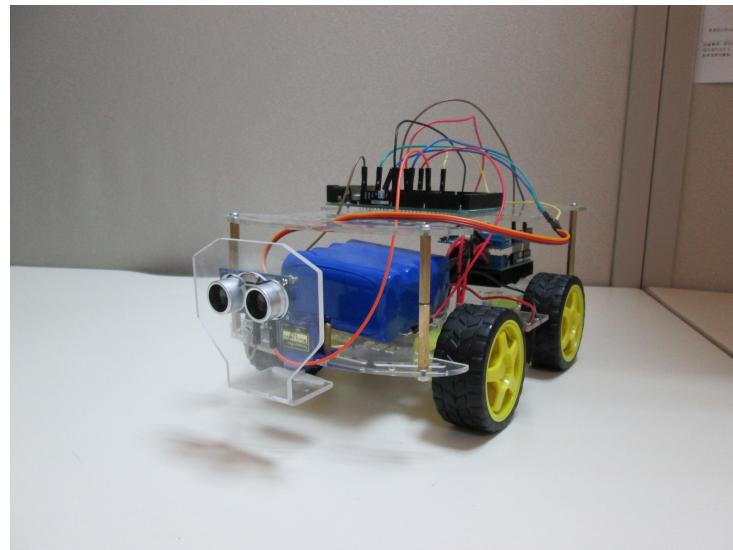


Figure 4.11: Robot en cours d'assemblage

## Conclusion

A travers cette phase du projet qui est déjà en cours, nous avons pu voir les premiers résultats de la localisation, tester les cartes électroniques du système et faire l'assemblage du robot ce qui nous a permis d'évaluer les performances des modules de notre système déjà testé surtout au niveau de la localisation où nous avons pu détecter un problème au niveau de la directivité des antennes dans certaines positions.

# Conclusion générale

Le système de recharge automatique semble être une solution efficace pour garantir une autonomie continue pour les robots mobiles.

Au cours de ce projet, nous avons conçu un système permettant la recharge auto d'un robot mobile qui, suite à sa localisation par rapport à la station de recharge, s'oriente et se dirige vers elle en évitant les obstacles apparaissant sur son chemin. Une fois arrivé à la zone de couverture des émetteurs infrarouge préalablement installés auprès de la station, le robot mobile effectue une autocorrection de sa trajectoire pour se mettre en position de recharge.

Toutefois, la localisation indoor du robot mobile par rapport à la station fixe reste toujours la partie la plus délicate. Les résultats expérimentaux que la méthode de localisation basée sur le RSS est assez efficace pour localiser le robot mobile situé à une distance de deux à huit mètres de la station de recharge fixe. Cependant, les facteurs environnementaux (température, humidité) peuvent faire dégrader l'efficacité de notre système de localisation.

Nous pouvons, ainsi, conclure que le système proposé répond à nos attentes. Cependant, des améliorations au niveau de la localisation sont nécessaires en remplaçant les antennes filaires intégrées des XBee par d'autres ayant un diagramme de rayonnement omnidirectionnel dans le plan  $(x, y)$  pour remédier les problèmes de fluctuation des RSS. D'autre part, il nous reste d'implémenter l'algorithme de l'orientation du robot et tester sa robustesse au niveau pratique.

# Bibliographie

- [1] Julia Layton. How robotic vacuums work. Disponible en ligne sur <http://electronics.howstuffworks.com/gadgets/home/robotic-vacuum.htm>. (Cité en page 3.)
- [2] Guangming Song, Hui Wang, Jun Zhang, and Tianhua Meng. Automatic docking system for recharging home surveillance robots. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 57(2):428–435, May 2011. (Cité en page 3.)
- [3] Hui Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and Jing Liu. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *Trans. Sys. Man Cyber Part C*, 37(6):1067–1080, November 2007. (Cit  en pages 11, 12, 13 et 15.)
- [4] Frédéric Evennou. *Advanced techniques and technologies for indoor mobile positioning*. Theses, Universit  Joseph-Fourier - Grenoble I, January 2007. (Cit  en page 13.)
- [5] M. Bouet and A.L. dos Santos. Rfid tags: Positioning principles and localization techniques. In *Wireless Days, 2008. WD '08. 1st IFIP*, pages 1–5, Nov 2008. (Cité en page 15.)
- [6] Microchip. Wifly command reference, advanced features and applications users guide. Disponible en ligne sur : <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002230A.pdf>. (Cité en page 18.)
- [7] electronica. Hc05. Disponible en ligne sur : <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002230A.pdf>. (Cité en page 18.)
- [8] digi. Product manual. Disponible en ligne sur : <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/point-multipoint-rfmodules/xbee-series1-module,.> (Cité en page 18.)
- [9] Theodore Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2nd edition, 2001. (Cité en page 20.)
- [10] Vishay Telefunken. Tsop 1838 datasheet. Disponible en ligne sur : <http://www.doyoung.net/DOC/TSOP1838DS.pdf>. (Cité en page 27.)
- [11] Texas Instrument. Ne555. Disponible en ligne sur : <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>. (Cité en page 27.)
- [12] Fairchild Semiconductor. 7408 datasheet. Disponible en ligne sur : <http://www.datasheetcatalog.com/datasheets/pdf/7/4/0/8/7408.shtml>. (Cité en page 29.)
- [13] Ultrasonic distance sensor (hy-srf05) with 2channel logic level converter. (Cité en page 30.)

## BIBLIOGRAPHIE

---