



# Recherches

*État de l'art technologique : Indoor Positionning*

VERSION : 2

RÉVISION : 2

ÉTAT : EN COURS D'ÉDITION

PROSE - A1

Responsable du document : Antoine ROBERT

AVERTISSEMENT : Le présent document est la propriété de Jérôme DELATOUR et de l'équipe PROSE A1 dans le cadre d'un projet à but pédagogique. Il ne peut pas être diffusé ou recopié sans une autorisation écrite préalable, et en notifiant l'origine de ce document. Aucune information concernant le contenu de ce document ne saurait être communiquée à une personne extérieure à l'activité pédagogique de ce projet sans une autorisation écrite préalable.

---

Date	Actions	Auteur	Version	Révision
05/04	Antoine Robert	Création du document	0.0	0
05/04	Antoine Robert	Ajout de l'introduction	1.0	0
05/04	Antoine Robert	Ajout du glossaire	1.0	0
07/04	Antoine Robert	Ajout de la partie sur les enjeux	1.0	0
15/04	Antoine Robert	Ajout de la partie sur les domaines d'utilisation	1.0	0
17/04	Antoine Robert	Ajout de la partie sur le contexte des recherches	1.0	0
19/04	Antoine Robert	Ajout de la partie sur les références	1.0	0
08/05	Antoine Robert	Ajout de la partie sur la conclusion	1.0	0
15/05	Antoine Robert	Ajout de la partie sur les technologies	1.0	0
16/05	Antoine Robert	Ajout de la partie sur les méthodes	1.0	0
24/04	Antoine Robert	Ajout de la partie sur le choix	1.0	0
19/05	Charly Joncheray	Relecture et correction du document	1.0	1
19/05	Alexis Tonetti	Relecture et correction du document	1.0	1
20/05	Antoine Robert	Relecture et correction du document	2.0	1
20/05	Antoine Robert	Ajout de la table des versions	2.0	1

Table 1: Table des versions

# Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Glossaire</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Enjeux et situation actuelle de l'Indoor positioning</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Domaines d'utilisation</b>	<b>8</b>
4.1	L'environnement . . . . .	8
4.2	Le commerce . . . . .	8
4.3	La santé . . . . .	8
4.4	La sécurité . . . . .	8
4.5	Le confort personnel . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Contexte des recherches</b>	<b>9</b>
5.1	Le projet ProSE . . . . .	9
5.2	Notre projet . . . . .	10
5.3	Le but des recherches . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Technologies d'indoor positioning</b>	<b>11</b>
6.1	Technologies basées sur les ondes radiofréquences . . . . .	11
6.1.1	WiFi . . . . .	11
6.1.2	BLE . . . . .	12
6.1.3	UWB . . . . .	12
6.1.4	Ultrasons . . . . .	13
6.1.5	Champ magnétique . . . . .	13
6.2	Technologies basées sur l'imagerie . . . . .	14
6.2.1	Spectre visible . . . . .	14
6.2.2	Spectre IR . . . . .	14
<b>7</b>	<b>Méthodes de positionning</b>	<b>16</b>
7.1	Méthodes range-based . . . . .	16
7.1.1	Méthode basée sur la force du signal . . . . .	16
7.1.2	Méthodes basées sur des mesures d'angle . . . . .	17
7.1.3	Méthodes basées sur des mesures de temps . . . . .	17
7.1.4	Méthodes basées sur des mesures de différences de temps . . . . .	18
7.2	Méthodes range-free . . . . .	19
7.2.1	Méthode DV-hop . . . . .	19
7.2.2	Méthodes d'intersection de signaux . . . . .	19
7.2.3	Élargissement . . . . .	20
<b>8</b>	<b>Choix de la technologie et de la méthode pour PROSE</b>	<b>21</b>
8.1	Contraintes liées à notre projet . . . . .	21
8.2	Technologies et méthodes implémentables dans le cadre de notre projet . . . . .	21
8.3	Technologie et méthode retenue pour être implémentée . . . . .	22
8.4	Objectif . . . . .	24
<b>9</b>	<b>Conclusion</b>	<b>26</b>
<b>10</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>27</b>

## List of Figures

1	Système d'indoor positioning utilisant le Wi-Fi. . . . .	11
2	Comparaison fréquentielle entre le GPS le Bluetooth, les Wi-Fi, et les UWB. . . . .	12
3	Le système "Cricket" basé sur les ondes ultrasonores. . . . .	13
4	Principe de mise en place d'un système de localisation grâce au spectre visible. . . . .	14
5	Reconstitution d'un intérieur avec un scanner LIDAR. . . . .	15
6	Méthode de calcul de position basé sur les mesures de forces de signaux. . . . .	16
7	Méthode de calcul de position basée sur les mesures d'angle. . . . .	17
8	Méthode de calcul de position basé sur le One-way TOA. . . . .	18
9	Méthode de calcul de position basée sur le TDOA. . . . .	19
10	Méthode DV-hop . . . . .	20
11	Méthode DV-hop . . . . .	20
12	Zone de détection et disposition des émetteurs. . . . .	22
13	Principe d'acquisition des données des points de la zone de détection. . . . .	23
14	Principe d'estimation de position d'un point. . . . .	23
15	Application de la méthode de fingerprinting RSSI Wi-Fi à notre projet. . . . .	25

## 1 Introduction

Ce dossier a pour but de faire la synthèse de l'étude ciblée et approfondie des techniques de géolocalisation en intérieur disponibles actuellement. Dans le cadre du projet d'option "Systèmes embarqués" qui nous est proposé en deuxième année de cycle ingénieur à l'ESEO, projet qui sera détaillé en partie 5, ce dossier a pour finalité de permettre à l'équipe projet de choisir la technique de géolocalisation en intérieur la plus adaptée et la plus efficace compte tenu des limites techniques et budgétaires qui nous sont imposées.

Ce présent document est divisé en 6 grandes parties. Les deux premières auront pour but de d'expliquer les enjeux, les domaines d'utilisation de l'indoor positioning. La troisième partie expliquera le contexte de nos recherches. La quatrième et la cinquième serviront à faire un état des lieux des différentes technologies et méthodes acuelles. Enfin, la sixième expliquera notre choix de technologie et de méthode pour notre projet.

Ces recheches ce sont basées sur différentes documents universitaires disponible dans la Bibliographie, ainsi que sur différentes sites internet et projets open-sources.

## 2 Glossaire

ACRONYME/MOT	DEFINITION
<b>IPS</b>	Indoor positioning system.
<b>GPS</b>	Global positioning system.
<b>IR</b>	Infrarouge.
<b>UWB</b>	Ultra wideband.
<b>BLE</b>	Bluetooth low energy.
<b>RSS</b>	Received signal strength.
<b>A0A</b>	Angle of arrival.
<b>TOA</b>	Time of arrival.
<b>TDOA</b>	Time difference of arrival.
<b>TW-TOA</b>	Two way time difference of arrival.
<b>IoT</b>	Internet of things.
<b>AA</b>	Amorphous Algorithm.
<b>CLA</b>	Centroid Localization Algorithm.
<b>APIT</b>	Approximate Point in Triangulation.
<b>Tag</b>	Dans notre cas c'est l'objet cible d'informations émissent par des anchors.
<b>Anchor</b>	Dans notre cas c'est un capteur pouvant émettre et recevoir des informations dans un périmètre défini grâce à un protocole de communication.
<b>Dongle</b>	Composant électronique que l'on branche sur un autre appareil afin d'apporter une ou plusieurs fonctionnalités supplémentaires.

Table 2: Définitions des acronymes et mots.

### 3 Enjeux et situation actuelle de l'Indoor positioning

La localisation dans l'espace a toujours été un sujet de recherche et de développement pour l'Homme à travers les siècles. De la navigation sur les océans en passant par la conquête de l'espace l'Homme n'a cessé d'inventer divers outils lui permettant d'obtenir la position précise d'un objet ou même de sa position dans l'espace afin d'avoir une vision d'ensemble de son environnement.

En 1957, l'Union soviétique lança le satellite Sputnik 1 dans l'espace. C'est alors que deux scientifiques américains, William Guier et George Weiffenbach, décidèrent d'en étudier les transmissions radio. Ils découvrirent non sans surprise qu'il était possible de connaître la position dudit satellite en se basant sur l'effet Doppler des ondes radio émises par ce dernier.

De là est né le premier système de positionnement par satellites connu sous le nom de TRANSIT, l'ancêtre du fameux Global Positioning System ou GPS.

Ouvert au grand public en 2000 le GPS permet aujourd'hui à plusieurs milliards de personnes dans le monde de connaître leur position ou celle d'un objet dans l'espace grâce à la triangulation des données et ce avec une précision estimée entre 5 et 10 m, précision variant selon l'environnement de l'objet. Indispensable dans tous les domaines liés de près ou de loin aux transports, qu'ils soient aériens, maritimes ou routiers, ou encore aux loisirs, le GPS a permis de résoudre une grande partie des problématiques liées à la localisation en extérieure.

Cependant, le problème subsiste quand il s'agit d'appliquer la même technique dans un environnement intérieur. Le besoin d'une localisation tridimensionnelle de ces environnements (position en  $x, y$  et  $z$ ) ainsi que les caractéristiques physiques des bâtiments engendrant des interférences rendant impossible la localisation avec précision d'un objet en intérieur.

De ce constat sont nés différents systèmes de positionnement en intérieur ou Indoor Positioning System (IPS) répondant à ces problématiques. À l'heure actuelle, il existe de multiples techniques permettant de localiser un objet en intérieur. Se divisant en deux grandes familles, celles utilisant les ondes radiofréquences et celles qui ne les utilisent pas, ces techniques admettent chacune leurs avantages et leurs inconvénients. Variant selon les domaines d'utilisation et les environnements, ces systèmes peuvent atteindre des niveaux de précision allant jusqu'à 10 cm.

Forts d'une nécessité croissante dans de nombreux domaines, un grand nombre d'entreprises sont aujourd'hui tous en quête de la technique la plus précise qui répondra aux besoins actuels et futurs des utilisateurs dont les attentes sont de plus en plus élevées.

## 4 Domaines d'utilisation

La nécessité de se localiser dans l'espace est ancienne comme nous avons pu le voir précédemment. Cependant aujourd'hui elle est devenue presque indispensable dans de nombreux domaines tels que l'environnement, le commerce, la santé, la sécurité, ou encore l'amélioration du confort personnel.

### 4.1 L'environnement

Depuis quelques années émergent en France et dans le monde des start-ups spécialisées dans les innovations agricoles. Ayant pour but la transformation du monde agricole pour faire face aux enjeux actuels et du futur, ces start-ups offrent des solutions de simplification et d'amélioration de tâches permettant un meilleur rendement, mais aussi une meilleure qualité de produit avec un respect accru de l'environnement. La localisation appliquée à l'agriculture permet ainsi l'optimisation du guidage d'ouvriers et de machines dans une exploitation ou encore l'automatisation des tâches comme le semis ou le désherbage.

### 4.2 Le commerce

Présent au Japon et aux États-Unis notamment, des méthodes de publicité dites géolocalisées permettent aux enseignes de vous envoyer publicités et autres offres promotionnelles directement sur votre smartphone vous orientant ainsi selon vos habitudes vers un produit ciblé. D'autres applications, elles vous permettent plus simplement de vous situer dans un centre commercial, ou de vous montrer le chemin le plus court vers un produit désiré.

### 4.3 La santé

Dans un monde hospitalier de mieux en mieux équipé technologiquement afin d'offrir aux patients les meilleurs services possible, il subsiste certaines problématiques nécessitant la localisation. À titre d'exemple, il n'est pas rare que dans des cas de maladies neurologiques et/ou neurodégénératives certains patients soient amenés à commettre des fugues, il est alors nécessaire de pouvoir les localiser le plus rapidement possible. Lors du déclenchement d'une alarme dans une chambre de patient il a été envisagé divers systèmes de localisation du personnel soignant offrant une meilleure répartition des tâches et du temps d'intervention.

### 4.4 La sécurité

Les services de localisation sont également utiles pour assurer la sécurité des personnes. Dans un contexte d'intervention de pompiers, de gendarmes ou encore de militaires, et ce en intérieur il est nécessaire, si un intervenant se blesse ou perd connaissance, de pouvoir le localiser le plus rapidement possible. Il en va de même pour les personnes pratiquant un métier à risque comme les ouvriers de maintenance par exemple. Une application de gestion de fugues dans le milieu pénitentiaire a aussi été envisagée, cependant il faut faire attention au respect des libertés individuelles.

### 4.5 Le confort personnel

Bien que cité en dernier, c'est bien dans le domaine du grand public que les solutions technologiques utilisant la localisation se font de plus en plus nombreuses. Qui ne s'est jamais demandé où il avait posé ses clefs, ses cartes ou encore la télécommande ? Les avancées dans le domaine de la domotique rendent nécessaire la connaissance de l'environnement intérieure, de l'aspirateur autonome en passant par les assistants ou encore la gestion des nos chers animaux domestiques la localisation en intérieur est de plus en plus présente.



## 5 Contexte des recherches

### 5.1 Le projet ProSE

En deuxième année de cycle ingénieur à l'ESEO Angers et dans le cadre de l'option "Systèmes embarqués" est proposé aux élèves un projet long de 5 mois intitulé ProSE basé sur le principe de cycle en V. Ce projet a pour but de nous familiariser avec les différentes facettes du développement d'un système embarqué tel que nous pourrions les rencontrer lors de notre vie professionnelle. Ce projet a aussi pour but de nous donner de l'expérience pratique en matière de développement logiciel en prenant en charge, avec une grande autonomie, le développement demandé, depuis l'analyse d'un cahier des charges jusqu'à la livraison d'un produit fini.

Afin d'atteindre les objectifs du projet, nous, les étudiants, sommes répartis en groupes de huit personnes composés comme suit :

- Un chef de projet : responsable de l'organisation et de la planification du travail au sein de l'équipe.
- Un responsable qualité et test : chargé de la bonne qualité du travail effectué par l'équipe, et ce à tous les niveaux du développement.
- Des développeurs Android : au nombre de trois.
- Des développeurs C : au nombre de trois.

Ce projet met l'accent sur la responsabilité de chacun pour une meilleure coopération et un meilleur partage des ressources humaines et matérielles nécessaires au bon avancement du projet.

Afin d'améliorer le suivi de notre projet, un environnement numérique de travail, Redmine, est mis à notre disposition. Il permet à chacun un suivi global de son travail et offre au chef de projet une vue d'ensemble du travail effectué par son équipe.

Bien qu'ils ne soient pas inclus au sein de l'équipe projet les enseignants ont des rôles bien particuliers. Ils peuvent dans ProSE avoir deux casquettes, à savoir :

- Consultants : personnes ayant le rôle d'expert qui pourront être consultés pour aider une équipe à résoudre des problèmes ou pour aiguiller une équipe vers le chemin qu'il lui semble le plus juste.
- Auditeurs : personnes ayant le rôle d'experts chargés de surveiller et de s'assurer du bon déroulement du travail au sein des équipes et du respect des règles établies.

Dans le cadre du ProSE l'équipe projet doit répondre à une problématique proposée par un client qui sera le fil conducteur du projet. La partie suivante aura pour but de définir le projet et ses différents acteurs.

## 5.2 Notre projet

Notre client pour ce projet est M. Loic Pallardy, employé par la société STMicroelectronics en tant qu'architecte logiciel. Notre projet consiste en la création d'un robot basé sur la carte électronique STM32MP157 MPU. Ce robot devra admettre plusieurs cas d'utilisation et devra être piloté par un moyen de communication sans fil grâce à une application Android.

Toute la problématique de ce robot repose sur le fait que ce dernier devra utiliser une technique de localisation en intérieur ou indoor positioning (IPS). Il devra de ce fait connaître sa position exacte à tout moment ainsi qu'être capable d'aller à un endroit spécifié via une application tierce.

Le but de ce projet sera donc d'implémenter sur le robot une technologie d'IPS à l'aide de l'ensemble du matériel qui nous est fourni à savoir :

- Une carte STM32MP157 discovery board.
- Un support pour robot avec de deux moteurs pour les roues.
- Un Motor control extension shield.

L'équipe qui est chargée du développement de ce projet est la suivante :

- Chef de projet : Alexis Tonetti .
- Responsable qualité : Matthias Pasquier.
- Développeurs Android : Timothé Girard, Rémy Coquard et Charly Joncheray.
- Développeurs C : Raphaël Gallais-Pou, Romain Jouet et Antoine Robert.

## 5.3 Le but des recherches

Le but de ce dossier et des recherches associées est de faire un état de l'art de ce qui existe en matière de technologies d'indoor positioning. Après les avoir analysées et étudiées les moyens nécessaires à leur implémentation, il nous sera plus facile de choisir la méthode la plus adaptée à notre problématique et aux limites qui nous sont imposées.

## 6 Technologies d'indoor positioning

Dans cette partie il s'agira de faire une liste des technologies d'indoor positioning. Ces technologies sont divisées en deux grandes catégories à savoir celles basées sur les ondes radiofréquences et celles basées sur l'imagerie.

### 6.1 Technologies basées sur les ondes radiofréquences

#### 6.1.1 WiFi

Le Wi-Fi est un ensemble de protocoles de communication sans fil regroupés sous la norme IEEE 802.11. Dans le cadre l'indoor positioning il est utilisé dans une configuration composée de :

- Une zone de détection définie
- Un tag, à savoir l'objet à positionner
- Des anchors ou balises Wi-Fi

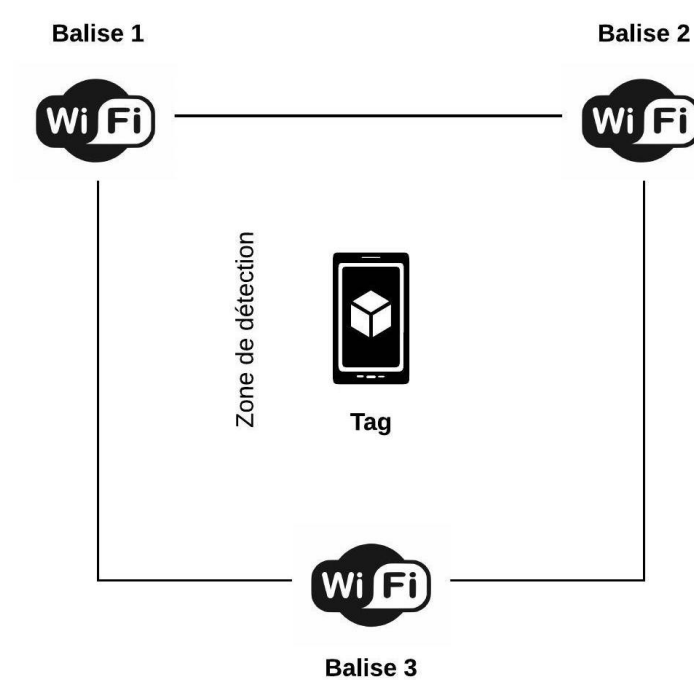


Figure 1: Systeme d'indoor positioning utilisant le Wi-Fi.

Ici, le tag et la balise vont communiquer afin de permettre la localisation. Le Wi-Fi peut être utilisé de deux manières différentes dans le cadre l'indoor positioning.

- Mode récepteur : Toutes les balises environnantes émettent vers le tag. Les ressources de calcul requises au niveau du tag sont accrues au niveau du tag, mais cela permet une mise à jour quasi immédiate de la position, car aucune ressource externe n'est nécessaire.
- Mode émetteur : seul le tag est chargé d'émettre à destination des anchors environnantes. Les ressources de calcul requises au niveau du tag s'en trouvent réduites, mais la mise à jour de la position dépendra ici de plusieurs éléments et non d'un seul comme précédemment ce qui nécessite un synchronisation des tous les composants.

Le principal avantage du Wi-Fi est qu'il est relativement peu cher et présent partout actuellement que ce soit dans les foyers, les écoles ou les centres commerciaux par exemple. Il a aussi une portée conséquente allant de 150m jusqu'à 250m.

Cependant cette technologie admet une faible précision dans les zones qui ne sont pas neutres, sans interférences. On parle d'une précision allant de 5 à 10 mètres pour ces zones.

D'un point de vue économique le Wi-Fi est peu cher, il est possible de mettre en place des systèmes décrits ci-dessus avec des Raspberry Pi dont le prix est de 37 euros l'unité environ.

### 6.1.2 BLE

Le BLE ou Bluetooth Low Energy est une technique de transmission sans fil basse consommation regroupée sous le standard Bluetooth. Il est utilisé dans une configuration similaire à celle du Wi-Fi. Le tag sera ici majoritairement un smartphone ou une tablette, car ces derniers embarquent déjà les capteurs nécessaires.

Le principal avantage du BLE est bien évidemment son prix et sa présence auprès des smartdevices. Sa faible consommation énergétique est aussi un avantage non négligeable dans le domaine de l'IoT.

Comme le Wi-Fi, c'est la précision qui fait défaut au BLE, on parle ici d'une précision allant de 2m à 10m. À titre informatif la portée de cette technique va de 10m à 100m.

D'un point de vue économique le BLE est encore une fois peu cher. L'achat de dongles BLE coûte aux alentours d'une dizaine d'euros pièces.

### 6.1.3 UWB

L'UWB ou Ultra Wideband, est un nouveau type de modulation radio sans fil. Ce dernier est caractérisé par une grande largeur de bande par rapport à la fréquence centrale des ondes émises. Sa large bande passante permet une résolution temporelle précise et sa faible fréquence offre une meilleure pénétration des ondes à travers les matériaux.

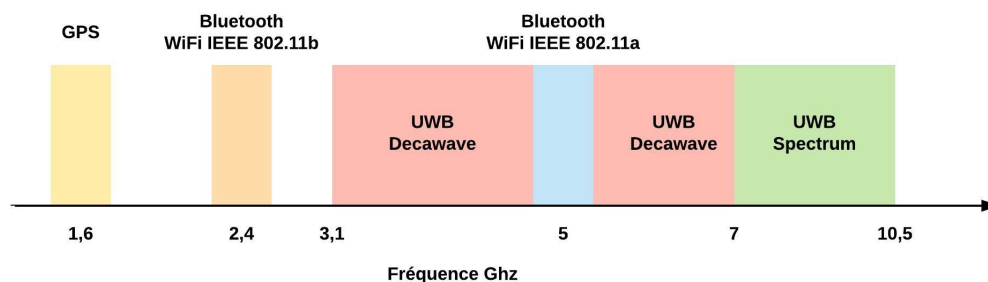


Figure 2: Comparaison fréquentielle entre le GPS le Bluetooth, les Wi-Fi, et les UWB.

Les avantages de l'UWB sont sa haute précision, de l'ordre de 15 cm ainsi que sa forte adaptabilité à l'environnement.

Cependant cette technologie n'est encore qu'en phase expérimentale pour une utilisation commerciale. De ce fait il n'existe que très peu de documentation rendant compliqué une exploration précise.

D'un point de vue économique un module UWB est relativement abordable. Son prix avoisine les 25 euros pièce pour un module Decawave Scensor UWB. L'utilisation est similaire au BLE ou au WiFi. Il bien évidemment ajouter à ceci un microcontrôleur qui effectuera les calculs nécessaires.

#### 6.1.4 Ultrasons

L'ultrason est une onde mécanique élastique dont la fréquence est située entre 16 kHz et 10 MHz. Son utilisation dans des systèmes de localisation est majoritairement couplée avec l'utilisation de son dont la fréquence est plus élevée. Le système cricket illustre parfaitement cette combinaison.

Dans ce système, deux émetteurs, un sonore et un ultrasonore, émettent en même temps une salve d'ondes. Le tag à localiser reçoit en premier l'onde ultrasonore, car plus rapide et déclenche un compteur qui s'arrêtera lors de la réception de l'onde sonore plus lente. Connaissant la vitesse de propagation des deux et le temps écoulé entre les deux réceptions on déduira sans grande difficultés la distance qui sépare l'émetteur du tag. On déduira par la suite la position exacte du tag avec une méthode de triangulation. Le principal

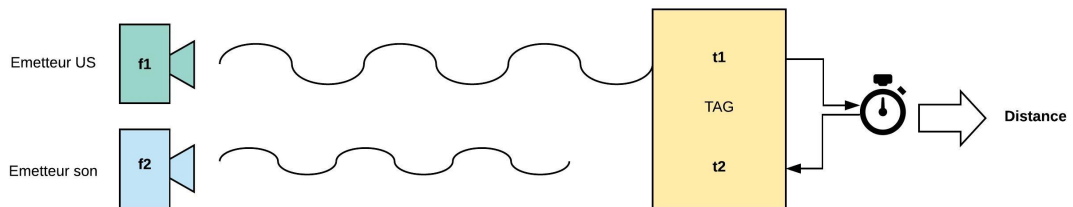


Figure 3: Le système "Cricket" basé sur les ondes ultrasonores.

avantage de cette technique est sa précision, en effet avec l'utilisation d'ultrason on atteint une position à la dizaine de centimètres près.

Cependant, cette technique n'est précise que sur les courtes distances et dans des zones neutres de toutes perturbations, ces dernières pouvant fausser les calculs.

Pour ce qui est du prix un émetteur à ultrasons coûte entre 5 et 10 euros. Il faudra ajouter à ce prix celui d'une carte de type Raspberry ou Arduino pour créer un émetteur ultrasonore fonctionnel.

#### 6.1.5 Champ magnétique

L'étude du champ magnétique a toujours été source de recherches tant son utilisation est diverse. Son utilisation dans la géolocalisation en intérieur nécessite une cartographie du lieu, c'est à dire un relevé de valeurs en différents points de l'espace qui seront ensuite sauvegardés dans une base de données. On parle ici de fingerprint. Il s'agira ici d'effectuer des relevés de la puissance du champ magnétique pour pouvoir se localiser.

L'avantage principal de cette technique est qu'elle ne nécessite pas d'infrastructure. Ici il s'agira seulement de développer le système d'acquisition du champ magnétique.

Cependant la précision de cette technique lui fait défaut, on parle ici d'une précision allant de 30 cm jusqu'à quelques mètres. La présence d'objets métalliques peut aussi grandement fausser le résultat.

## 6.2 Technologies basées sur l'imagerie

### 6.2.1 Spectre visible

Toutes les techniques de localisation basées sur le spectre visible sont des techniques de détection de contours et d'environnement. Ici une caméra se chargera de l'acquisition de l'image et un algorithme permettra le traitement de l'image. Avec la démocratisation de la machine learning, il est tout à fait concevable d'utiliser un tel algorithme afin d'accroître les performances de la localisation. Les avantages liés à cette technique sont la rapidité

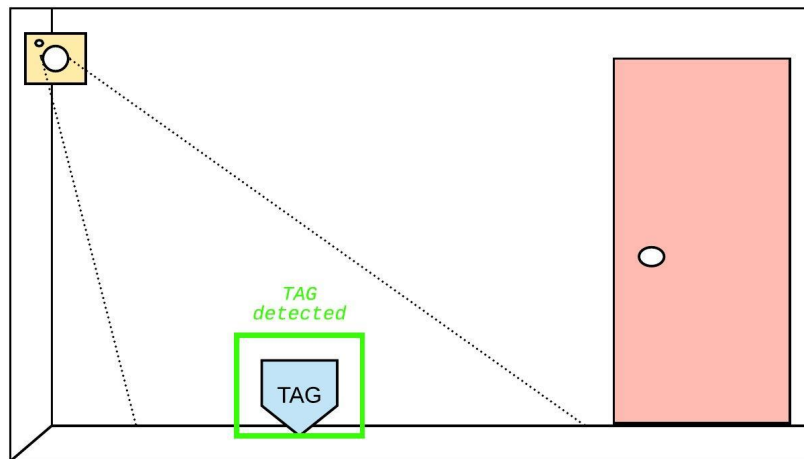


Figure 4: Principe de mise en place d'un système de localisation grâce au spectre visible.

d'implémentation de la méthode ainsi que sa précision, on parle ici d'une précision de l'ordre de 5 cm.

Cependant, une telle méthode nécessite que l'objet à localiser soit en vue de la caméra, hors du champ de cette dernière le calcul de localisation est impossible. De même, les interférences avec des objets venant obstruer la vue de l'objet posent un souci d'identification.

Sur le plan financier l'utilisation de cette technique nécessite l'achat d'une caméra, ici une webcam fera amplement le travail. On peut en trouver aux alentours de 20-30 euros.

### 6.2.2 Spectre IR

Le rayonnement infrarouge est un rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'onde sont comprises entre 700 nm et 1 mm. Dans le cadre de la localisation distinguent deux grandes techniques basées sur l'IR.

- On place une série d'émetteurs LED, infrarouges autour de la zone de détection souhaitée et on place sur le tag un détecteur d'infrarouges. En fonction des angles des réceptions des différents LED, on pourra en déduire sa position dans l'espace.
- On place sur un robot des émetteurs et des récepteurs infrarouges dans différentes directions. On effectue un balayage de la zone de détection avec le robot et ce dernier reconstituera cet environnement en une cartographie 2D ou 3D grâce aux ondes reçues. Un outil comme le scanner LIDAR peut remplir cette tâche.

Les principaux avantages de ces techniques sont leurs précisions ainsi que l'adaptabilité à l'environnement. Pour la précision on peut aller jusqu'à 10 cm avec un scanner de type LIDAR.

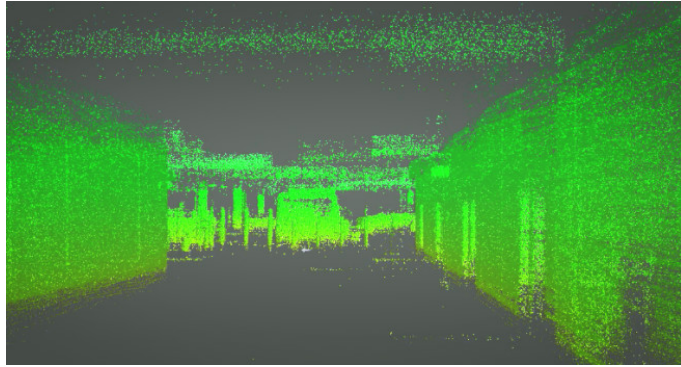


Figure 5: Reconstitution d'un intérieure avec un scanner LIDAR.

Cependant, les infrarouges admettent des interférences avec la lumière du jour rendant difficile sont utilisation en plein soleil. Son prix est aussi non négligeable, pour un scanner LIDAR on parle de 180 euros la pièce. Pour des capteurs et récepteurs IR plus classiques leurs prix varient entre 3 et 10 euros pièce.

## 7 Méthodes de positionning

Dans cette partie il s'agira de faire une liste des méthodes d'indoor positionning. Ces méthodes sont divisées en deux grandes catégories. Premièrement les range-based, à savoir les méthodes basées sur des mesures de distances entre un émetteur et un récepteur. Deuxièmement les range-free, les méthodes reposant sur les échanges d'informations de connexion entre noeuds.

### 7.1 Méthodes range-based

#### 7.1.1 Méthode basée sur la force du signal

Il existe deux méthodes qui s'appuient sur la puissance du signal reçu.

La première repose sur une corrélation directe entre la puissance et la distance. Dans cette méthode la puissance mesurée au niveau du tag est représentative de la distance vis-à-vis des antennes de références. Différentes équations permettent de modéliser le comportement du canal et ainsi, quantifier les atténuations du signal en fonction de la distance parcourue. Cette méthode est une méthode très calculatoire car elle se base sur des résolutions d'équations complexe.

La seconde quant à elle est basée sur un algorithme de comparaison. En amont de la localisation, il est nécessaire de procéder à une phase de fingerprinting, de relevé en différents points des puissances des différents anchors pour constituer une base de données. Cette base de données ainsi créée permettra lors de la phase de localisation de comparer les puissances reçues avec celles préenregistrées et on pourra en déduire la position estimée du tag. Le principal avantage de ces techniques est la rapidité d'implémentation, en effet,

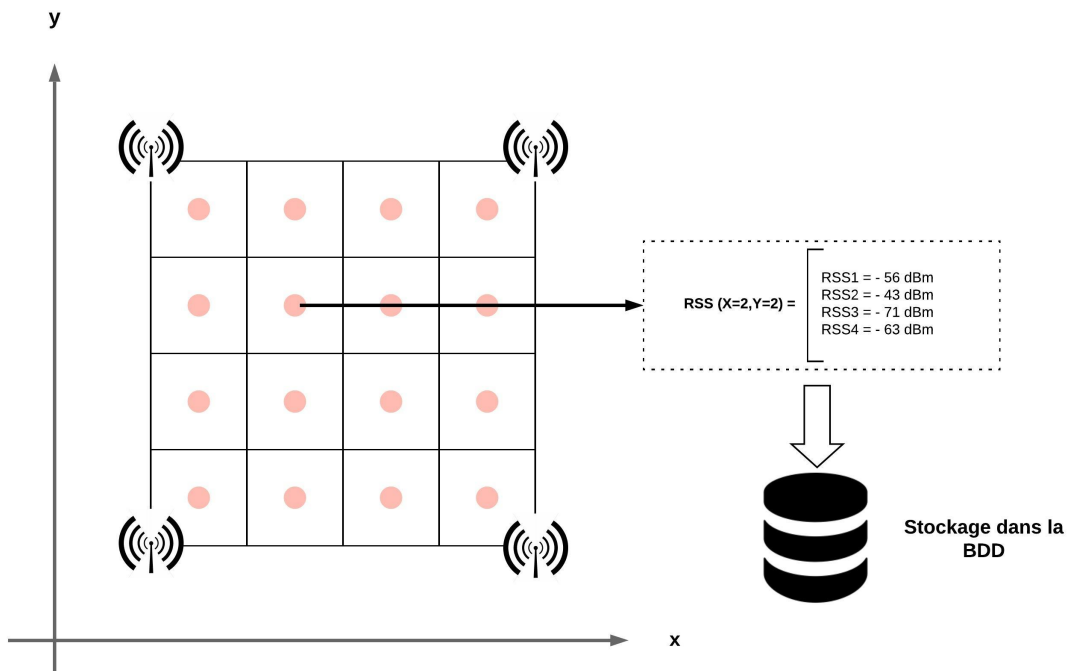


Figure 6: Méthode de calcul de position basé sur les mesures de forces de signaux.

celles-ci ne nécessitent que très peu de calcul et sont facilement adaptables.

Cependant, le défaut majeur de cette technique est qu'il est nécessaire d'avoir une zone



parfaitement neutre, car les interférences faussent les calculs. La deuxième méthode quand à elle nécessite un investissement en temps relativement important en cas d'implémentation dans un nouvel environnement, et n'est donc adaptée que dans le cadre d'une utilisation dans un domaine relativement stable

### 7.1.2 Méthodes basées sur des mesures d'angle

La méthode AOA, pour Angle-of-Arrival est une méthode de localisation qui se base sur la mesure des angles d'arrivées de signaux d'au minimum deux anchors par rapport à un tag. Après détermination des angles de réception, la position du tag est obtenue par l'intersection des différentes droites et par un système de triangulation.

Cette méthode nécessite bien évidemment d'être en vue directe du tag auquel cas les angles ne pourraient être établis, mais la précision de cette méthode est de l'ordre de la vingtaine de centimètres.

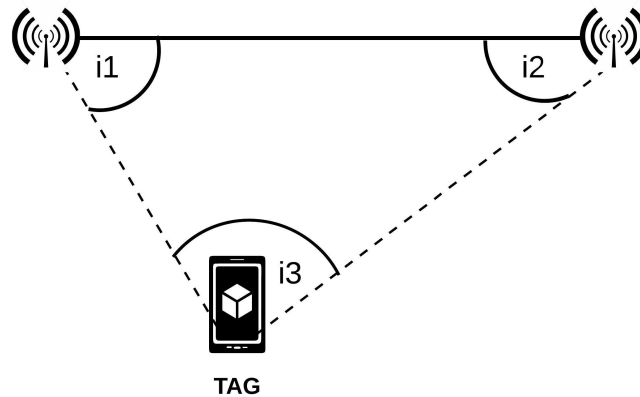


Figure 7: Méthode de calcul de position basée sur les mesures d'angle.

### 7.1.3 Méthodes basées sur des mesures de temps

La méthode TOA, pour Time-of-Arrival est une méthode de localisation qui se base sur la mesure du temps d'arrivée d'un signal à un tag. Ce procédé s'appuie sur le temps de propagation d'un signal, entre l'émission par le tag à l'instant "Ti" et la réception au niveau de l'anchor à l'instant "Tf".

On peut diviser cette méthode en sous-méthodes.

- la méthode One-Way TOA
- la méthode Two-way TOA

Dans cette première configuration le temps de propagation des ondes de chaque anchor peut être corrélé à une distance  $d = c * (T_f - T_i)$ , vis-à-vis du tag où  $c$  est la vitesse de propagation de l'onde dans le l'air. Leur position dans l'environnement étant connue, l'utilisateur se repère alors quelque part sur le cercle de rayon  $d$  et d'origine l'antenne en question. Répéter cette opération pour un minimum de trois anchors permet d'extraire une position en espace 2D (à l'intersection des 3 cercles alors construits). Le procédé est dit de « trilatération ».

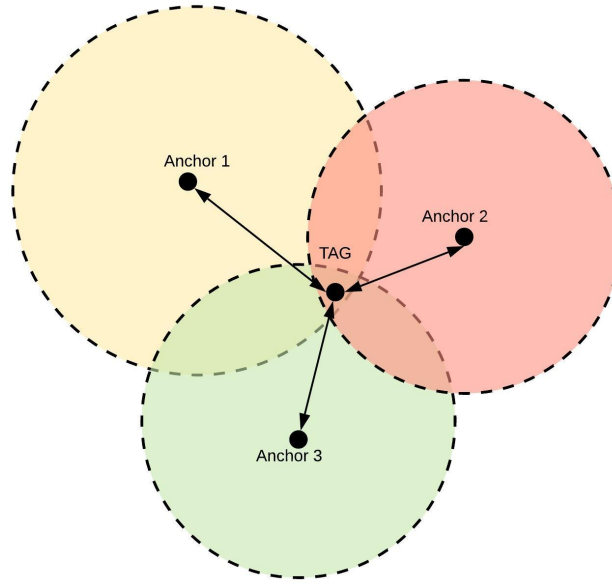


Figure 8: Méthode de calcul de position basé sur le One-way TOA.

Pour la deuxième configuration, nous sommes dans le cas où une anchor envoie un message et l'anchor réceptrice lui retransmet des informations en retour. Il y a ici une nécessité de synchronicité de temps entre les nœuds pour ne pas fausser les données.

Nous pouvons prendre comme exemple le cas suivant :

- L'anchor envoie un message au tag et enregistre à quel temps le message est transmis ( $T_i$ )
- Le tag reçoit le message et le renvoi une réponse à l'anchor.
- L'anchor enregistre le temps du moment de la réception du message retourné ( $T_f$ )
- L'anchor calcule la différence de temps qui correspondra au temps de l'aller-retour du message ( $T = T_f - T_i$ )
- L'anchor en déduit la distance ( $d$ ) connaissant la vitesse de propagation dans l'air du message ( $c$ )
- $d = c * T/2$

Ces méthodes sont encore une fois précises, mais nécessitent qu'il n'y ait pas d'obstacle entre les anchors et le tag. De plus, dans la deuxième méthode il est nécessaire d'avoir une synchronicité entre les anchors (nœuds).

#### 7.1.4 Méthodes basées sur des mesures de différences de temps

La méthode TDOA, pour Time-Difference-of-Arrival est une méthode de localisation qui se base sur la mesure de la différence des temps d'arrivées d'un signal à des anchors. Ce procédé est très similaire aux méthodes de ToA, mais permet de s'affranchir de la synchronisation temporelle entre émetteur et récepteur, toutefois la synchronisation temporelle entre les anchors doit demeurer extrêmement précise. En pratique une anchor maîtresse est donc en charge de communiquer son horloge aux autres anchors à proximité. Par la suite le tag émet à intervalles réguliers de courts messages diffusés en broadcast. La différence entre

les temps d'arrivée du signal au couple de capteurs traduit une différence de distance entre l'objet à localiser et ce même couple. Celui-ci se situe alors sur une hyperbole ayant pour foyer les deux récepteurs. Sa position exacte est finalement obtenue après réitération du processus, à l'intersection des hyperboles construites.

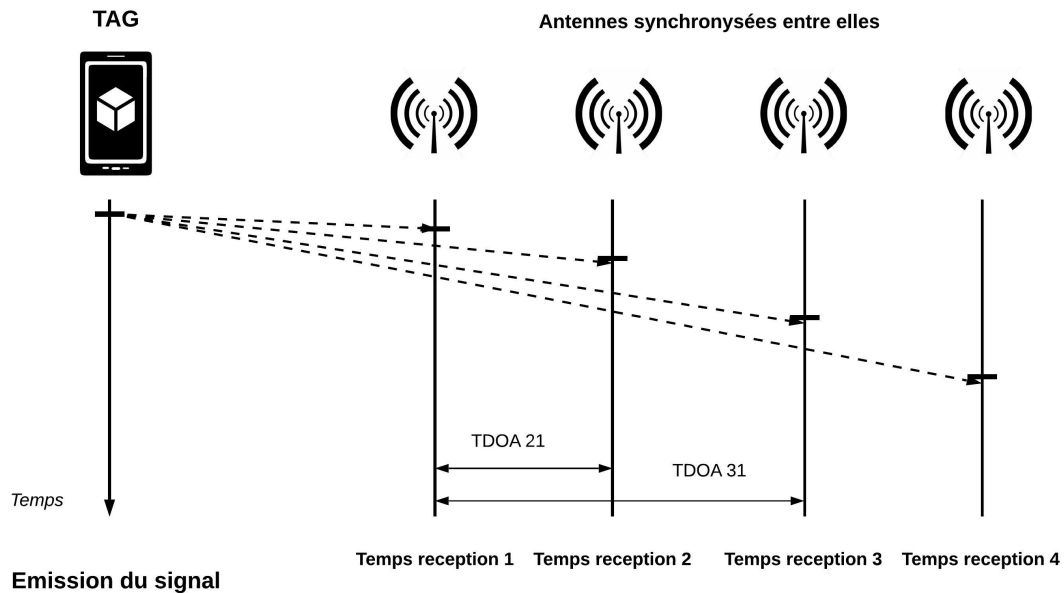


Figure 9: Méthode de calcul de position basée sur le TDOA.

## 7.2 Méthodes range-free

Plus économique du point de vue du matériel que les méthodes range-based, les méthodes range-free se basent sur toutes les informations de connectivité en lien avec la portée radio. Elle ne nécessite donc pas l'achat supplémentaire d'anchor par exemple. Il en existe deux principales méthodes : DV-hop et l'intersection des signaux.

### 7.2.1 Méthode DV-hop

La méthode DV-hop pour distance vecteur hop est la méthode la plus courante dans la famille des méthodes range-free. Cette technique se base sur le nombre de sauts séparant les noeuds d'un réseau. Prenons l'exemple suivant : Nous avons ici trois tags et trois anchors, à l'aide d'un protocole de diffusion chaque anchor va diffuser sa position à tous les tags. L'anchor 1 connaîtra donc la position des anchors 2 et 3 et elle sera aussi qu'elle est à trois sauts de ces dernières. À partir de là toutes les anchors vont calculer la distance moyenne par saut, moyenne qui sera utilisée comme étalon de distance pour les sauts de tous les autres noeuds et on pourra ainsi trouver la position d'un tag par rapport aux anchors qui l'entoure. Il faut savoir que cette technique est très peu précise, on parle d'ici d'une marche d'erreur de 30 pour cent.

### 7.2.2 Méthodes d'intersection de signaux

Nous avons ici une multitude d'anchors formant une zone de localisation. Chaque anchor va connaître les anchors avoisinantes, leur position et leur portée. Le tag pourra ainsi évoluer parmi les anchors et sa position sera trouvée par l'intersection deux ou trois anchors les plus proches. Cette technique est assez précise bien que la précision varie selon la portée

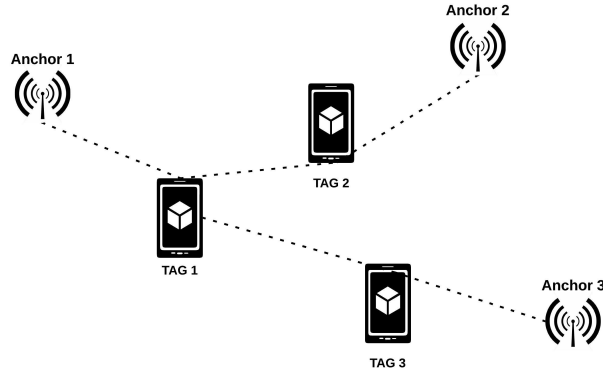


Figure 10: Méthode DV-hop

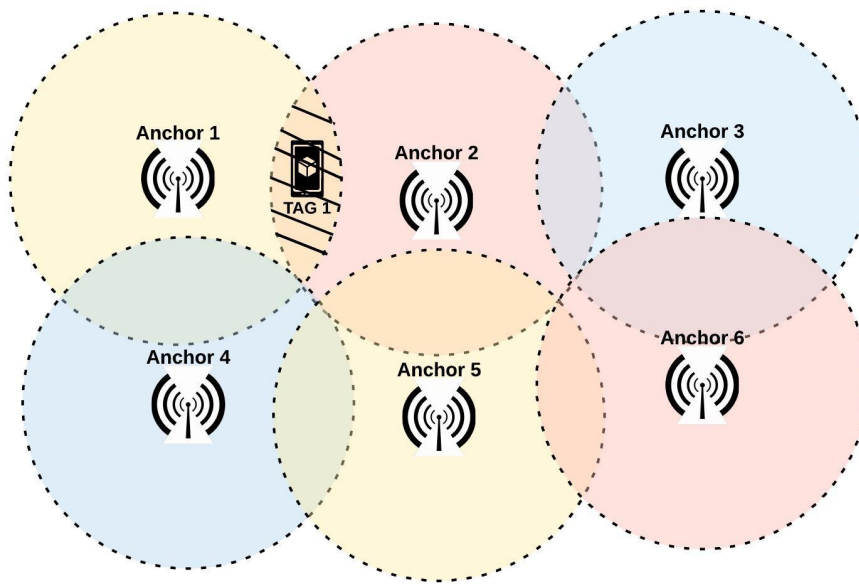


Figure 11: Méthode DV-hop

des anchors ainsi que leur nombre dans la zone de détection.

### 7.2.3 Élargissement

Bien évidemment, il existe d'autres méthodes range-based même si la grande majorité d'entre elles restent théoriques. Avec l'évolution actuelle, des puissances de calcul et le développement des algorithmes de machine-learning de nouvelles méthodes voient le jour combinant les méthodes précédemment avec une analyse plus précise du réseau.

Pour finir, je listerai d'autres méthodes range-free :

- Amorphous Algorithm
- APIT
- CLA

## 8 Choix de la technologie et de la méthode pour PROSE

Après avoir énuméré les différentes technologies et méthodes existantes d'indoor positioning nous avons sélectionné celle qui sera la plus adaptée à notre projet et à nos contraintes.

### 8.1 Contraintes liées à notre projet

Notre projet consiste comme vu précédemment en la création d'un robot basé sur la carte électronique STM32MP157 MPU capable d'être localisable en intérieur.

La première contrainte a été la contrainte matérielle. En effet, afin de réaliser le robot, il nous a été fourni un châssis pour la carte ainsi que des moteurs, des roues et différents capteurs. Cependant, l'absence de compteur incrémental a rendu impossible toute utilisation d'estimation de position grâce à des relevés de données sur les moteurs. Ces moteurs sont aussi amenés à se dérégler très facilement lors d'un mouvement de rotation, or il nous a été demandé que le robot puisse être capable d'aller en un endroit spécifique, ce dérèglement rend donc encore plus compliquée l'obtention de la meilleure précision possible.

La deuxième contrainte a été la contrainte budgétaire. Comme nous avons pu voir lors de la partie 7, il existe de nombreuses technologies, mais elles sont plus ou moins chères. Or pour ce projet nous ne pouvions acheter d'autres matériels que celui qui nous avait été fourni initialement, et ce notamment pour des raisons de délais de livraison, rendant impossible l'utilisation de hardware non disponible au sein de notre établissement.

La troisième contrainte a été la contrainte de temps. Le projet ProSE est étalé sur 5 mois, cependant cette période comprend plusieurs semaines de recherche, de spécification et de conception papier réduisant de ce fait le temps de développement logiciel. C'est la raison pour laquelle nous ne pouvions implémenter de méthodes poussées. Le développement s'est dès lors orienté vers l'adaptation de méthodes déjà existantes et open sources. De plus, la carte électronique utilisée venait d'être commercialisée, de ce fait très peu de documentation était à notre disposition et aucun système de crosscompilation n'était disponible. Nous devions donc développer nous-mêmes un système ce type réduisant notre temps de développement logiciel.

Ces trois grandes contraintes nous ont réduit notre choix d'utilisation de technologies et de méthodes, les possibilités restantes seront étudiées dans la partie suivante.

### 8.2 Technologies et méthodes implémentables dans le cadre de notre projet

Si l'on met de côté les contraintes qui nous sont imposées, toutes les technologies et méthodes sont compatibles avec la STM32MP157 MPU. Cependant la contrainte budgétaire ne nous permet pas d'acheter d'autre matériel. Ainsi les technologies basées sur l'imagerie sont impossibles surtout dans le cas de l'IR avec l'utilisation de capteurs LIDAR bien trop coûteux. L'achat de beacons BLE ou encore d'émetteur-récepteur UWB est aussi impossible. Pour ce qui est de l'ultrason ou de l'étude des champs magnétiques, l'achat de composant est inévitable.

C'est donc vers des hardwares que nous avons mis place au sein de l'ESEO que nous nous sommes tournés, à savoir des Raspberry Pi 3. Ayant une connectivité Wi-Fi et Bluetooth intégrés, cette carte nous laisse donc le choix entre deux technologies.

Pour ce qui est du choix de méthode de localisation en intérieure il nous a été conseillé d'adapter des méthodes open source. La majorité des méthodes Wi-Fi et Bluetooth étant range-based nous avons mis de coté les range-free.

Afin de mettre en place dans les plus brefs délais une méthode de localisation, nous avons décidé d'utiliser la méthode la plus rapidement implémentable. Compte tenu du faible nombre de calculs et de sa facilité de mise en place, nous nous sommes tournés vers une méthode RSSI basée sur la puissance des signaux reçus.

### 8.3 Technologie et méthode retenue pour être implémentée

Après diverses recherches sur des méthodes open sources Wi-Fi et/ou Bluetooth la méthode la plus rapidement implémentable est basée sur du Wi-Fi. Elle utilise une méthode de fingerprinting RSSI, méthode qui sera définie plus loin. La présence au sein de notre établissement du matériel nécessaire a aussi été un facteur de choix.

Dans cette méthode nous utilisons la puissance du signal Wi-Fi reçu (RSSI) par un récepteur depuis un émetteur en décibels (dB).

Le principe est le suivant, nous disposons dans une zone souhaitée à savoir la zone de détection trois émetteurs de signaux Wi-Fi. Voir l'illustration ci-dessous.

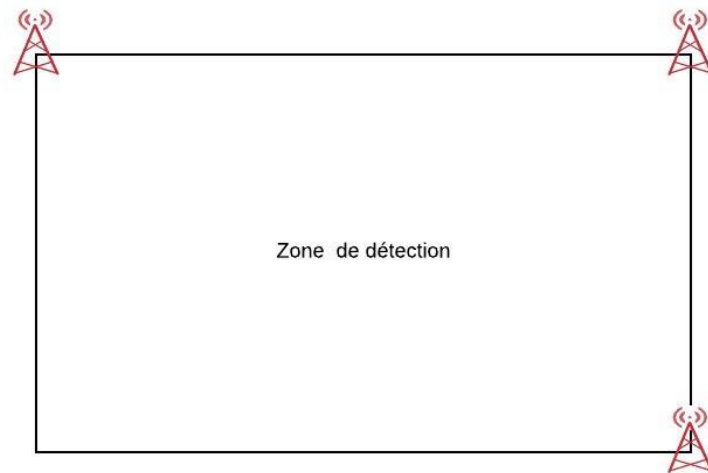


Figure 12: Zone de détection et disposition des émetteurs.

Une fois la zone de détection mise en place nous pouvons passé à l'étape de fingerprinting. Il va s'agir ici d'effectuer un relevé des 3 puissances émissent par les trois antennes en différents points, représentés en rouge sur la figure ci-dessous. Ceci nous permettra de lier un point de coordonnées  $(x,y)$  à un triplet de puissances  $(dB^1, dB^2, dB^3)$ . Ces différents points seront ensuite inscrits dans une base de données.

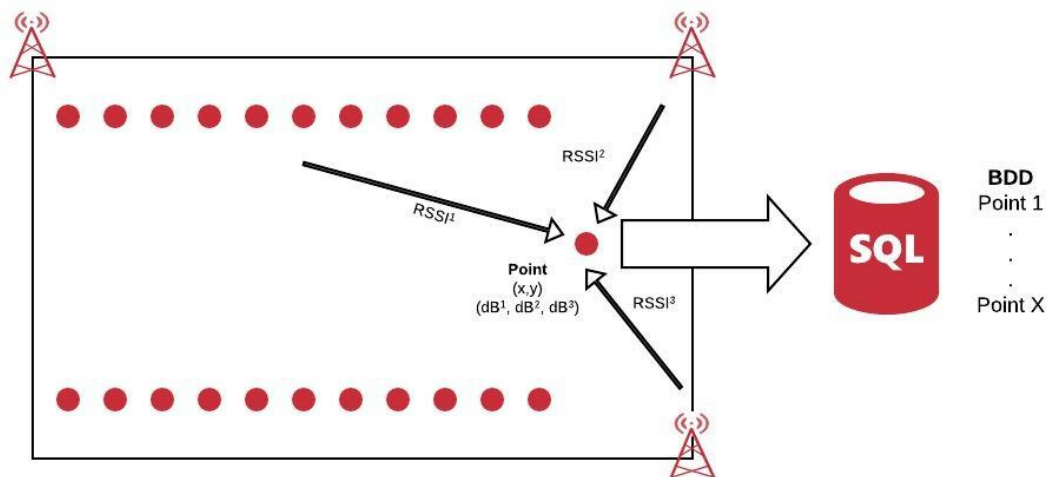


Figure 13: Principe d'acquisition des données des points de la zone de détection.

La base de données étant mise en place nous pouvons passer à l'étape d'estimation de la position d'un objet. Afin d'obtenir une estimation de sa position, un objet devra effectuer un relevé des puissances éminent par les 3 antennes pour former un triplet de puissances ( $dB^1, dB^2, dB^3$ ). Ce triplet de puissance va être ensuite être passé en paramètre de la l'algorithme de comparaison qui en utilisant la base de données précédente renverra une estimation de la position de ce dernier. Voir l'illustration ci-dessous.

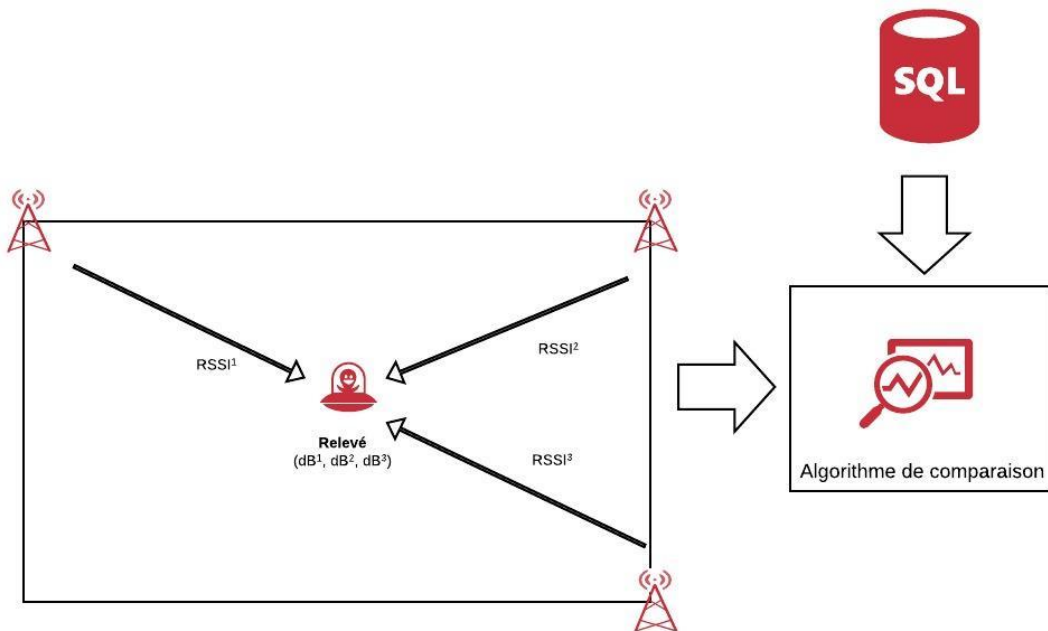


Figure 14: Principe d'estimation de position d'un point.

## 8.4 Objectif

Notre objectif est ici d'adapter la précédente méthode à notre projet actuel.

Le rôle des émetteurs de signaux Wi-Fi sera rempli par 3 Raspberry Pi 3, matériel présent au sein de notre établissement et disponible pour notre projet. La zone de détection sera dans notre cas une zone vide, sans objets pour éviter toutes perturbations électromagnétiques, et d'une dimension de 8 m par 8 m.

Concernant la partie de fingerprinting un relevé sera effectué tous les 1 mètre, distance idéale compte tenu de la précision de cette méthode. Notre zone sera donc composée de 64 points de relevés nous donnant 64 positions potentielles. Le relevé des puissances en ces points devra être fait en amont avec le microcontrôleur du robot à localiser afin de garantir la bonne correspondance entre les valeurs de la base de données et celles qui seront passées en paramètre de l'algorithme de comparaison.

Pour la phase de détection, le robot évoluera dans la zone de détection et effectuera à intervalles réguliers des relevés des puissances reçues formant ainsi un triplet, triplet qui sera utilisé par l'algorithme de comparaison et qui renverra à l'utilisateur une estimation de la position du robot à un temps donné via une application tierce. La figure ci-dessous illustre l'application de la méthode à notre projet.

Nous avons voulu choisir une méthode qui était rapide à implémenter mais qui ne très peu dépendante des interférences lumineuses et/ou d'environnement. Avec cette méthode nous espérons pouvoir localiser le robot avec une précision d'un mètre, dimension correspondant à la distance entre chaque relevé lors de la phase de fingerprinting.



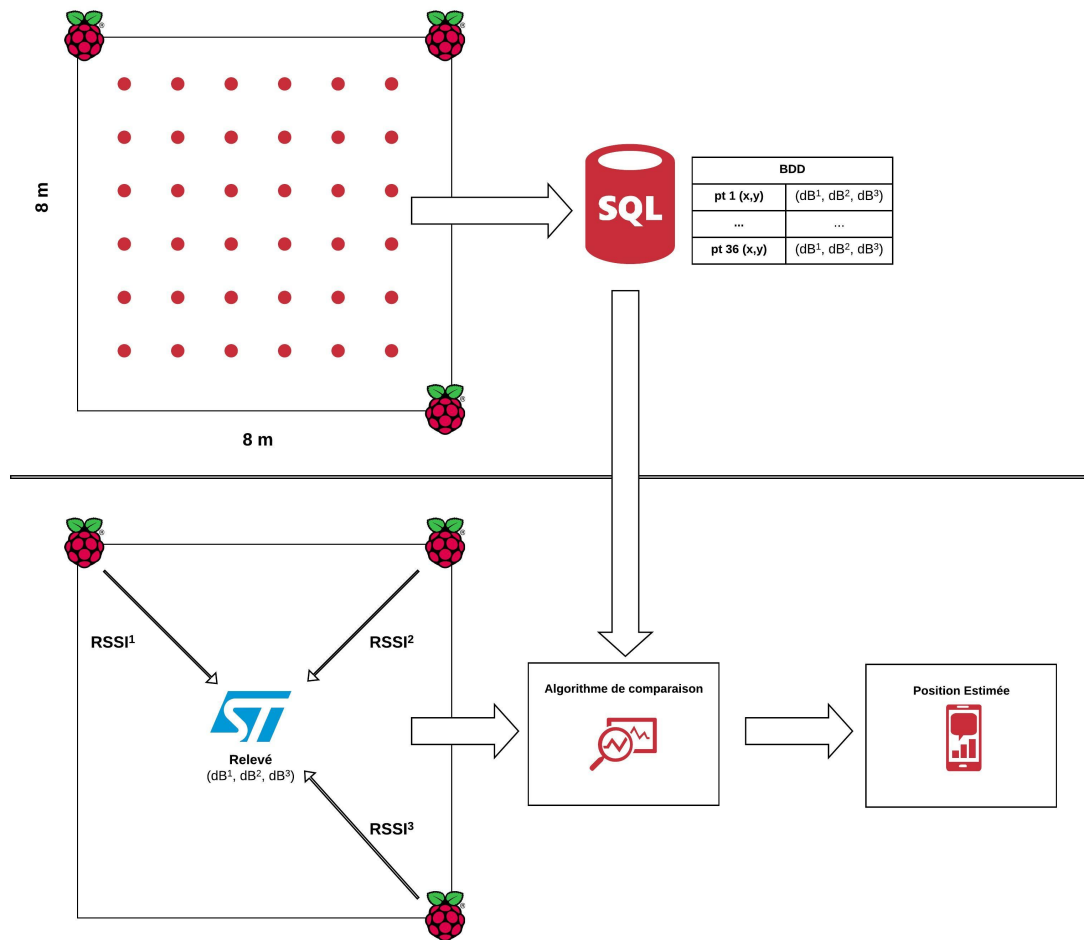


Figure 15: Application de la méthode de fingerprinting RSSI Wi-Fi à notre projet.

## 9 Conclusion

Pour conclure, la géolocalisation en intérieur est un domaine en pleine expansion. Répondant à de nombreuses problématiques actuelles et futures, sa nécessité croissante dans différents domaines fait d'elle une des cibles majeures des géants du numérique.

Après avoir mis en lumière différentes technologies d'indoor positioning, qu'elles soient basées sur les ondes radiofréquence ou sur l'imagerie, et différentes méthode de positioning, range-based ou range-free, il était plus aisé de choisir celle qui serait la plus à même à répondre aux attentes de notre projet.

Devant faire face à diverses contraintes, qu'elles soient matérielles, budgétaires ou temporelles, nous avons choisi une technologie basée sur les ondes radiofréquences et une méthode range-based.

Cette méthode de fingerprinting RSSI, pour la partie range-based, et Wi-Fi, pour la partie onde radiofréquence, vue dans la partie précédente, se décompose en 3 étapes :

- Mise en place de la zone de détection
- Création d'une base de données par fingerprint
- Estimation de la position par comparaison

## 10 Bibliographie

### References

- [1] Ramon F. Brena, Juan Pablo García-Vázquez, Carlos E. Galván-Tejada, David Muñoz-Rodríguez, Cesar Vargas-Rosales, and James Fangmeyer Jr. *Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey*. Alberto J. Palma, 2017.
- [2] Qi Liu, Jiahui Qiu, Yi Chen. *Research and Development of Indoor Positioning*. China Unicom Network Technology Research Institute, 2016.
- [3] Luca Mainetti, Luigi Patrono, Ilaria Sergi. *A Survey on Indoor Positioning Systems*. University of Salento, 2014.
- [4] Jaewoo Chung, Matt Donahoe, Chris Schmandt, Ig-Jae Kim, Pedram Razavai, Mi-caela Wiseman. *Indoor Location Sensing Using Geo-Magnetism*. MIT Media Laboratory, 2011.
- [5] Yuwei Chen, Jingbin Liu, Antonni Jaakkola, Juha Hyypä, Liang Chen, Tang Jian, Hannu Hyypä, Ruizhi Chen. *Knowledge-based Indoor Positioning Based on LiDAR Aided Multiple Sensors System for UGVs*. IEEE, DOI 10.1109/PLANS.2014.6851364, 2014.
- [6] Arash Habibi Lashkari, Behrang Parhizkar, Mike Ng Ah Ngan. *WIFI-Based Indoor Positioning System*. Second International Conference on Computer and Network Technology, 2010.
- [7] Rejina Wei Choi Ling, Ankur Gupta, Ankush Vashistha, Manmohan Sharma, Choi Look Law. *High Precision UWB-IR Indoor Positioning System for IoT Applications*. Nanyang Technological University, 2018.
- [8] Ankush A. Kalbandhe , Shailaja.C.Patil. *Indoor Positioning System using Bluetooth Low Energy*. Savitribai Phule Pune University, 2016.
- [9] Martin Werner, Moritz Kessel, Chadly Marouane. *Indoor Positioning Using Smartphone Camera*. Ludwig-Maximilians-University, 2011.
- [10] S. J. Ingram, D. Harmer, M. Quinlan. *Ultra-wideband Indoor Positioning Systems and their use in Emergencies*. Thales Research and Technology (UK) Ltd., 2004.
- [11] Trong-Hop Do, Myungsik Yoo *TDOA-based indoor positioning using visible light*. IEEE, DOI 10.1007/s11107-014-0428-4, 2014.
- [12] Réjane Dalcé, Linqing Gui, Thierry Val, Adrien Van den Bossche, Anne Wei. *Localisation par méthodes "range-based" et "range-free" de stations mobiles communicantes dans un réseau sans fil*. Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles, 2011.
- [13] Klaithem Al Nuaimi, Hesham Kamel. *A Survey of Indoor Positioning Systems and Algorithms*. Faculty of Information Technology (FIT) United Arab Emirates University, 2011.
- [14] Mohammad Reza Gholami. *Positioning Algorithms for Wireless Sensor Networks*. Chalmers university of technology, 2011.
- [15] Ha. Nguyen Thi, Khanh. Ngo Tan Vu. *A Positioning Algorithm in the Internet of Things*. IEEE, DOI 10.1109/ICUFN.2016.7537102, 2016.

- [16] Yogita Chapre , Prasant Mohapatra , Sanjay Jha, Aruna Seneviratne. *Received Signal Strength Indicator and Its Analysis in a Typical WLAN System (Short Paper)*. University of New South Wales, 2013.
- [17] Trong-Hop Do, Junho Hwang, Myungsik Yoo. *TDoA Based Indoor Visible Light Positioning Systems*. Soongsil University, 2013.
- [18] JingYi Yang, Ming Yan. *Implementation of UWB indoor location and distance measurement based on TOF algorithm*. Communication University of China, 2018.
- [19] Hongji Huang, Hongli Chen, Shuoya Cheng and Fei Li. *An Improved DV-HOP Algorithm for Indoor positioning Based on Bacterial Foraging Optimization*. Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [20] Decawave. *APS003 APPLICATION NOTE REAL TIME LOCATION SYSTEMS*. Decawave Limited, 2014.
- [21] Decawave. *DW1000 Datasheet*. Decawave Limited, 2015.
- [22] GPS History: The Evolution of Global Positioning.  
<https://tedium.co/2018/01/11/gps-history-evolution/>
- [23] Global Positioning System - History of Global Positioning  
<http://www.softschools.com/inventions/history/GPS>
- [24] What is Indoor Positioning Systems?  
<https://senion.com/indoor-positioning-system/>
- [25] How An Indoor Positioning System Works.  
<https://www.airfinder.com/blog/indoor-positioning-system>
- [26] IEEE.  
<https://www.ieee.org/>
- [27] Research Gate.  
<https://www.researchgate.net>