



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse - Jean Jaurès

---

**Présentée et soutenue par :**

**THELJEUI Adel**

**le** mardi 14 novembre 2017

**Titre :**

SYSTEME HYBRIDE DE LOCALISATION DES PERSONNES AGEES DANS UN  
HABITAT INTELLIGENT

---

**École doctorale et discipline ou spécialité :**

ED MITT : Domaine STIC : Réseaux, Télécoms, Systèmes et Architecture

**Unité de recherche :**

Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT)

**Directeur/trice(s) de Thèse :**

Pr. VAL Thierry

**Jury :**

Mme Nawrès KHLIFA, Université Tunis ElManar, Rapporteur

M. Michel MISSON Université de Clermont, Rapporteur

M. Damien BRULIN, Université Toulouse - Jean Jaurès, Co-Directeur de thèse

M. Najeh NASRI, Ecole Nationale d'Ingénieur de Sfax, Co-Directeur de thèse

*« Certes, il y'a des travaux pénibles; mais la joie de la réussite n'a-t-elle pas à compenser nos douleurs ? »*

*Jean de la bruyère*

# ***Dédicaces***

*Je ne saurais trouver les mots qu'il faut  
pour exprimer ma gratitude, mon amour, ma reconnaissance...*

*C'est tout simplement que je dédie cette thèse :*

***A mon père MOSBAH et ma mère GHALYA***

*Qui m'avez toujours poussé à suivre mes études supérieures.  
Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés,  
le fruit de vos innombrables sacrifices que vous avez tant consentis  
pour mon instruction et mon bien être .....*

***A mes deux fils YOUSSEF & ADEM***

*à vous mes adorables anges, ma joie, mon petit trésor  
vous resterez pour toujours le rayon du soleil qui égaye ma vie  
Je vous souhaite, de tout mon être, la prospérité et la réussite.*

***A mon âme sœur et la lumière de mon chemin, mon épouse SOUMAYA***

*Tes sacrifices, ton soutien, ta gentillesse sans égal, ton profond attachement m'ont permis de réussir ce long parcours de thèse.*

***A toute ma famille et à tous mes amis***

*Pour la force retirée de notre éminente et chaleureuse union.*

# ***Remerciements***

*Certes, la rédaction de ce mémoire est l'une des tâches les plus pénibles que j'ai eu à accomplir pendant ces quatre années de thèse, mais cette page de remerciements constitue, sans aucun doute, l'étape la plus difficile et qui a pris plus d'effort et d'attention de ma part compte tenu du respect que j'éprouve à l'égard de tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la bonne fin de cette thèse . . . . .*

*Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de cette thèse, Pr Thierry VAL, pour m'avoir guidé, encouragé, conseillé tout au long de mon parcours de thèse. Monsieur, vous avez réussi à m'inspirer, à me donner confiance en moi et à me donner l'envie d'apprendre. Merci de m'avoir montré les clés du succès : avoir confiance en soi et en ses capacités, croire en soi et toujours tenter de se dépasser. Merci !*

*Mes remerciements vont aussi au Dr Damien BRULIN et au Dr Najeh NASRI qui ont dirigé et encadré mes travaux. Merci à Damien pour ses précieux conseils et sa disponibilité, et à Najeh pour son enthousiasme et sa passion.*

*Je remercie chaleureusement tout le personnel de l'IUT, chefs de département, personnels, enseignants, ainsi que tous les membres du laboratoire de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT), qu'ils soient permanents, thésards ou stagiaires, que j'ai eu beaucoup de plaisir à côtoyer durant ces quatre dernières années : Réjane, Asma, Sabri, Chiraz, Mathilde, Haïfa, Mahamad, Ibrahim, Sami, Abdelfatah, . . .*

# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 Généralités sur la localisation indoor</b>	<b>4</b>
1.1. Introduction	4
1.2. Rappel sur les principaux systèmes de localisation outdoor	4
1.2.1. Le GPS .....	4
1.2.2. GLONASS.....	7
1.2.3. GALILEO.....	7
1.2.4. Le SONAR .....	8
1.2.5. Le RADAR.....	8
1.3. Processus de localisation indoor	9
1.4. Métriques de localisation	10
1.4.1. Puissance du signal reçu (RSS ou RSSI).....	10
1.4.1.1. Modèle de propagation en espace libre "Free space model".....	10
1.4.1.2. Modèle à deux rayons "Two-ray ground reflection model".....	11
1.4.1.3. Modèle à zones d'ombre "Shadowing model".....	12
1.4.2. Mesure du temps d'arrivée /vol (ToA/ToF).....	13
1.4.3. Mesure de la différence du temps d'arrivée (TDoA).....	13
1.4.4. Mesure de l'angle d'arrivée (AoA).....	14
1.5. Algorithmes généraux de localisation indoor	15
1.5.1. La triangulation.....	15
1.5.2. La trilatération.....	16
1.5.3. iRingLA.....	18
1.5.4. La multilatération.....	20
1.5.5. La méthode des signatures (Fingerprinting).....	20
1.5.6. Autres algorithmes de localisation.....	21
1.5.6.1. Approche probabiliste.....	21
1.5.6.2. Cadre englobant (Méthode Min-max):.....	22
1.5.6.3. Position Centrale.....	23
1.6. Exemple de systèmes de localisation	23
1.6.1. Localisation par ondes radio.....	23
1.6.1.1. RFID.....	24
1.6.1.2. WiFi (IEEE 802.11).....	24
1.6.1.3. Bluetooth.....	26

1.6.1.4.	Bluetooth Low Energy .....	26
1.6.2.	Localisation par ondes acoustiques .....	26
1.6.3.	Localisation par signaux infrarouge.....	27
1.6.4.	Localisation par Ultrasons.....	28
1.6.5.	Localisation par lumière visible.....	30
1.7.	Conclusion	31
<b>Chapitre 2</b>	<b>Systèmes Hybrides de Localisation Indoor</b>	<b>33</b>
2.1.	Introduction	33
2.2.	Critères d'évaluation des performances des systèmes de localisation	33
2.2.1.	Erreur de localisation .....	34
2.2.2.	Notions de Répétabilité et de Reproductibilité d'une mesure .....	34
2.2.3.	Précision et Exactitude dans un système de localisation .....	35
2.3.	Comparaison des performances des systèmes de localisation existants	37
2.3.1.	Comparaison des métriques de localisation.....	37
2.3.2.	Comparaison des techniques de localisation .....	38
2.3.3.	Comparaison des technologies de localisation.....	38
2.4.	Hybridation : Amélioration des performances des systèmes de localisation	40
2.4.1.	Hybridation lâche : Système Hybride GPS/WLAN.....	40
2.4.2.	Hybridation serrée.....	42
2.4.2.1.	Localisation hybride par fusion des techniques ToA, TDoA et RSSI.....	42
2.4.2.2.	Localisation Hybride ToA/AoA.....	43
2.4.2.3.	Localisation Hybride Ultrason/radio.....	43
2.5.	Indicateurs de précision pour une hybridation serrée	44
2.5.1.	Indicateurs de précision liés à l'emplacement des balises.....	45
2.5.1.1.	DOP de GPS .....	45
2.5.1.2.	Généralisation du DOP du GPS en indoor .....	48
2.5.2.	Indicateurs de précision liés aux propriétés des technologies de localisation .....	49
2.6.	Conclusion	51
<b>Chapitre 3</b>	<b>Approche proposée : Système de localisation Hybride Audio- Radio-Lumière</b>	<b>52</b>
3.1.	Introduction	52
3.2.	Cahier des charges	52
3.3.	Système de localisation hybride proposé	54
3.3.1.	Rappel sur le rejet des données aberrantes ( <i>Outlier Removal</i> ).....	54
3.3.2.	Sous-système de localisation audio.....	55
3.3.2.1.	Hypothèses.....	56

3.3.2.2.	Principe du sous-système audio proposé.....	58
3.3.3.	Sous-système de localisation radio .....	67
3.3.3.1.	Hypothèses.....	68
3.3.3.2.	Phase Offline : Calibrage des paramètres radio.....	69
3.3.3.3.	1ème phase : Ranging.....	72
3.3.3.4.	2ème phase : Positioning.....	73
3.3.4.	Sous-système de localisation lumière .....	74
3.3.4.1.	Composantes du sous-système.....	74
3.3.4.2.	Principe de localisation LiFi.....	75
3.3.4.3.	Estimation des coordonnées de la cible .....	76
3.4.	Approche d'hybridation proposée.....	79
3.4.1.	DOP Audio.....	80
3.4.1.1.	DOP_audio-RANGING.....	81
3.4.1.1.	DOP_audio POSITIONING.....	82
3.4.1.	DOP BLE.....	84
3.4.1.1.	DOP_BLE-RANGING.....	85
3.4.1.1.	DOP_BLE-POSITIONING.....	85
3.4.1.	DOP LiFi .....	87
3.5.	Conclusion.....	87
<b>Chapitre 4</b>	<b>Validation de l'approche d'hybridation proposée</b>	<b>88</b>
4.1.	Introduction.....	88
4.2.	Prototype expérimental.....	88
4.3.	Evaluation des performances des sous-systèmes de localisation indoor.....	92
4.3.1.	Sous-système de localisation audio.....	92
4.3.1.1.	Phase de ranging.....	92
4.3.1.2.	Phase de positioning.....	97
4.3.2.	Sous-système de localisation BLE.....	100
4.3.2.1.	Phase de calibrage offline.....	100
4.3.2.2.	Phase de ranging.....	100
4.3.2.3.	Phase de positioning.....	102
4.4.	Validation de l'approche d'hybridation proposée.....	105
4.5.	Conclusion.....	110
<b>Chapitre 5</b>	<b>Conclusion et Perspectives</b>	<b>111</b>

# Table des figures

Figure 1.1- Positionnement GPS.....	5
Figure 1.2- Erreur de multi-trajets .....	6
Figure 1.3- Processus de localisation (AMUNDSON et al., 2009).....	9
Figure 1.4- Modèle de base de propagation radio(FAHS, 2009).....	11
Figure 1.5- Modèle à deux rayons (FAHS, 2009).....	12
Figure 1.6- Différence de temps d'arrivée (TDoA) .....	14
Figure 1.7- Mesure par triangulation .....	16
Figure 1.8- Mesure par Trilatération.....	17
Figure 1.9- Problème de Trilatération.....	18
Figure 1.10- Déroulement d'iRingLA, figure inspirée des travaux de (DALCE, 2013).....	19
Figure 1.11- Approche probabiliste (RAMADURAI et al., 2003) .....	22
Figure 1.12- Approche du cadre englobant.....	23
Figure 1.13- Active BAT, figure inspirée des travaux de (TSENG, 1998).....	29
Figure 1.14- Système Active BAT: Les récepteurs ultrasons, figure inspirée des travaux de(TSENG, 1998).....	29
Figure 1.15- Transmission des données par la technologie LiFi.....	31
Figure 2.1- Précision vs Exactitude .....	36
Figure 2.2- Système hybride de localisation GPS/WLAN, figure inspirée des travaux de(REYERO et al., 2008).....	41
Figure 2.3- Un nœud Cricket, figure inspirée des travaux de(BODHI, 2005).....	43
Figure 2.4- La TDOA dans le système Cricket.....	44
Figure 3.1- Architecture de l'approche proposée.....	53
Figure 3.2- Réseau de quatre microphones disposés en L .....	58
Figure 3.3- Différence de temps d'arrivée (TDoA) .....	59
Figure 3.4- Principe du sous-système de localisation audio .....	59
Figure 3.5- Réseau de quatre microphones.....	60
Figure 3.6- Réseau de deux microphones .....	61
Figure 3.7- Localisation d'une sonore par un réseau de 4 microphones .....	64
Figure 3.8- Angle que fait D2 avec l'axe des abscisses.....	66
Figure 3.9- Schéma de localisation radio proposé .....	68
Figure 3.10- Principe de calibrage dynamique, figure inspirée des travaux de (FERNANDEZ et al., 2007).....	69
Figure 3.11- Localisation BLE : Phase de calibrage dynamique .....	71
Figure 3.12- Localisation BLE : Phase de Ranging.....	72
Figure 3.13- Résolution du problème de trilatération .....	73
Figure 3.14- Schéma proposé pour la localisation LiFi .....	75
Figure 3.15- Lampe LiFi.....	76
Figure 3.16- Intersection de deux faisceaux lumineux .....	77
Figure 3.17- Caractéristiques du faisceau lumineux d'une lampe LED .....	78
Figure 3.18- Localisation d'une cible par un réseau de lampes LED .....	79
<b>Figure 3.19-</b> Approche d'hybridation proposée .....	80
<b>Figure 3.20-</b> Localisation audio par triangulation.....	83
<b>Figure 4.2-</b> Module IOGEAR GBU521.....	90



<b>Figure 4.3-</b> Module audio.....	90
<b>Figure 4.4-</b> Kit d'éducation LiFi développé par la société CAMPUS IP.....	91
<b>Figure 4.5-</b> Expérimentation de la phase ranging audio.....	93
<b>Figure 4.6-</b> Application MATLAB pour l'expérimentation de la phase ranging audio.....	94
<b>Figure 4.7-</b> Estimation de l'angle $\theta$ pour différentes positions de l'onde sonore.....	94
<b>Figure 4.8-</b> Principe de la GCC (KNAPP et al., 1976).....	95
<b>Figure 4.9-</b> Interface MATLAB de comparaison des fonctions de pondération GCC.....	96
<b>Figure 4.10-</b> Comparaison des performances des fonctions de pondération GCC.....	97
<b>Figure 4.11-</b> Application MATLAB pour calcul de la position de la source sonore.....	98
<b>Figure 4.12-</b> Précision du sous-système de localisation audio.....	99
<b>Figure 4.13-</b> Phase ranging : Capture des RSSI BLE.....	101
<b>Figure 4.14-</b> Phase ranging : données aberrantes.....	101
<b>Figure 4.15-</b> Interface MATALB pour la phase positioning BLE.....	103
<b>Figure 4.16-</b> Taux d'erreur de la localisation BLE.....	104
<b>Figure 4.17-</b> Prototype expérimental.....	106
<b>Figure 4.18-</b> Interface MATALB pour localisation indoor hybride.....	107
<b>Figure 4.19-</b> Evaluation des performances de l'approche d'hybridation proposée.....	108
<b>Figure 4.20-</b> Optimisation de la position par l'ajout des DOP.....	109

# Table des tableaux

---

Tableau 1-1: Comparaison des métriques de localisation .....	37
Tableau 1-2: Comparaison des différentes techniques de localisation .....	38
Tableau 1-3: Comparaison des principales technologies de localisation (Indoor et Outdoor) ..	39
Tableau 3-1: Différentes Méthodes GCC .....	63
Tableau 4-1: Positionnement d'une source sonore par triangulation.....	99
Tableau 4-2: Evaluation de la précision de la phase ranging BLE .....	102
Tableau 4-3: Evaluation de la précision de la localisation BLE.....	104
Tableau 4-4: Evaluation des performances de l'approche d'hybridation proposée .....	108

# Glossaire

---

<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification
<b>WiFi</b>	Wireless Fidelity
<b>BLE</b>	Bluetooth Low Energy
<b>LiFi</b>	Light Fidelity
<b>DOP</b>	Dilution of precision
<b>GLONASS</b>	GLObalnaïa NAVigatsionnaïa Spoutnikovaïa Sistéma
<b>SONAR</b>	SOund NAVigation and Ranging
<b>RADAR</b>	RAdio Detection And Ranging
<b>ToA</b>	Time of Arrival
<b>AoA</b>	Angle of Arrival
<b>RSS</b>	Received Signal Strength
<b>ToF</b>	Time of Flight
<b>TDoA</b>	Time difference of arrival
<b>iRingLA</b>	inter Ring Localization Algorithm
<b>CID</b>	Cell Identity
<b>IRR</b>	Inquiry Response Rate
<b>SHMPS</b>	Simultaneous and Hierarchical Multi Positioning System
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>GCC</b>	Generalized Cross-Correlation

# Introduction générale

Depuis le début de l'histoire, la « localisation » a toujours été une nécessité vitale pour nos ancêtres : se situer dans l'espace, localiser leurs proies ou éviter des prédateurs possibles étaient les tâches les plus importantes pour la survie des premiers hommes. Les premières techniques utilisées étaient principalement l'emploi des reliefs naturels (montagnes, vallées, ...) comme « repères ».

Cette notion de « repérage » était au cœur de toutes les techniques de localisation qui en ont découlé par la suite. Les repères terrestres, les astres (étoiles, soleil, lune, ...) ont constitué pour plusieurs siècles la référence la plus utilisée et la plus efficace, surtout pour les navires. En effet, dès le 13<sup>ème</sup> siècle, se servant d'astrolabes, les navigateurs ont pu se situer par rapport à l'étoile polaire. Plus tard, vers le début du 20<sup>ème</sup> siècle, et avec le développement des méthodes de calcul à base de triangulation, plusieurs appareils de mesures ont été inventés à l'instar du système « Radar » qui a été largement utilisé par les militaires pendant la deuxième guerre mondiale.

Vers les années 1950, une nouvelle aire a vu le jour, marquée par l'avènement du système LORAN, le premier système de radiolocalisation qui a révolutionné la notion de localisation. LORAN était à la base d'un autre système introduit vers les années 60 par l'armée américaine comme projet de recherche sur la possibilité de localiser une cible par satellites. Il s'agit du GPS. Actuellement, le GPS exploite un réseau de 24 satellites et a fait ses premières apparitions dans le domaine civil, vers 1986, en s'imposant dans différentes applications telles que la navigation, le transport, les véhicules,...

De nos jours, de nouveaux besoins humains sont apparus, dictés principalement par l'évolution continue de notre vie quotidienne. Il n'est plus seulement question de se localiser à l'extérieur des bâtiments en repérant des lieux ou des monuments par des appareils GPS dédiés. Les besoins ont couvert la localisation dans des lieux fermés comme les hôpitaux, les musées, les supermarchés, voire les habitats qui sont devenus de plus en plus intelligents. En effet, actuellement, les personnes âgées vivant seules sont de plus en plus nombreuses, soit parce qu'elles ont choisi de vivre de manière autonome, soit par manque de place dans les institutions spé-

cialisées. Il devient donc urgent de trouver des solutions leur permettant de continuer à rester chez elles de manière confortable tout en s'assurant de pouvoir les localiser à tout moment. Ces préoccupations sont parmi les sujets de recherche les plus explorés de nos jours. Le but principal de ces recherches est d'exploiter de nouvelles technologies afin d'adapter les habitats aux besoins de ces personnes âgées; les localiser à tout moment éviterait de nombreux accidents domestiques.

Au cours des deux dernières décennies, de nombreux systèmes de localisation à l'intérieur ont été proposés en utilisant différentes technologies telles que la RFID, la vision, WiFi, Bluetooth, Zigbee ....

Le choix de la technologie la plus appropriée, ou une combinaison de certaines d'entre-elles, dépend en particulier de l'application ainsi que des attentes des utilisateurs en termes de couverture, d'évolutivité, d'exactitude et de précision. En effet, en environnements intérieurs, il existe une multitude de défis liés principalement aux phénomènes de réflexion, au bruit, ... Ces défis pourraient affecter différemment la précision de ces technologies de positionnement. Malheureusement, les causes de ces effets négatifs ne peuvent pas être supprimées, mais elles doivent être prises en compte lors de la conception des systèmes de positionnement intérieur.

C'est dans ce contexte de quête d'un système de localisation indoor qui soit à la fois efficace et précis que s'inscrit notre travail de thèse.

En effet, vu le nombre de plus en plus important des systèmes de localisation indoor actuellement proposés, la pression devient de plus en plus importante afin d'assurer plus de précision des résultats retournés. Malheureusement, chaque technologie de localisation possède ses propres caractéristiques qui définissent ses points forts ainsi que ses points de faiblesse. Afin de faire face à ces points de faiblesse, notre idée est de combiner plusieurs technologies ou techniques de localisation, bénéficiant ainsi de leurs avantages tout en minimisant leurs inconvénients : il s'agit d'un système hybride de localisation indoor qui combine trois technologies de localisation indoor différentes ; BLE, Acoustique et LiFi en nous basant sur des observations expérimentales recueillies en temps réel (son, onde BLE, lumière). Or, tout signal se propageant à l'air libre est susceptible à des atténuations qui affectent sa puissance. Ces atténuations sont dues soit à la portée du signal de chaque technologie soit à la disposition géométrique des balises mis

en œuvre. Une étape de filtrage de ces observations est alors indispensable en rejetant celles qui sont susceptibles d'être aberrantes ou non représentatives.

Outre cela, le principe d'hybridation des trois sous-systèmes que nous proposons repose sur la fusion de leurs résultats respectifs via la mise en œuvre de trois nouvelles métriques « DOP-Like » que nous proposons afin d'évaluer le taux de « précision » et « d'exactitude » du résultat de chaque sous-système. Cette évaluation sert à constituer une pondération des résultats intermédiaires afin de calculer le résultat final. En effet, notre objectif est de proposer un système capable à s'adapter aux conditions environnementales tout en améliorant ses performances de façon dynamique.

Le plan du présent mémoire est organisé autour de quatre chapitres. Une revue des différentes techniques et technologies de localisation sera donnée dans le premier chapitre. Nous introduisons ensuite la notion de systèmes hybride de localisation dans le second chapitre. Nous passerons ensuite au détail de notre contribution en introduisant chaque sous-système de localisation à part entière avant de présenter les mécanismes et les paramètres que nous proposons pour la proposition d'un système efficace et précis bâti autour des trois technologies de localisation indoor radio, audio et LiFi. Le dernier chapitre sera consacré à l'évaluation de la fiabilité de notre nouveau système hybride en mettant en pratique les formulations mathématiques de chaque sous-système ainsi que celles des métriques de précision.

# Chapitre 1 Généralités sur la localisation indoor

## 1.1. Introduction

Dans ce chapitre 1, nous commençons par donner un aperçu sur le processus de localisation en explorant ses principales phases, pour passer ensuite à une étude détaillée des systèmes de localisation à l'intérieur des bâtiments (indoor). Une grande partie sera dédiée à la présentation de différents algorithmes, métriques et techniques de localisation indoor. Quelques exemples de ces systèmes seront enfin cités.

## 1.2. Rappel sur les principaux systèmes de localisation outdoor

### 1.2.1. Le GPS

En pleine guerre froide et suite à la demande du président Richard Nixon, l'armée américaine a lancé un projet de recherche sur le repérage à couverture mondiale se dotant d'une grande précision. L'une des premières applications d'un tel système était l'orientation d'un missile sur des centaines de kilomètres. Les études de faisabilité ont commencé alors vers les années 1960. En 1973, le Pentagon alloue un budget à ce projet et le confie au docteur Ivan A. Getting. Il a été renommé le GPS (PARKINSON, 1996) et a été déclaré totalement opérationnel depuis l'année 1995 (LEONARD, 1999).

A vocation militaire initialement, le système GPS est composé de trois segments (KAPLAN, 1996)(PARKINSON, 1996): un segment spatial, un segment de contrôle et un segment utilisateur.

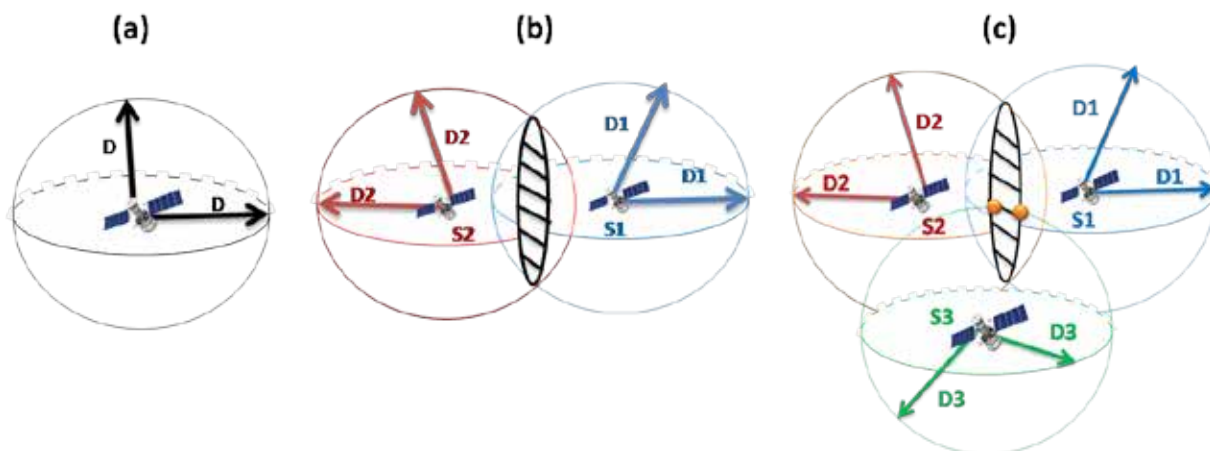
- ✓ Le segment spatial est formé par une constellation de 24 satellites répartis sur 6 orbites inclinées à  $55^\circ$  par rapport au plan de l'équateur. Chaque satellite connaît sa position dans l'espace et l'heure précise à chaque instant. Il transmet en permanence sa position sur l'orbite ainsi que l'heure exacte d'envoi du message.
- ✓ Le rôle du segment de contrôle consiste à enregistrer toutes les données envoyées par les satellites, à calculer les éphémérides et à transmettre des signaux de correction. Ce segment est composé de cinq stations américaines réparties dans le monde : à Hawaï, sur les îles Marshall, sur l'île de l'Ascension, à Diego Garcia et à Colorado

Springs (la station maîtresse). Cette station maîtresse a également pour rôle la détection des dysfonctionnements des satellites ainsi que leur maintenance.

- ✓ Le dernier segment représente le récepteur GPS. Il a pour rôle la mesure de la distance entre le récepteur et les satellites pour en déduire la position de l'utilisateur.

Le principe de localisation GPS repose sur la triangulation :

- ✓ Chaque satellite émet une onde électromagnétique de vitesse connue  $\approx C$  (Célérité de la lumière  $\approx 300\,000\text{ Km/s}$ )
- ✓ le récepteur calcule le temps  $T$  mis par cette onde électromagnétique pour l'atteindre, soit  $T = \text{heure arrivée} - \text{heure envoi onde}$
- ✓ Le récepteur se trouve donc sur une sphère centrée sur le satellite, dit de positionnement, de diamètre  $D$  (**Figure 1.1-a**), tel que  $C = \frac{D}{T} \rightarrow D = C \times T$



**Figure 1.1-** Positionnement GPS

- ✓ En considérant les sphères de positionnement par rapport à deux satellites, le lieu géométrique du récepteur devient un cercle, dit cercle de positionnement (**Figure 1.1-b**)
- ✓ Ainsi, en ajoutant un troisième satellite, on obtient deux points de position possibles du récepteur (**Figure 1.1-c**).
- ✓ Dans le cas où le récepteur GPS se situe sur la surface de la Terre, seul un de ces deux points est cohérent. On peut déduire alors la position exacte du récepteur GPS en



éliminant le point donnant le résultat incohérent. Cette position a pour référence le centre de la terre ECEF<sup>1</sup>.

Les principaux inconvénients du système GPS se résument aux points suivants :

✓ **Trajets multiples (*Multi-path*):**

Souvent, dans les environnements où les satellites et le récepteur ne sont pas en visibilité directe, le signal GPS devient faible. Des obstacles peuvent dévier les ondes émises par les satellites. On parle dans ce cas du problème de multi-trajets. Ceci est particulièrement observé en indoor (bâtiments) et dans des endroits tels que : tunnel, métro, et forêt.

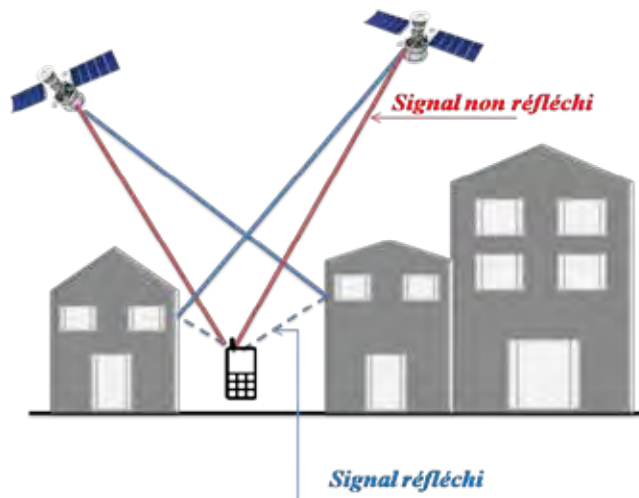


Figure 1.2- Erreur de multi-trajets

✓ **Perturbations des signaux émis par les satellites**

Dans des cas particuliers, les signaux émis par les satellites sont perturbés lors de la traversée de l'ionosphère (couche ionisée entourant l'atmosphère). Cette couche est très sensible à l'activité à la surface du soleil, plus particulièrement les éruptions solaires, ce qui entraîne parfois une interruption totale des communications radio.

---

<sup>1</sup> ECEF: Earth-Centered, Earth-Fixed, système de coordonnées géodésique (Longitude, Latitude, Altitude).

✓ **Effet de la géométrie des satellites**

Souvent, la configuration géométrique de la constellation satellitaire visible pour un récepteur depuis une position donnée et à un instant donné, influe considérablement sur la précision du système de localisation GPS. En effet, en considérant les techniques utilisées pour le calcul de la position du récepteur GPS, relevant généralement de la théorie des ajustements par moindres carrés, la géométrie des satellites peut agir comme un indicateur de la précision du système DOP.

✓ **Absence d'orientation**

Un des inconvénients du système GPS est qu'il ne retourne que l'information sur la position du récepteur GPS sans indiquer son orientation.

### **1.2.2. GLONASS**

GLONASS, est un système de positionnement par satellites initié par les forces spatiales de la Fédération de Russie depuis 1976 (GLONASS, 2010 ) et rendu complètement opérationnel en 1993. Ce système utilise une constellation de 24 satellites (3 en stand-by).

Suite aux difficultés financières qu'a connues la Russie (union soviétique) à la fin des années 90 ainsi que de la durée de vie limitée des satellites (2 à 3 ans), GLONASS a connu une dégradation lente de sa constellation.

Actuellement, GLONASS a été pris en charge par l'autorité russe. Il couvre l'ensemble du globe depuis décembre 2011.

### **1.2.3. GALILEO**

GALILEO est un projet européen pour le déploiement d'un système de positionnement par satellites, à l'instar du GPS, GLONASS, IRNSS<sup>2</sup>et BEIDOU<sup>3</sup>.

GALILEO compte actuellement 30 satellites environ, soit 25 en orbite moyenne et 5 comme rechange. Il est prévu pour être opérationnel vers 2020.

Selon les premières études réalisées sur ce système (MATHIEU et al., 2004), (GALILEO) et comme l'estime Philippe Blatt, le directeur du programme pour le segment "sol de mission"

---

<sup>2</sup> Originaire de l'Inde, comptant actuellement 7 satellites encore en phase de construction

<sup>3</sup> Originaire de Chine, comptant actuellement 3+35 satellites encore en phase de construction

Galileo chez Thalès Alenia Space, "*Galileo aura une résolution de moins d'un mètre pour les services de haute précision et de moins de cinq mètres pour le grand public, alors que celle du GPS est de 15 à 50 mètres*".

#### **1.2.4. Le SONAR**

Le SONAR est un appareil qui a été inventé suite aux travaux de Paul Langevin et de Constantin Chilowski datant de l'année 1917. Il utilise les propriétés de la propagation du son dans l'eau qui est 5 fois plus rapide ( $\sim 1500$  m/s) que dans l'air ( $\sim 300$  m/s) pour des applications de localisation d'objets. Le principe du sonar repose sur le calcul du temps de vol des signaux ultrasons qu'il émet et se reflètent sur des obstacles comme les icebergs ou les sous-marins. Le temps de vol calculé sera à la base du calcul de la distance entre le SONAR et ces objets.

#### **1.2.5. Le RADAR**

Le RADAR est un système qui utilise les ondes électromagnétiques pour la localisation de corps tel est le cas des avions.

Les fondements théoriques du système RADAR datent depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle. En effet, en 1904, l'allemand Christian Hülsmeyer dépose son brevet du «*Telemobiloskop*» où il démontre qu'il est possible de "détecter la présence" d'un bateau dans un brouillard dense et ce en envoyant une onde radio à l'aide d'une antenne multipolaire puis détecter, grâce à une antenne dipolaire, l'onde réfléchi par l'obstacle mais sans pouvoir calculer sa distance.

Le principe du RADAR repose sur l'envoi d'ondes radio par un émetteur. Ces ondes seront réfléchies par la cible. Les ondes retournées seront captées et analysées par un récepteur situé au même endroit que l'émetteur. On peut donc calculer la distance ainsi que la direction de la cible. La distance est calculée en évaluant le temps aller/retour du signal envoyé. La direction est obtenue par effet Doppler grâce à la position angulaire de l'antenne réceptrice ainsi que la vitesse avec le décalage de fréquence du signal de retour.

### 1.3. Processus de localisation indoor

La localisation indoor comme définie dans (DEMPSEY, 2003) est un processus qui permet de localiser en temps réel et de façon continue, un objet ou une personne dans un espace physique (un hôpital, une école, un musée, etc.).

Une autre définition plus succincte est donnée dans (AMUNDSON et al., 2009) et (FRITSHE et al., 2009) indiquant que ce processus comporte généralement deux phases : caractérisation du signal et estimation de la position physique de la cible.

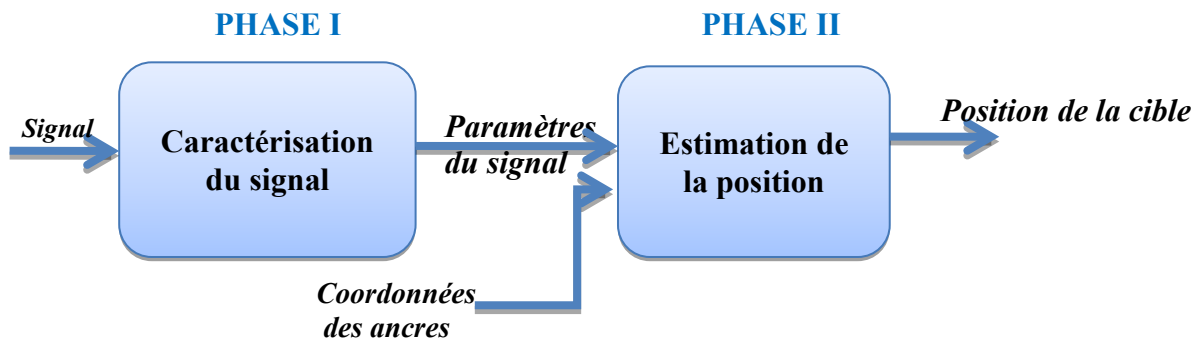


Figure 1.3- Processus de localisation (AMUNDSON et al., 2009)

- **Phase I : Caractérisation du signal**

Durant cette phase, le signal de communication échangé entre la cible et les ancrs de référence est étudié afin d'en extraire toute information utile pouvant servir comme paramètres d'entrée pour la seconde phase. Ces paramètres sont des métriques de caractérisation du signal communiqué. Ils sont soit le temps d'arrivée (ToA), soit la puissance du signal reçu (RSS), soit l'angle d'arrivée (AoA)... Ces métriques seront détaillées dans les paragraphes suivants.

- **Phase II : Estimation de la position**

Durant la seconde phase du processus de localisation, la position de la cible à localiser est déterminée en se basant sur les paramètres du signal extraits pendant la phase I. Plusieurs algorithmes sont employés : triangulation, trilatération, fingerprinting...

## 1.4. Métriques de localisation

Comme annoncé dans le paragraphe précédent, nous introduisons, dans cette section, les principaux paramètres des signaux de communication, extraits durant la première phase du processus de localisation (**Figure 1.3**).

### 1.4.1. Puissance du signal reçu (RSS ou RSSI)

La mesure de la puissance du signal à la réception est la mesure la plus simple et donc la plus populaire pour l'estimation des distances dans le cadre du processus de localisation (BAHL et al., 2000)(PATWARI et al., 2003)(KRISHNAN, 2004)(SUGANO et al., 2006). En effet, ce paramètre du signal est supporté par les normes radio les plus répandues (i.e. IEEE 802.11, IEEE 802.15.4 et Bluetooth par exemple).

Théoriquement, comme l'annonce (HASHEMI, 1993), plus un signal reçu est fort, plus l'émetteur est proche, moins ce signal est puissant plus l'émetteur est éloigné. Ainsi, la perte de puissance entre un émetteur et un récepteur est proportionnelle au carré de la distance entre les deux.

Cependant, la puissance d'un signal à la réception est affectée par au moins trois phénomènes (SRINIVASAN et al., 2006): la dispersion lors de la propagation causée par la présence d'obstacles (*path-loss*), l'évanouissement (*fading*) et les zones d'ombre (*shadowing*). Ainsi, la précision de localisation à base du RSS est d'autant plus fine que la modélisation du canal de propagation est précise. Plusieurs modèles ont été alors proposés afin de modéliser la propagation du signal radio dans un canal de communication (FRIIS, 1946)(RAPPAPORT, 1996)(OBAYASHI, 1998).

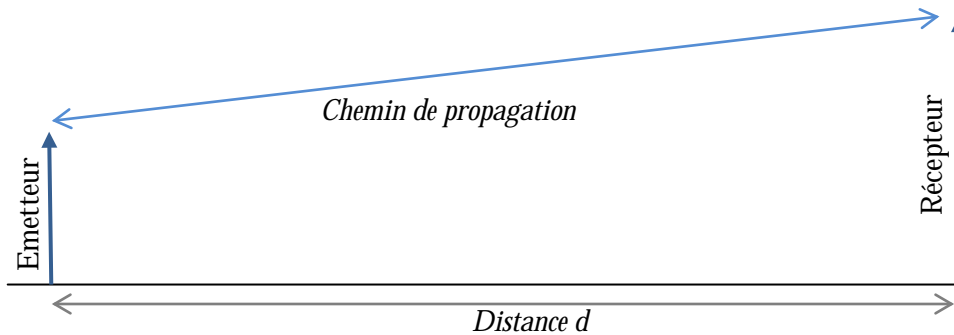
#### 1.4.1.1. Modèle de propagation en espace libre "Free space model"

Dans des conditions idéales (milieu homogène, isotrope et libre de tout obstacle), le modèle de propagation en espace libre d'une onde radio reçue par une antenne est donné par l'équation de FRIIS (FRIIS, 1946):

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t \times G_r \times \frac{1}{L} \times \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (1)$$

avec  $P_t$  est la puissance d'émission,  $P_r$  est la puissance de réception  $G_t$  et  $G_r$  sont les gains respectifs de l'antenne émettrice et de l'antenne réceptrice,  $L$  est la perte du système et  $\lambda$  est la longueur d'onde.

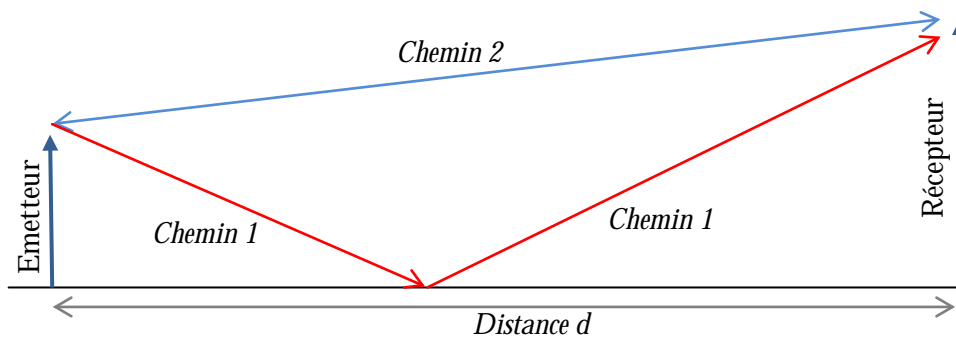
Ce modèle suppose qu'il n'existe qu'un seul chemin de propagation entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice et que les deux antennes se trouvent en vue directe l'une de l'autre (*Line of Sight*):



**Figure 1.4-** Modèle de base de propagation radio (FRIIS, 1946)

#### 1.4.1.2. Modèle à deux rayons "Two-ray ground reflection model"

L'équation de FRIIS donne une formulation mathématique de l'affaiblissement d'une onde radio en espace libre et en l'absence de tout obstacle ce qui n'est pas toujours le cas. En effet, il est souvent important de tenir compte outre le chemin direct entre les deux antennes, de la présence du sol. Un tel effet contribue à la présence d'une seconde onde réfléchie dont les caractéristiques sont dictées par la nature du sol. Il s'agit du modèle à deux rayons (*Two-ray ground reflection*) (RAPPAPORT, 1996).



**Figure 1.5-** Modèle à deux rayons (FAHS, 2009)

Quand la distance  $d$  est suffisamment grande (au-delà d'un certain seuil), le modèle à deux rayons présente des résultats plus justes que le modèle de propagation en espace libre. Toutefois, pour des distances courtes, le modèle à deux rayons trouve ses limites. Dans ce cas, le modèle de propagation en espace libre est utilisé.

Notons  $D_c$  ce seuil,  $h_t$  et  $h_r$  les hauteurs des antennes (émettrice et réceptrice), le modèle est représenté par l'équation suivante:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t \times G_r \times \frac{1}{L} \times \left( \frac{h_t \times h_r}{R^2} \right)^2 \quad (2)$$

$$D_c = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (3)$$

#### 1.4.1.3. Modèle à zones d'ombre "Shadowing model "

Le "*Shadowing Model*" est réalisé en deux étapes:

- 1- La première étape de ce modèle calcule  $P_r(d)$  la puissance moyenne reçue à une distance  $d$  en utilisant une distance de référence  $d_0$  :

$$\frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} = \left( \frac{d}{d_0} \right)^\beta \quad (4)$$

Avec  $\beta$  le coefficient d'atténuation en fonction de la distance. Ce coefficient est généralement déterminé de façon expérimentale en fonction de l'environnement réel. Notons que plus  $\beta$  est grand, plus l'obstruction est forte, ce qui signifie une décroissance plus rapide de la puissance reçue en fonction de la distance (OBAYASHI, 1998).

- 2- La deuxième étape du *shadowing model* représente les variations de la puissance de l'onde reçue à une distance déterminée. Cette puissance varie selon une loi log-normale.

En considérant les deux étapes de ce modèle, l'équation finale est donnée par:

$$\left[ \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10 \times \beta \times \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{dB} \quad (5)$$

Le "*Shadowing Model*" est considéré le plus proche de la réalité (FAHS, 2009) car il ne considère pas l'intervalle de communication comme un cercle ou une sphère, mais plutôt comme un volume qui tolère les changements en fonction du temps.

#### 1.4.2. Mesure du temps d'arrivée /vol (ToA/ToF)

La mesure du temps d'arrivée ou de vol ToA ou ToF se base sur la théorie des propagations des signaux ainsi que la notion de synchronisation entre un émetteur et un récepteur. En effet, par définition, la distance  $D$  entre un émetteur et un récepteur est donnée par:

$$D = \text{Temps} \times \text{Vitesse} \quad (6)$$

Notons que la vitesse de propagation d'un signal radio dépend du milieu en question. Dans l'air, et dans un environnement sans obstacles, la vitesse de propagation d'un signal radio  $\approx$  célérité de la lumière =  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ .

Cependant, cette mesure suppose que l'émetteur et le récepteur sont parfaitement synchrones. Dans le cas où cette synchronisation est difficile, voire, impossible à réaliser, il est plus pratique d'appliquer la mesure qui exploite la différence des retards entre les temps d'arrivée des signaux au niveau du récepteur (TDoA) (GEZICI, 2007) (voir 1.4.3).

#### 1.4.3. Mesure de la différence du temps d'arrivé (TDoA)

La technique TDoA n'a pas besoin de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur, à la différence de la ToA (paragraphe 1.4.2). Cependant, dans cette technique, plusieurs récepteurs, synchronisés avec des positions connues, sont considérés. Généralement, ce type de mesure est utilisé dans le cas des ondes acoustiques ou ultrasons.

Dans cette technique, le principe est d'exploiter la différence du temps d'arrivée entre deux ou plusieurs couples de récepteurs. Ainsi, considérant une paire de récepteur 1-2 (Figure 1.6), la TDoA est exprimée par la forme de la formule suivante :

$$TDoA_{1-2} = t_2 - t_1 = \frac{d_2 - d_1}{v} = \frac{d_{1-2}}{v} \quad (7)$$

Avec  $v$  est la vitesse de propagation du signal de communication dans le canal considéré et  $d_i$  est la distance entre l'émetteur et chaque récepteur  $i$ .



Ainsi la TDoA est une mesure de la différence des temps d'arrivée des signaux émis simultanément par un même émetteur et arrivant au niveau de chaque récepteur.

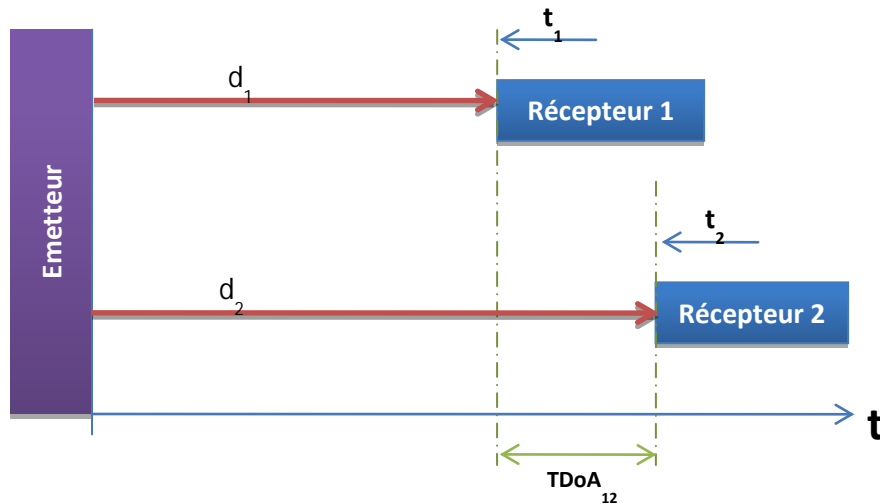


Figure 1.6- Différence de temps d'arrivée (TDoA)

#### 1.4.4. Mesure de l'angle d'arrivée (AoA)

La mesure de l'angle d'arrivée AoA (NICULESCU et al., 2003)(RONG et al., 2006) exploite les angles d'incidence des signaux sur un récepteur. Ainsi, en appliquant une triangulation, on peut obtenir des distances relatives par rapport au moins à deux ancres et ce en calculant les angles d'arrivée au niveau de ces ancres.

Bien évidemment, la précision d'une telle mesure dépend essentiellement de la directivité des antennes. Dans les travaux de (KRISHNAMURTHY et al., 2005), les auteurs concluent que le choix d'antennes directives augmente l'efficacité de la mesure de l'angle d'arrivée du fait que ce type d'antenne favorise quelques directions offrant ainsi une portée radio plus importante, mais dans une zone géographique plus petite.

## 1.5. Algorithmes généraux de localisation indoor

### 1.5.1. La triangulation

La méthode de triangulation est l'une des bases de la localisation indoor. Elle repose sur des propriétés très simples des triangles (AMUNDSON et al., 2009).

Il s'agit de calculer la position d'une cible en mesurant les angles entre cette cible et d'autres points de référence. Cette cible est donc considérée comme étant le troisième sommet d'un triangle dont on connaît deux angles et la longueur d'un côté. Le principal avantage de la triangulation est qu'elle ne fait appel qu'à deux points de référence.

En utilisant les propriétés trigonométriques, la position de la cible peut être obtenue de la façon suivante (GUI, 2013) : Soient un point  $X(x, y)$ , dont on tend à localiser, et deux points de référence  $A(x_A, y_A)$  et  $B(x_B, y_B)$  séparés par une distance  $D_{AB}$ . On suppose que  $y_A = y_B$ .

En appliquant la triangulation, les coordonnées du point  $X(x, y)$  sont données par :

$$\begin{cases} x = x_A + D_{AB} \times \frac{\cos \alpha \times \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \\ y = y_A + D_{AB} \times \frac{\sin \alpha \times \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \end{cases} \quad (8)$$

En effet, nous avons  $b = \frac{d}{\tan \alpha} \rightarrow D_{AB} = \frac{d}{\tan \alpha} + \frac{d}{\tan \beta}$ . En utilisant les identités trigonométriques :  $\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \times \cos \beta + \cos \alpha \times \sin \beta$  et  $\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$  nous aurons :

$$D_{AB} = d \times \left( \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \right) = d \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \times \sin \beta} \rightarrow d = D_{AB} \times \frac{\sin \alpha \times \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \text{ et } b = D_{AB} \times \frac{\cos \alpha \times \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$$

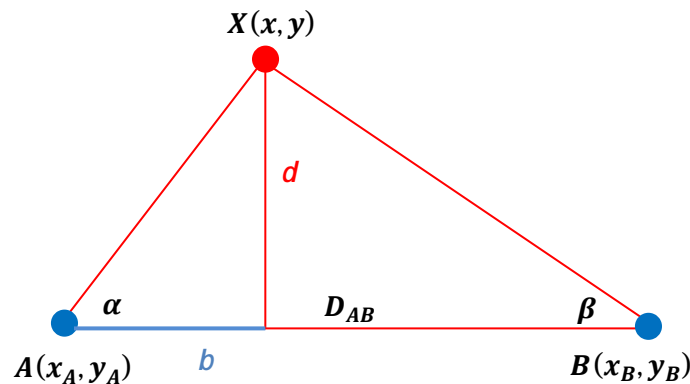


Figure 1.7- Mesure par triangulation

### 1.5.2. La trilatération

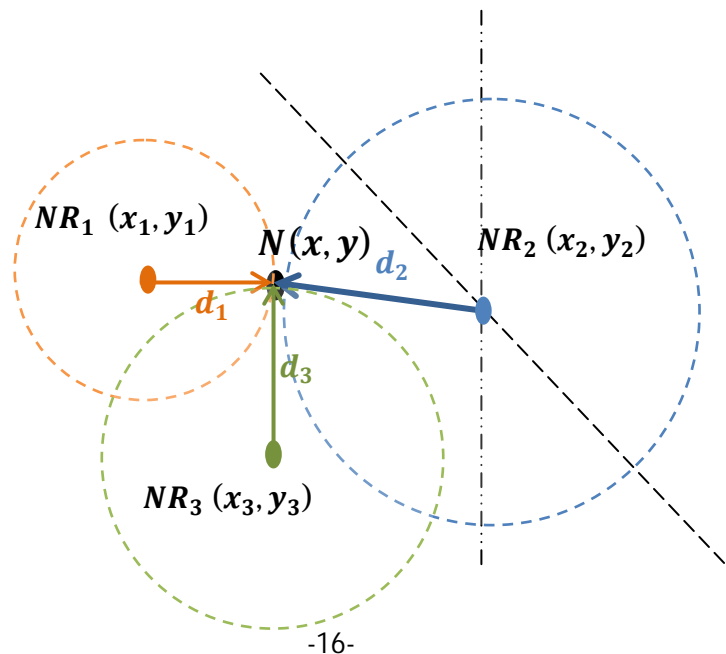
Il s'agit de mesurer les distances qui séparent la cible à trois points de référence dont on connaît les coordonnées. Par la suite, un cercle est tracé autour de chaque point de référence de rayons les distances respectives avec le point cible. Idéalement, ce point se trouve alors à l'intersection de ces trois cercles.

La formulation mathématique est donnée comme suit (TSUI, 2005), soient:

- $N$  de coordonnées  $(x, y)$ , le point à localiser.
- $NR_1(x_1, y_1)$ ,  $NR_2(x_2, y_2)$  et  $NR_3(x_3, y_3)$  les trois points de référence.
- $d_1$ ,  $d_2$  et  $d_3$  respectivement les distances séparant  $N$  à  $NR_1$ ,  $NR_2$  et  $NR_3$ .

La position de  $N$  peut être déterminée par la résolution du système d'équations:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = d_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (9)$$



**Figure 1.8-** Mesure par Trilatération

Une façon de résoudre un tel système est de remplacer la troisième ligne dans deux autres lignes. Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} d_1^2 - d_3^2 = (x_1 - x)^2 - (x_3 - x)^2 + (y_1 - y)^2 - (y_3 - y)^2 \\ d_2^2 - d_3^2 = (x_2 - x)^2 - (x_3 - x)^2 + (y_2 - y)^2 - (y_3 - y)^2 \end{cases} \quad (10)$$

En regroupant les  $x$  et les  $y$ , nous obtenons:

$$\begin{cases} 2 \times (x_3 - x_1)x + 2 \times (y_3 - y_1)y = d_1^2 - d_3^2 + x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 \\ 2 \times (x_3 - x_2)x + 2 \times (y_3 - y_2)y = d_2^2 - d_3^2 + x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} (x_3 - x_1)x + (y_3 - y_1)y = \frac{1}{2}(d_1^2 - d_3^2 + x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2) \\ (x_3 - x_2)x + (y_3 - y_2)y = \frac{1}{2}(d_2^2 - d_3^2 + x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2) \end{cases} \quad (12)$$

Ce qui ramène le système (9) en un système linéaire  $Ax = b$  dont la solution est obtenue par inversion de  $A$  :  $x = A^{-1}b$ , avec :

$$A = \begin{pmatrix} (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) \\ (x_3 - x_2) & (y_3 - y_2) \end{pmatrix} \text{ et } b = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} d_1^2 - d_3^2 + x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 \\ d_2^2 - d_3^2 + x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Or comme nous l'avons déjà exposé dans 1.5.3, en réalité, ce système d'équation n'est pas toujours linéaire ce qui fait qu'il n'en existe pas forcément une solution.

Une des approches proposées afin de résoudre ce problème de trilatération dans des conditions réelles de mesure est l'algorithme iRingLA proposé dans (DALCE, 2013).

### 1.5.3. iRingLA

Dans les conditions réelles de mesure, l'intersection de ces cercles n'est pas toujours un point (Figure 1.9-a), il s'agit dans la plupart des cas d'un ensemble de points (Figure 1.9-b). Dans d'autres cas, il n'y a pas d'intersection de ces trois cercles (Figure 1.9-c).

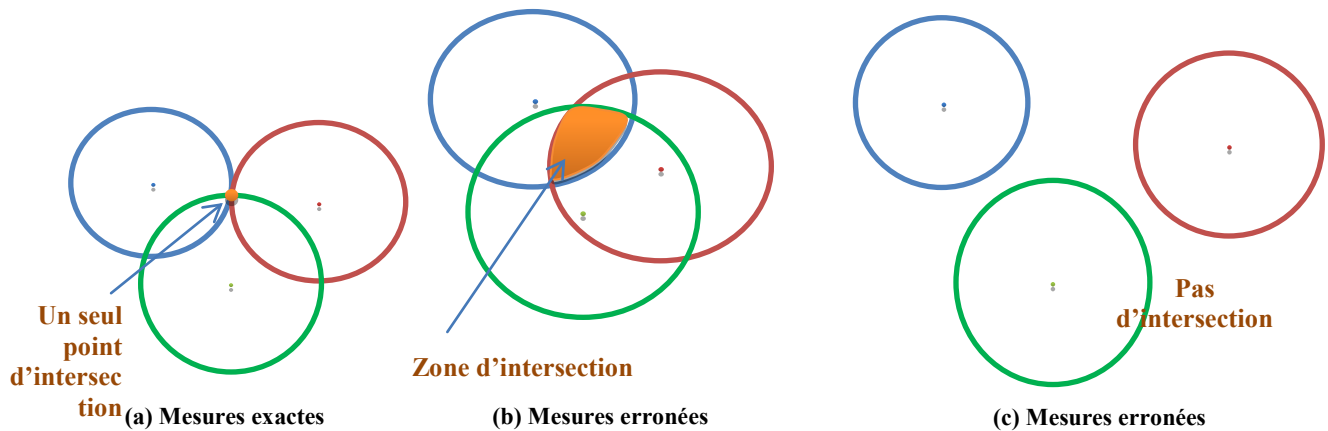


Figure 1.9- Problème de Trilatération

Une des solutions à ce problème est proposée dans (DALCE, 2013). L'auteur propose un algorithme appelé « *iRingLA* » ou *inter Ring Localization Algorithm*. Cet algorithme propose de réaliser l'intersection d'anneaux au lieu de cercles en vue de positionner une cible. En effet, l'approche *iRingLA* est de créer des anneaux centrés sur les points de référence. Ces anneaux sont construits en considérant l'erreur moyenne  $e$  caractérisée durant l'étalonnage de l'instrument de mesure ainsi que les distances moyennes  $d_{moy}$  estimées entre le point cible et chaque point de référence. Ainsi, les rayons intérieur ( $R_{in}$ ) et extérieur ( $R_{out}$ ) sont données par :

$$\begin{cases} R_{out} = d_{moy} + e \\ R_{in} = d_{moy} - e \end{cases} \quad (14)$$

Une fois déterminés, l'intersection de ces anneaux servira de base pour la formation de matrices de points candidats. Le centroïde de la matrice finale constitue une position possible de la cible à localiser.

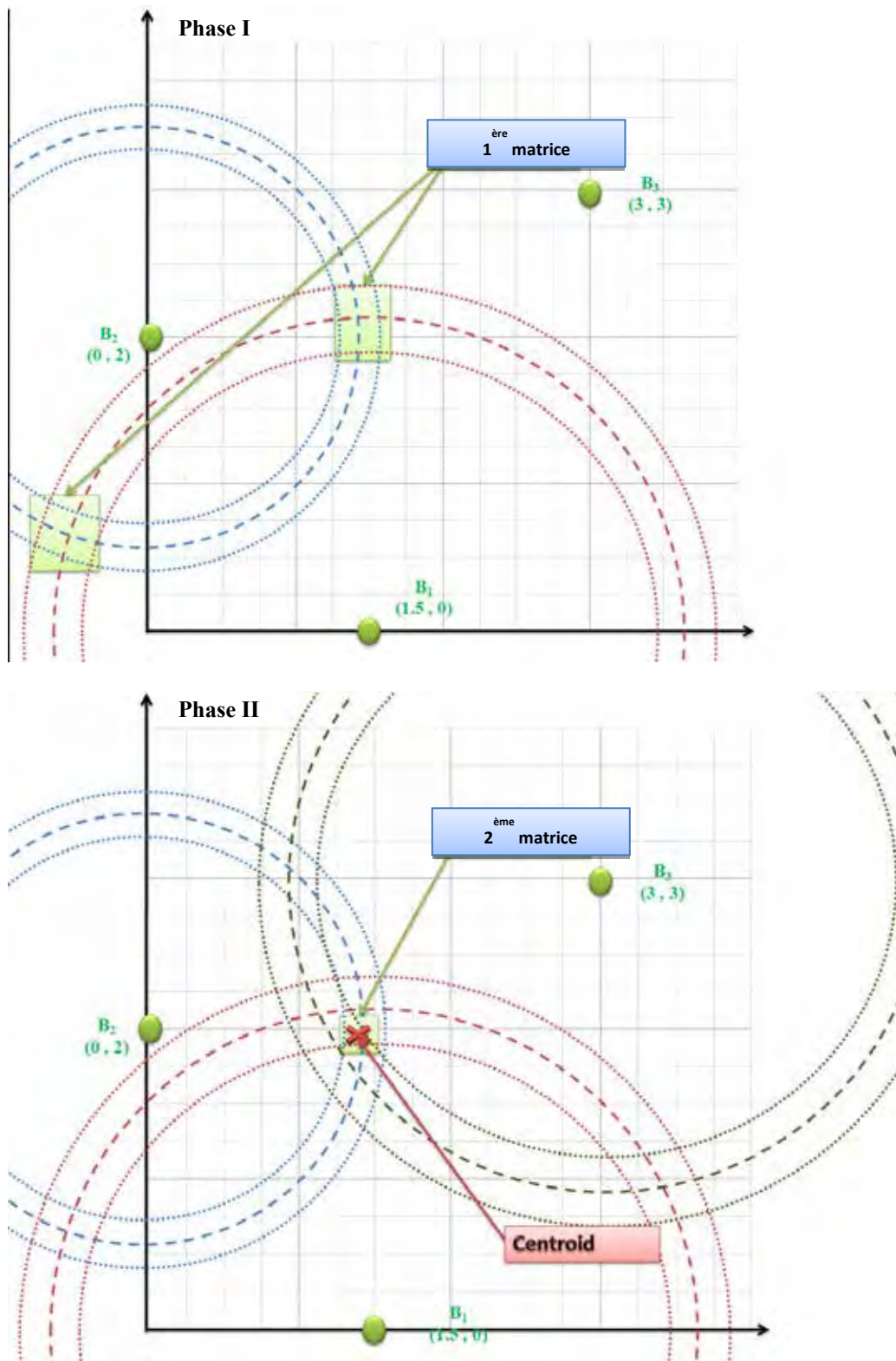


Figure 1.10- Déroulement d'iRingLA, figure inspirée des travaux de (DALCE, 2013)

#### 1.5.4. La multilatération

La méthode de multilatération reprend la même idée que la trilatération présentée précédemment dans la section 1.5.11.5.2 mais en faisant appel à plus que trois points de référence.

En effet, soit un point  $n$  dont on cherche les coordonnées  $(x_n, y_n)$  et soient  $k$  points de référence de coordonnées connues  $(x_i, y_i)$ ;  $1 \leq i \leq k$  ainsi que les distances qui les séparent du point cible  $n$  que l'on note  $d_{ni}$ ;  $1 \leq i \leq k$ .

Les coordonnées du point  $n$ ,  $(x_n, y_n)$  sont alors déterminées par résolution du système d'équations suivant:

$$\begin{cases} (x_1 - x_n)^2 + (y_1 - y_n)^2 = d_{n1}^2 \\ (x_2 - x_n)^2 + (y_2 - y_n)^2 = d_{n2}^2 \\ \vdots \\ (x_k - x_n)^2 + (y_k - y_n)^2 = d_{nk}^2 \end{cases} \quad (15)$$

Une solution à ce système a été présentée dans le travail de (LANGENDOEN et al., 2003).

#### 1.5.5. La méthode des signatures (Fingerprinting)

Cette méthode se base généralement sur les lectures RSSI. Elle comprend deux phases (DALCE et al., 2011): une première phase de calibration *offline* puisqu'elle se déroule avant le déclenchement du système de localisation et une seconde phase, dite *online*.

La phase de calibration consiste à quadriller l'espace de localisation et à associer les puissances reçues à des positions géographiques de l'espace, une série de mesures expérimentales dans un certain nombre de points sont donc stockées dans une base de données qui catégorise les niveaux de signaux reçus à partir de chacun des émetteurs.

Pendant la seconde phase, chaque récepteur mesurera la puissance du signal reçu de chaque ancre et fournira un vecteur qui correspond à une « empreinte » radio. Le système de localisation comparera cette empreinte, pendant la seconde phase, avec la carte de couverture radio déjà établie et stockée dans la base de données. Le système localisera alors le point auquel on reçoit des puissances de signaux similaires à celles enregistrées.

Cette méthode a suscité un intérêt particulier dans la littérature. En effet, un nombre important de travaux de recherche s'est basé sur cette méthode pour la proposition de nouveaux systèmes de localisation indoor (FANG et al., 2008) (SURESO et al., 2011) (GOGOLAK et al., 2011) (ALHMIEDAT et al., 2013)... Le système RADAR (BAHL et al., 2000), développé par *Microsoft Research*, utilise cette méthode de localisation pour une de ses réalisations.

Par contre, ce que l'on reproche à cette technique est qu'elle dépend de l'emplacement où elle est appliquée. En effet, si les caractéristiques radios de l'environnement sont très dynamiques, elle ne peut pas être utilisée. Outre ce fait, elle requiert une grande collecte d'informations avant qu'elle soit utilisée, et donc une base de données importante.

### **1.5.6. Autres algorithmes de localisation**

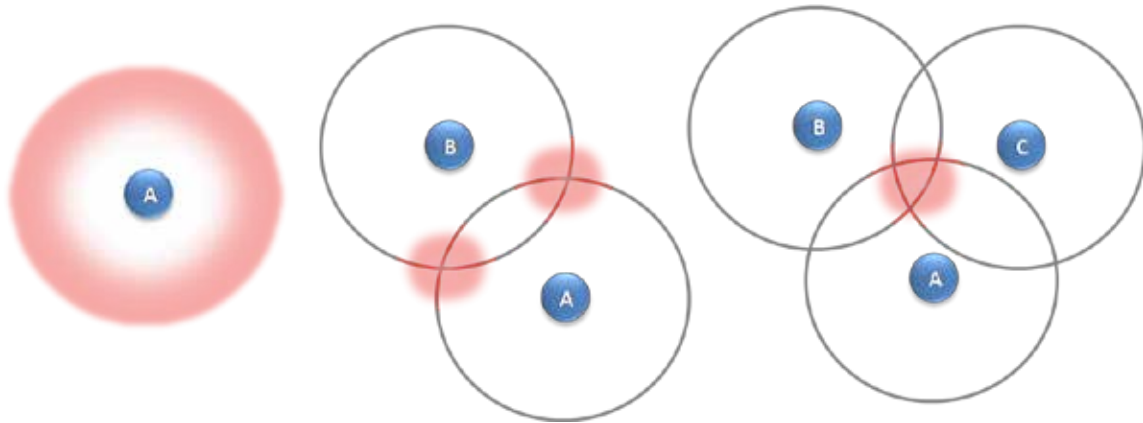
La liste des algorithmes de localisation que nous avons présentée n'est pas limitative. En effet, comme mentionné, la localisation n'est pas un processus récent et son étude date depuis des décennies. Il existe donc d'autres techniques de localisation dans la littérature à savoir l'approche probabiliste (RAMADURAI et al., 2003), le cadre englobant (SIMIC et al., 2002) et la position centrale (BULUSU et al., 2000).

#### **1.5.6.1. Approche probabiliste**

La distance ou l'angle issus de la première phase du processus de localisation sont généralement incertains et présentent une certaine imprécision. C'est cette imprécision qui motive le recours à la probabilité pour la dérivation de la position d'un point cible. En effet, selon l'approche probabiliste, comme le montrent les travaux de (RAMADURAI et al., 2003), l'erreur de distance est modélisée par une variable aléatoire normale. Quand un point cible communique avec une ancre, cela veut dire qu'il se trouve sur un disque (une couronne) entourant cette ancre. La distance entre ce point et l'ancre est calculée en utilisant la RSSI. Ce même raisonnement est appliqué pour le cas de trois ancres. Il est donc possible, en utilisant trois ancres, de calculer une plage de positions possibles du point cible comme le montre la **Figure 1.11**.

Ainsi, quand une application a besoin de localiser le point cible, une seule position lui sera communiquée. Il s'agit de la position ayant la probabilité la plus importante.





**Figure 1.11-** Approche probabiliste (RAMADURAI et al., 2003)

### 1.5.6.2. Cadre englobant (Méthode Min-max):

L'algorithme du cadre englobant (SAVVIDES et al., 2001)(SIMIC et al., 2002), utilise les carrés au lieu des cercles afin de calculer les positions possibles des cibles. Essentiellement, chaque point cible suppose qu'il se trouve dans la zone d'intersection des carrés délimitant les ancrés. Ces carrés sont centrés sur la position de chaque ancre. Ainsi, comme le montre la **Figure 1.12**, les ancrés de coordonnées connues  $(x_i, y_i)$  sont encadrés par des carrés ayant pour longueur de cotes de  $2 \times d_i$ , où  $i \in \{1, 2, 3\}$  et  $d_i$  est la distance estimée entre l'ancre  $i$  et le point cible.

Le point cible se trouve alors à l'intersection des cadres englobants. Sa position  $(x, y)$  peut être obtenue ainsi:

$$(x, y) = \left( \frac{\max(x_i - d_i) + \min(x_i + d_i)}{2}, \frac{\max(y_i - d_i) + \min(y_i + d_i)}{2} \right) \quad (16)$$

En effet, les coordonnées des coins supérieurs droits et inférieurs gauches des cadres englobants des ancrés sont respectivement  $(x_i + d_i, y_i + d_i)$  et  $(x_i - d_i, y_i - d_i)$ . Or, le point cible se trouve sur l'intersection de ces cadres englobants. Cette intersection se calcule en prenant le maximum des coordonnées inférieurs et le minimum des coordonnées supérieurs, et puisque le point cible est le centre du rectangle d'intersection, on doit diviser ces valeurs en 2.

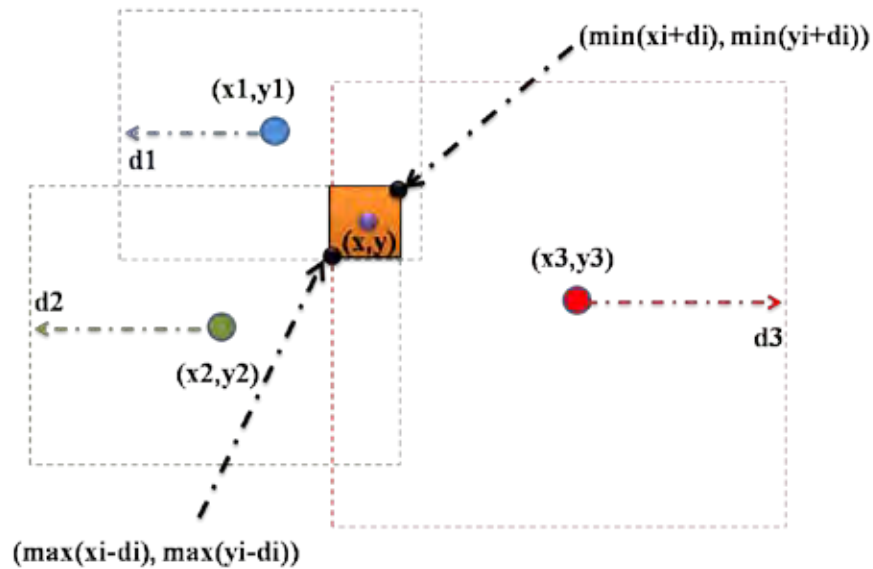


Figure 1.12- Approche du cadre englobant

### 1.5.6.3. Position Centrale

Cette méthode est la plus simple et la plus intuitive (BULUSU et al., 2000). En effet, la méthode de la position centrale suppose que le point cible se trouve au centre de tous les ancrés. Ainsi, les coordonnées de ce point sont égales à la moyenne de celles de toutes les ancrés:

$$(x, y) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \quad (17)$$

avec  $n$  est le nombre d'ancres.

Quoique simple à implémenter et ne nécessitant pas trop de ressources de calcul, cette méthode est imprécise pour un nombre réduit d'ancres.

## 1.6. Exemple de systèmes de localisation

### 1.6.1. Localisation par ondes radio

La communication sans fil à nécessite la caractérisation du milieu de propagation radioélectrique. A l'intérieur des bâtiments (indoor), les ondes radio à courte portée sont efficaces pour la communication sans fil (EVENNOU, 2007).

Plusieurs catégories d'interfaces de localisation indoor ont été utilisées, tel est le cas des réseaux d'étiquettes actives ou passives (RFID), les réseaux locaux sans fil de type 802.11, la technologie Bluetooth (classique et BLE), le Zigbee, l'Ultra Large Bande (UWB)...

#### 1.6.1.1. RFID

La méthode d'étiquettes radio, connue sous l'acronyme RFID est une méthode d'identification automatique développée à l'Université de Washington (HIGHTOWER et al., 2000).

Un *système* RFID est composé essentiellement des deux éléments suivants :

- « **Tag RFID** », aussi appelé étiquette radio, marqueur radio, identifiant, transpondeur,...Il s'agit d'un récepteur incorporé sur des objets, des animaux ou mêmes des humains. Chaque « tag » est muni d'une puce qui sert à mémoriser les données. Cette puce est reliée à une antenne qui assure les échanges de ces données. Selon l'intégration ou non d'un émetteur radio, les tags RFID peuvent être classés en deux catégories :
  - ü Tag RFID passif : ce type de tag n'intègre pas d'émetteur radio. Ne comportant pas une source d'énergie, le tag passif utilise souvent l'onde radio reçue de l'interrogateur afin d'alimenter son circuit électronique. Ce type tag est utilisé dans plusieurs applications de capture simple de données sans nécessité de les émettre (capture de température, etc.).
  - ü Tag RFID actif : ce tag comporte un émetteur radio. Il embarque généralement une source d'alimentation en énergie (batterie, pile..). Cette source d'énergie assure la fonction diffusion du signal vers un lecteur RFID. Ce type de tag est largement utilisé dans des applications de localisation de personnes, de véhicules et la traçabilité d'objets de tout genre.
- « **Interrogeurs RFID** », ont comme vocation l'activation des tags RFID en leur fournissant l'énergie dont ils ont besoin.

#### 1.6.1.2. WiFi (IEEE 802.11)

La technologie WiFi regroupe l'ensemble des protocoles de communications construits autour des normes du groupe IEEE 802.11 (ISO/IEC 8802-11). Elle a été introduite pour la première fois aux états unis en 1997. Depuis lors, cette technologie n'a cessé de se ré-

pandre sur tout le globe et les normes qui les régissent n'ont cessé d'évoluer ; sont apparues après les révisions IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n et IEEE 802.11ac, appelées normes IEEE 802.11 physiques.

Cette technologie a été exploitée dans plusieurs applications notamment pour la localisation indoor. En effet, plusieurs études ont été réalisées à ce sujet exploitant différents algorithmes de localisation (TARRIO et al., 2011)(KAFRAWY et al., 2010)(GENG et al., 2013).

RADAR (BAHL et al., 2000), développé par Microsoft Research, est l'un des pionniers de l'utilisation du réseau WiFi (IEEE 802.11b) pour des applications de localisation et de suivi d'utilisateurs à l'intérieur d'un bâtiment.

Le processus de localisation se fait en deux phases, une phase offline et une phase online.

- ✓ **La Phase Offline:** Durant cette phase, le système RADAR mesure les puissances des signaux reçus par le mobile en provenance des points d'accès. Deux méthodes sont utilisées: une méthode théorique et une méthode empirique. En effet, théoriquement, en espace libre, la puissance d'un signal radio est donnée par une fonction logarithmique de propagation de l'onde radio (FRIIS, 1946). Mais, à l'intérieur des bâtiments, le signal radio subit plusieurs perturbations (réflexions, trajets multiples...). Le système RADAR réalise alors un ensemble de mesures expérimentales dans un nombre de points de mesure (BAHL et al., 2000) réalisant ainsi une carte de couverture radio (*radio map*). Cette carte sera stockée dans une base de données qui catégorise les niveaux de signaux reçus à partir de chacun des points d'accès en un point du plan.
- ✓ **La Phase Online:** pendant laquelle, le système RADAR mesure la puissance de signaux reçus par les points de mesure. En consultant la base de données construite pendant la phase offline, le système localise le point auquel on reçoit des puissances de signaux similaires à celles enregistrées dans la base de données.

La précision de localisation du système RADAR est estimée de 2.9 m par la méthode empirique et 4.3 m par la méthode théorique.

Le principal avantage du système RADAR est son coût réduit. En effet, seulement un nombre réduit de stations de base est nécessaire (trois stations de base sont déployées). Outre ce fait, la mise en place de ce système ne nécessite pas un coût supplémentaire

puisque RADAR utilise la même infrastructure (réseau local sans fil) existante dans un bâtiment.

### **1.6.1.3. Bluetooth**

Bluetooth est un standard de communication radio permettant de transmettre des données à courtes distances. Il a été créé par Ericsson en 1994 dans le but de remplacer les liaisons filaires entre les équipements (ordinateurs, imprimantes, ...).

Ce standard a fait ses apparitions dans des applications de localisation indoor en exploitant les différents signaux mesurés à savoir la CID, la mesure RSS et le taux IRR.

Plusieurs systèmes de localisation Bluetooth ont été proposés tel est le cas de BLN (CASTANO et al., 2003), Bluepass (MAUES et al., 2010), Zonith (Zonith,2016, s.d.) et Gimbal<sup>4</sup>.

### **1.6.1.4. Bluetooth Low Energy**

Apparue en 2010, Bluetooth Low Energy, également appelée Bluetooth smart, était proposée avec la sortie de *Bluetooth Core Specification*, version 4.0.

Cette version avancée de Bluetooth offre une multitude de potentiels du point de vue consommation d'énergie tout en conservant une portée équivalente à celle du Bluetooth classique.

Depuis sa première sortie, cette technologie a suscité l'intérêt des industriels et des chercheurs pour la proposition de nouvelles solutions, notamment dans le domaine de la localisation indoor. Dès lors, plusieurs applications ont été proposées : Ibeacon, BlueCats, BlueSense, Estimote, Gelo, GlimWorm, Kontakt, Sensorberg, Sonic Notify, ...

Cette section sera reprise avec plus de détails dans le chapitre 3.

## **1.6.2. Localisation par ondes acoustiques**

Dans ces dernières années, un des axes de recherche les plus explorés dans le domaine de la localisation est l'exploitation du son audible dans l'estimation de la position de sa source.

Le système BEEP (MANDAL et al., 2005) est l'un des systèmes de localisation indoor qui exploite l'information acoustique récupérée à partir des capteurs acoustiques fixés à des

---

<sup>4</sup><http://www.gimbal.com/>

positions fixes connues. Ce système permet d'estimer la position du son par la méthode de triangulation en utilisant les mesures ToA. Testé dans une salle de dimension 9 m×20 m, Beep a assuré une précision de 0,4 m pour 90% des essais réalisés.

Un autre système de localisation acoustique est proposé dans (ALOUÏ, 2004). Ce système repose sur la méthode des signatures (fingerprinting) en opérant en deux phases : une première phase de calibrage et une phase en ligne. Pendant la première phase, le système enregistre le son ambiant, dans des positions connues, puis réalise un ensemble de mesures où le récepteur calcule la corrélation entre le signal sonore reçu et le signal enregistré. Une base de données est alors construite à base des ToA estimés pour chaque position.

Cette section sera reprise avec plus de détails dans le chapitre 3.

### **1.6.3. Localisation par signaux infrarouge**

Les signaux infrarouges étaient à la base des premiers systèmes de localisation intra-bâtiments. L'Active Badge (WANT et al., 1992) a été la grande découverte des années 1990. Il a été inventé par les chercheurs des laboratoires AT&T de Cambridge. Ce dispositif était conçu afin d'apporter une solution au problème de localisation automatique d'individus en indoor (hôpitaux, organisations, ..). Il s'agissait de concevoir une balise sous forme d'un «Active Badge» qui émet un code unique pour environ un dixième de seconde toutes les 15 secondes. Ces signaux périodiques sont détectés par un réseau de capteurs fixés au plafond du bâtiment. Une station de base, connectée également au réseau, traite les données collectées par ces capteurs et les rend accessibles aux clients qui peuvent l'afficher sous format visuel.

Depuis lors, plusieurs systèmes de localisation à base de signaux infrarouges ont vu le jour. Il y a ceux qui ont été conçus pour des vocations purement académiques comme le système IRIS (JACQUET, 2007) développé afin d'offrir aux chercheurs de l'HCI une solution simple et peu onéreuse pour réaliser des expériences de détection de personnes.

D'autres systèmes ont été conçus pour être commercialisés. Le VersusTECH<sup>5</sup> par exemple a été développé et commercialisé afin d'assurer le suivi des patients en milieu hospitalier.

Les systèmes de localisation par signaux infrarouge rencontrent de grandes difficultés en présence de la lumière du soleil à cause de ses émissions infrarouge.

---

<sup>5</sup><http://www.versustech.com/rtls-technology/>

#### 1.6.4. Localisation par Ultrasons

Les premières études sur les ultrasons n'étaient pas destinées aux individus. En effet, depuis la découverte de la *piézo-électricité*, par les frères Pierre et Jacques Curie en 1880, les ultrasons deviennent faciles à manipuler. Ainsi, durant la 1<sup>ère</sup> guerre mondiale, les ultrasons étaient utilisés pour détecter les sous-marins. A partir des années 1920, sont apparus les premiers appareils à ultrasons, appelés SONARS (voir section 1.2.4).

Ce n'est qu'à partir des années 1970 que les ultrasons ont fait leurs premières apparitions dans le domaine de la médecine avec l'invention des premières images échographiques par Wild et Reid en 1952 (WILD et al., 1952)(WATTS, 2009).

Le principal avantage de la technologie d'ultrasons découle de la lenteur de propagation du son par comparaison à celle des ondes radio ce qui donne une meilleure précision de la mesure du temps de propagation et ainsi des estimations de distances plus fiables. Généralement, les systèmes de localisation par ultrasons font appel à une autre technologie afin d'obtenir une estimation de la distance entre l'émetteur et le récepteur (EVENNOU, 2007) tel est le cas du système Cricket (voir section 2.4.2.3)

Un des systèmes de localisation indoor conçus en utilisant la technologie ultrason est l'Active Bat (HARTER et al., 1994)(HARTER et al., 1999).

Il s'agit d'un système développé par les chercheurs des laboratoires AT&T de Cambridge. Ce système opère d'une manière semblable à celle de l'Active Badge, mais au lieu d'employer des impulsions infrarouge, un message radio et une impulsion ultrason sont émis par un émetteur en même temps et d'une façon périodique. La technique de trilatération basée sur le temps d'arrivée d'un signal ultrason offre une précision centimétrique ce qui fournit une localisation plus fine et plus précise comparée aux performances de l'Active Badge.

Les objets à localiser portent des tags Active Bat (TSENG, 1998) comme le montre la **Figure 1.13**:



**Figure 1.13-** Active BAT, figure inspirée des travaux de (TSENG, 1998)

Chaque Active Bat dispose d'un identifiant unique et globalement défini par 48 bits. L'Active Bat s'appuie sur plusieurs récepteurs à ultrasons situés dans le plafond d'un bâtiment et reliés à l'aide d'un réseau à haute vitesse (**Figure 1.14**). En réponse à une requête envoyée par le biais d'une onde radio à courte-distance par un contrôleur, un Bat envoie une pulse ultrason vers cette grille de récepteurs.



**Figure 1.14-** Système Active BAT: Les récepteurs ultrasons, figure inspirée des travaux de (TSENG, 1998)



Ainsi, on peut calculer la position d'un objet si l'on trouve les positions relatives des bats qui lui sont attachés. En outre, on peut déduire des informations sur la direction d'un individu même s'il porte seulement un bat, par l'analyse du motif des récepteurs qui ont détecté les signaux ultrasons de cet émetteur ainsi que la puissance de ces signaux.

### **1.6.5. Localisation par lumière visible**

La technologie radio (RF) est actuellement la plus sollicitée pour la mise en place de nouvelles solutions de communication sans fil utilisées pour des fins de localisation indoor. Cependant, avec l'élargissement de son domaine d'application, cette technologie commence à présenter quelques inconvénients. En effet, outre le fait que sa bande passante limitée rend difficile, voire impossible, à l'heure actuelle, d'ajouter de nouvelles normes, cette technologie RF peut, dans des cas particuliers, être néfaste : les ondes radio peuvent causer des interférences avec les dispositifs vitaux utilisés dans les hôpitaux ou les aéroports.

Plusieurs axes de recherche ont été alors exploités afin de trouver une technologie qui soit aussi « efficace » que la technologie radio sans avoir ses inconvénients. Un des successeurs potentiels est alors la VLC (Visible light communication). Si la RF exploite le spectre des ondes électromagnétiques, la VLC exploite celui de la lumière visible (380-780 THz). Face aux inconvénients de la technologie RF, la VLC (Visible light communication) offre d'énormes bandes passantes libres d'accès, ne se limite pas par aucune loi et ne présente pas de risque pour le corps humain.

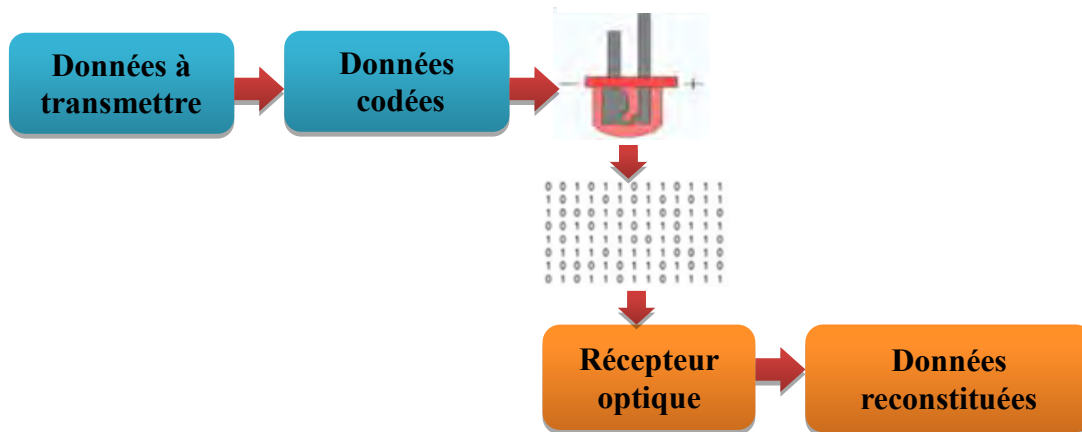
LiFi, acronyme du « Light Fidelity », est une technologie de communication proposée pour la première fois en 2011 sous le nom de « D-Light » par le physicien allemand Harald Haas lors de la conférence TEDGlobal(TED, s.d.). L'idée de HAAS est de transmettre des données par la lumière visible (visible light communication « VLC ») à travers des ampoules LED, avec des débits dix fois supérieurs que ceux du WiFi<sup>6</sup>.

En effet, cette technologie exploite le pouvoir des lampes LED à supporter les variations rapides d'intensité. Ainsi, en s'inspirant du principe du code morse, la transmission des données peut être réalisée en faisant clignoter une lampe LED avec une fréquence de plusieurs milliers de fois par seconde, qui n'est pas visible à l'œil humain : si la lampe LED est éteinte, le bit transmis est 0 et si la lampe est allumée, le bit transmis est 1.

---

<sup>6</sup><http://www.smartlightingalliance.org/lifi.php>

Ainsi, le principe de la transmission de **données** par le LiFi est de moduler les données coté émetteur (les LEDs), afin de pouvoir les transmettre sous une forme binaire (des bits 0 et 1). Ces messages binaires seront interceptés par des récepteurs optiques qui les transforme sous forme de signaux électriques, puis les démodule pour être enfin décodés afin de reconstituer les données originellement transmises.



**Figure 1.15-** Transmission des données par la technologie LiFi

La technologie LiFi, la nouvelle « Green Tech », a fait ses premières apparitions dans le domaine de localisation indoor peu après sa découverte. En effet, à l’instar de la technologie BLE (voir section 1.6.1.4), le LiFi est utilisé pour des applications de positionnement à l’intérieur des magasins, des musées, des gares et des aéroports. Plusieurs start-up ont lancé des solutions à base du LiFi tel est le cas de la firme française Oledcomm<sup>7</sup>(fondée en 2012) avec plus que 10000 points LiFi installés pour plus de 300 clients dans le monde. Une de ces applications est la GEOLiFi qui offre aux visiteurs des musées et des galeries d’art un accès aux informations liées à l’ouvrage visité.

Cette section sera reprise avec plus de détails dans le chapitre 3.

## 1.7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude bibliographique qui a introduit les métriques ainsi que les techniques et les technologies de localisation indoor. Les tableaux de comparaison dressés à la fin de chaque partie (sections 2.3.1 et 2.3) ont déjà anticipé sur les inconvénients de chacune des techniques et technologies présentées. L’idée est alors de

<sup>7</sup><http://www.oledcomm.com/fr/>

trouver un moyen afin de palier inconvénients de ces techniques et technologies et profiter de leurs avantages respectifs. Il s'agit donc de proposer des systèmes de localisation hybrides qui fusionnent ou combinent deux ou plusieurs de ces techniques ou technologies.

Le chapitre suivant dressera un état de l'art sur ces systèmes hybrides et introduira les manières avec lesquelles les positions résultantes à ces systèmes sont calculées.

# Chapitre 2 Systèmes Hybrides de Localisation Indoor

## 2.1. Introduction

L'information sur la position d'un objet ou d'une personne présente un intérêt particulier chez les utilisateurs de services de localisation à l'intérieur des bâtiments. Vu le nombre de plus en plus important des solutions actuellement commercialisées, la pression devient aussi de plus en plus importante afin d'assurer plus de précision des résultats retournés. Malheureusement, comme cela a été présenté dans le chapitre précédent, chaque technique et technologie de localisation possède ses propres caractéristiques qui définissent ses points forts ainsi que ses points de faiblesse. Afin de faire face à ces points de faiblesse, l'idée de la thèse est de combiner plusieurs technologies ou techniques de localisation, bénéficiant ainsi de leurs avantages tout en minimisant leurs inconvénients : il s'agit des systèmes de localisation hybrides.

Plusieurs approches ont été proposées, dans lesquelles les auteurs ont surtout mis l'accent sur la valeur ajoutée de ces systèmes de point de vue précision. Dans le présent chapitre, un inventaire de ces approches d'hybridation sera établi. Nous allons citer les travaux proposés à cet effet en spécifiant à chaque fois la technique de combinaison utilisée.

Mais avant d'attaquer cette partie, il s'avère indispensable, pour la cohérence de nos études, de commencer par la définition des différents critères de performance

## 2.2. Critères d'évaluation des performances des systèmes de localisation

La toute première phase dans le processus de conception d'un système de localisation, est d'établir les attentes et priorités vis-à-vis des performances à assurer. C'est à la base des résultats de cette phase, que nous pouvons décider quelles technologies et techniques choisir.

Dans la littérature, diverses études ont dressé plusieurs listes de ces performances, nous citons plus particulièrement celle exposée dans (HIGHTOWER et al., 2001). En effet, comme

le détaillent les auteurs, l'évaluation des performances des systèmes de localisation se fait généralement selon les critères suivants : complexité, robustesse, évolutivité, coût, taux d'erreurs, exactitude et précision.

Dans la suite de ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement aux trois derniers critères. En effet, c'est à la base de ces trois critères que nous bâtissons une grande partie de notre approche d'hybridation.

### **2.2.1. Erreur de localisation**

Généralement, toute mesure expérimentale est susceptible de présenter des incertitudes plus ou moins considérables selon le processus d'expérimentation, les conditions environnantes ainsi que la personne qui réalise ces mesures.

De la même manière, la localisation d'une cible, étant un processus expérimental, est prédisposée à être entachée d'erreurs de localisation.

En littérature, l'erreur de localisation d'une cible désigne l'écart entre sa position mesurée expérimentalement et sa position réelle. Nous distinguons essentiellement trois types d'erreurs (*uncertainty* en anglais) (BRABANT, 2003): systématiques, accidentelles et statiques.

- ✓ Les erreurs systématiques sont souvent causées soit par un étalonnage mal ajusté des appareils de mesure, soit par une négligence de quelques facteurs qui pourraient influencer les mesures (champs magnétiques par exemple). Ce type d'erreurs peut être ainsi évité en apportant des ajustements ou corrections aux résultats obtenus.
- ✓ Les erreurs accidentelles dépendent généralement de la personne qui réalise les mesures. Ce type d'erreurs ne peut ni être évité ni être représenté.
- ✓ Dans le cas où, réalisées dans les mêmes conditions et par le même expérimentateur, une mesure donne des résultats différents, nous qualifions l'erreur d'aléatoire, qui ne peut pas être modélisée. Dans ce cas, nous exploitons la notion de « dispersion statistique » des mesures aléatoires.

### **2.2.2. Notions de Répétabilité et de Reproductibilité d'une mesure**

Dans tout processus expérimental, plus le nombre de mesures ( $N$ ) est grand, plus le phénomène mesuré est représenté de façon plus efficace. Ceci permet à l'expérimentateur de

tenir compte des variations du phénomène mesuré sur un intervalle de temps plus grand et en tenant compte le plus possible des conditions environnantes. Nous distinguons ainsi deux concepts liés à la certitude des mesures : répétabilité et reproductibilité.

La **répétabilité** d'une mesure (distance / angle) désigne l'accord entre des mesures successives au niveau d'une même position, effectuées pendant un court intervalle de temps tout en gardant pratiquement les mêmes conditions (température, humidité, pression, ...).

Par contre, la **reproductibilité** d'une mesure dénote un accord entre les mesures d'une même position, effectuées de manière espacée dans le temps et en faisant varier à chaque fois les conditions de mesure.

Généralement, la représentation mathématique des deux concepts de répétabilité et de reproductibilité se base sur la notion d'écart-type.

Comme défini dans (AFNOR, 2002), l'écart type (Standard Deviation *SD*) constitue une mesure de la dispersion d'un ensemble de données par rapport à leur moyenne. Il s'agit plus précisément de la moyenne quadratique des écarts de chaque donnée par rapport à la moyenne de tout l'ensemble :

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (18)$$

où *N* est le nombre des mesures constituant la dispersion.

Intuitivement, plus l'écart est faible, plus les données sont proches de la moyenne.

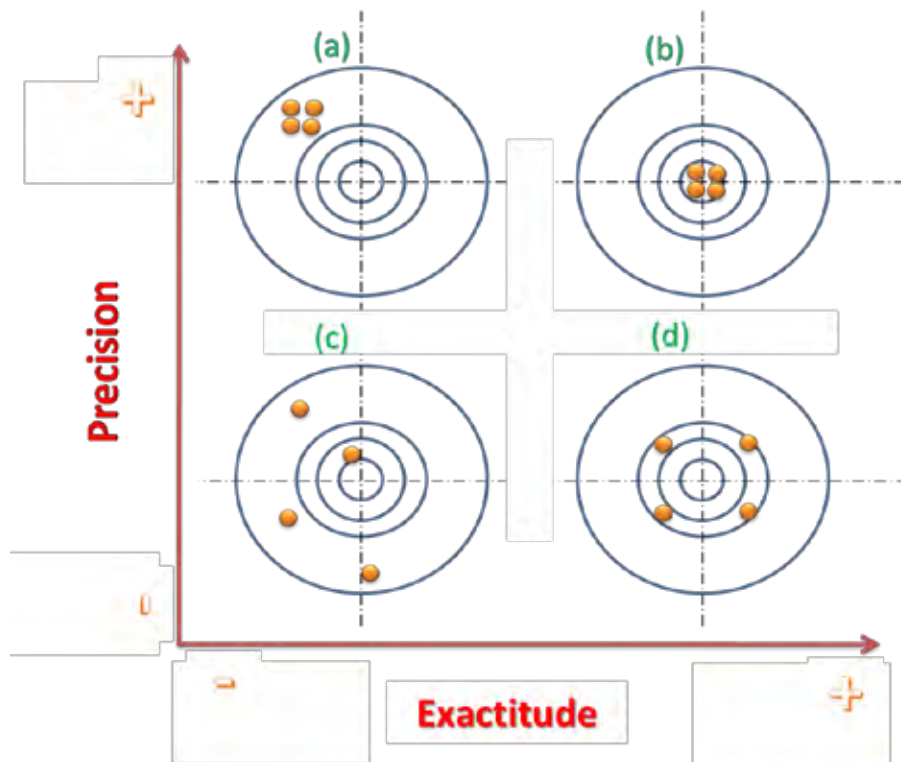
### 2.2.3. Précision et Exactitude dans un système de localisation

Une grande part du travail expérimental se rapportant au processus de localisation d'une cible réside dans l'estimation du degré de certitude de ce processus. Il s'agit d'évaluer aussi bien la précision que la fiabilité des mesures réalisées et ce en se basant sur les définitions annoncées ultérieurement.

Quoi qu'étroitement liées, ces deux concepts renvoient à deux définitions totalement distinctes:

- ✓ Une valeur mesurée est dite « précise » si les *N* mesures réalisées sont reproductibles (**Figure 2.1-a**): l'écart-type des *N* mesures tend vers zéro.

- ✓ Une valeur mesurée est dite « exacte » (en anglais « *accurate* ») si elle est le plus proche possible de la valeur réelle (**Figure 2.1-d**): l'erreur des N mesures tend vers zéro.



**Figure 2.1-** Précision vs Exactitude

Ainsi, en nous référant à ces deux définitions et pour un système de localisation d'une cible, l'ultime objectif aussi bien des concepteurs que des utilisateurs est de manipuler un système qui soit à la fois « précis » et « exacte » (**Figure 2.1-b**).

Une telle quête d'amélioration des performances du système de localisation a fait l'objet de plusieurs études. Les recherches y afférentes se sont divisées en deux axes essentiels :

- ✓ L'effet de la géométrie de l'infrastructure sur la précision et l'exactitude du système de localisation,
- ✓ L'impact de la technologie (signal) utilisée sur les performances du système.

## 2.3. Comparaison des performances des systèmes de localisation existants

### 2.3.1. Comparaison des métriques de localisation

Déterminer quel algorithme utiliser lors de l'implémentation d'un système de localisation revient à choisir un paramètre de mesure. Nous dressons un comparatif des différentes mesures permettant l'estimation de distance/angle en nous basant sur l'étude bibliographique que nous avons établie pour chaque technique.

Mesure	Avantages	Inconvénients	Précision	Distance maximale	Matériel supplémentaire
RSSI	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disponibilité des modèles mathématiques (modèle de propagation radio)</li> <li>Coût implantation peu élevé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dépendance au comportement de l'onde radio par rapport au milieu</li> <li>besoin d'un trajet direct</li> <li>sensibilité aux interférences</li> </ul>	<p>Faible</p> <p>2 à 8 m</p>	Portée radio	aucun
ToA	<ul style="list-style-type: none"> <li>forte précision</li> <li>applicable à une multitude d'applications</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>besoin de synchronisation des horloges</li> <li>besoin d'un trajet direct</li> </ul>	<p>Forte</p> <p>2-3 cm</p>	Portée radio	aucun
TDoA	<ul style="list-style-type: none"> <li>forte précision</li> <li>applicable à une multitude d'applications</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût d'implantation élevé</li> <li>consommation d'énergie</li> <li>besoin d'un trajet direct</li> <li>faible distance maximale</li> </ul>	<p>Forte</p> <p>2-3 cm</p>	Quelques mètres	Capteur à ultrason
AoA	<ul style="list-style-type: none"> <li>n'a besoin que de deux ancres pour se localiser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût d'implantation élevé</li> <li>consommation d'énergie</li> </ul>	<p>Forte</p> <p>Quelques degrés</p>	Portée radio	récepteurs

Tableau 2-1: Comparaison des métriques de localisation



### 2.3.2. Comparaison des techniques de localisation

Le choix d'une méthode de localisation parmi celles se trouvant dans la littérature s'appuie sur ses performances en termes de précision et de complexité de calcul.

Nous dressons un comparatif des différents algorithmes permettant le calcul de position d'un point cible et ce en nous basant sur l'étude bibliographique que nous avons établie pour chaque méthode.

Méthode	Nombre d'ancres nécessaires	Distance	Angle	Inconvénients
Triangulation	3	-	×	Besoin d'ajout de matériel
Trilatération	3	×	-	Calcul complexe
Multilatération	$n \geq 3$	×	-	Calcul trop complexe
Fingerprinting	$n \geq 2$	×	-	Dépend de la précision des valeurs mesurées pendant la 1 <sup>ère</sup> phase
Probabiliste	$n \geq 3$	×	-	Gourmande en mémoire Complexe
Bounding Box	$n \geq 2$	×	-	Précision faible
Position centrale	$n \geq 1$	-	-	Précision faible

Tableau 2-2: Comparaison des différentes techniques de localisation

### 2.3.3. Comparaison des technologies de localisation

Dans ce paragraphe, nous allons établir un bilan des différents systèmes de localisation vus dans ce chapitre en nous basant sur un ensemble de critères:

- type de localisation indoor/outdoor,
- type du signal émis,
- technique de mesure,
- précision,
- points forts / limites, ...

	Signal émis	Système de localisation	Précision	Points forts	Limites
<b>Outdoor</b>	Ultrason	SONAR	Imprécis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation des avantages de la propagation du son dans l'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensible aux bruits</li> </ul>
	Radio	RADAR	Imprécis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilisation des avantages de la propagation des ondes radio dans l'air</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>sensible aux interférences</li> </ul>
		GPS	Moins de 10 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>Précision élevée selon le prix du dispositif</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût élevé</li> <li>Gourmand en énergie</li> </ul>
<b>Indoor</b>	Réseaux sans fil 802.11	Radar	2 m sur 300 m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilise l'infrastructure existante</li> <li>Nombre réduit d'ancres</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Précision limitée</li> <li>les capteurs doivent supporter la technologie réseaux sans fil 802.11</li> </ul>
	Infrarouge	Active Badge	A l'intérieur d'une pièce	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adresse privée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût élevé</li> </ul>
		IRIS	16 cm sur 100 m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>sensible aux sources fluorescentes comme le soleil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infrarouge</li> </ul>
	Ultrason	Active Bat	3 cm sur 1000m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Couvre une grande surface</li> <li>Retourne une position 3D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensible aux réflexions des signaux</li> <li>Grand nombre d'émetteurs</li> </ul>

**Tableau 2-3:** Comparaison des principales technologies de localisation (Indoor et Outdoor)

## **2.4. Hybridation : Amélioration des performances des systèmes de localisation**

Comme nous l'avons détaillé dans la section 2.3, chaque système de localisation dispose d'une portée qui dépend de la technologie qu'il met en œuvre. Cette portée varie entre 5 m à 50 m pour les technologies opérant à l'intérieur des bâtiments (MAINETTI et al., 2014). Elle peut atteindre 50 m pour le WiFi, 30 m dans le cas de la technologie Bluetooth, mais elle n'est que de l'ordre de 1 m à 10 m pour le cas de l'ultrason et la vision.

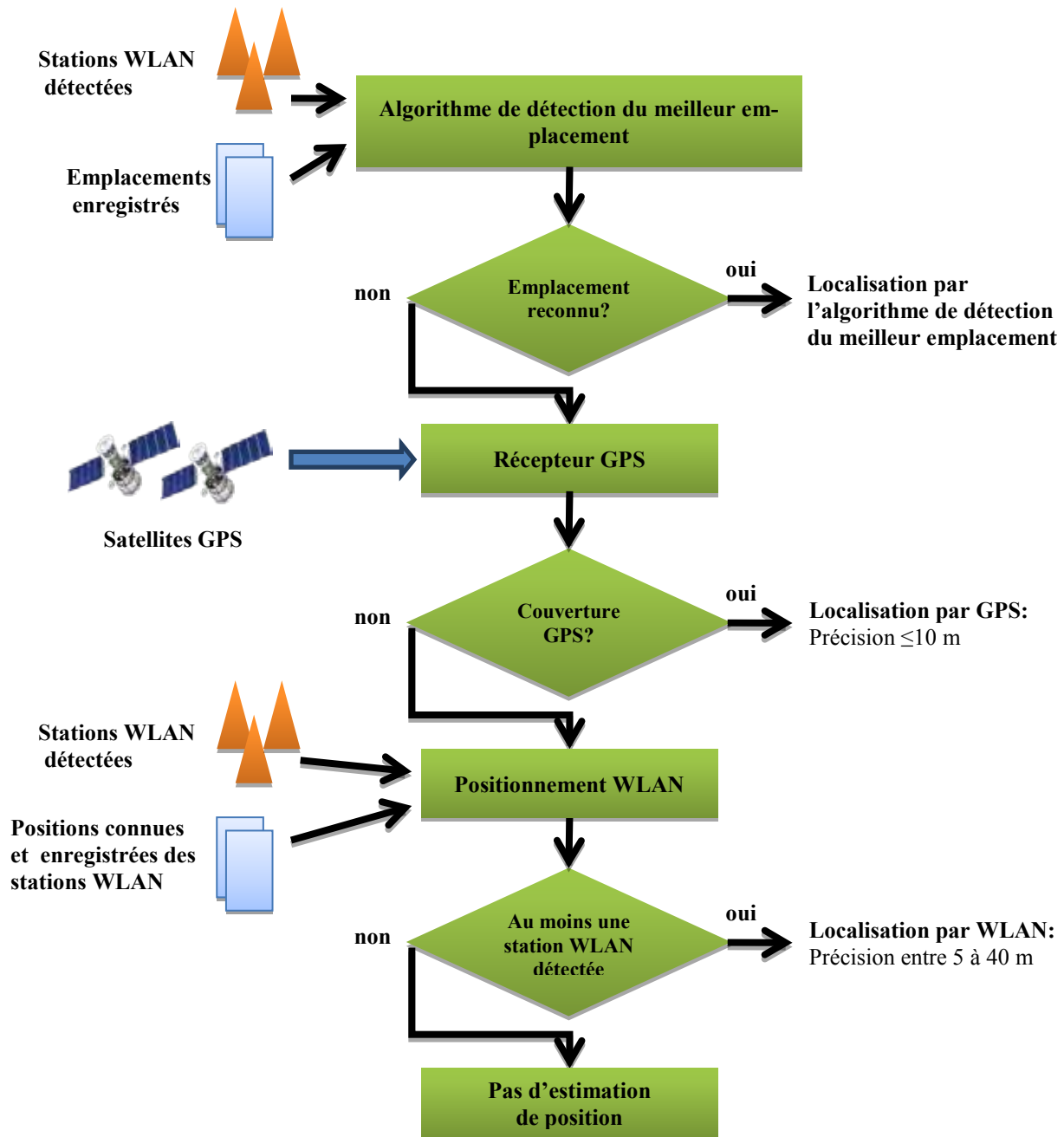
Afin de localiser la cible avec plus de précision, une des solutions possibles est l'hybridation en faisant appel à plusieurs techniques de localisation dans un même système et ce via des traitements spécifiques. Nous distinguons essentiellement deux modes d'hybridation : une hybridation « lâche » et une hybridation « serrée » (DEERGH et al., 2004).

Dans l'hybridation lâche, la zone couverte par le système de localisation devient plus étendue ; le calcul de la position de la cible est assuré en passant d'une technologie à une autre selon leurs périodes de disponibilité. Par contre, l'hybridation serrée permet de fusionner les informations retournées par deux technologies qui sont disponibles tout le temps dans la zone de couverture du système.

### **2.4.1. Hybridation lâche : Système Hybride GPS/WLAN**

Dans la section 1.2.1, les principales données autour du système GPS ont été présentées. Une attention particulière a été accordée au processus de localisation par ce système. En dépit de tous les avantages que puisse offrir le GPS, une fois ayant franchi les cloisons d'un bâtiment, sa précision chute considérablement, ou il peut même devenir inopérant.

Dans l'objectif de continuer à bénéficier des avantages du GPS même après avoir accédé à un local fermé, des chercheurs (REYERO et al., 2008) ont étudié la possibilité de combiner le GPS avec une autre technologie ayant déjà donné les preuves à l'intérieur des bâtiments. Dans le cadre de cette étude, trois technologies ont été alors testées dans le but de choisir celle qui assure le plus de précision et de continuité une fois combinée avec le système GPS afin de mettre en place un système hybride de localisation indoor/outdoor : GSM, WLAN et Bluetooth.



**Figure 2.2-** Système hybride de localisation GPS/WLAN, figure inspirée des travaux de (REYERO et al., 2008)

Une série d'expérimentation est alors réalisée en utilisant un ordinateur portable équipé de WiFi et Bluetooth et connecté à un mobile GSM (équipé d'un module GPS). Des stations GSM, WLAN et des dispositifs Bluetooth sont mis en place au niveau d'un ensemble de bâtiments. Une voiture contenant l'ordinateur portable parcourt lentement le trajet traversant

l'emplacement de ces stations. L'application développée enregistre à chaque instant l'emplacement du récepteur GPS, le nombre des satellites GPS, l'identité et la puissance du signal de chaque station WLAN détectée et de chaque station GSM détectée ainsi que l'identité et le type de chaque dispositif Bluetooth détecté. Une fois que les emplacements des stations (WLAN, GSM et Bluetooth) soient calculés et leurs puissances de signaux enregistrées, les positions de l'utilisateur sont estimées pour chaque technologie. Les résultats obtenus ont montré que le mariage GPS – WLAN présente les meilleures précisions : le GPS assure une meilleure localisation outdoor et le WLAN présente une meilleure précision à l'intérieur des bâtiments et au niveau des centres urbains.

Une fois la technologie indoor choisie (WLAN), le système hybride de localisation indoor/outdoor « *Always Best Located* » (**Figure 2.2**) est alors proposé en utilisant un nouvel algorithme : détection du meilleur emplacement (REYERO et al., 2008).

## **2.4.2. Hybridation serrée**

### **2.4.2.1. Localisation hybride par fusion des techniques ToA, TDoA et RSSI**

Comme présenté dans la première partie de cette étude bibliographique, il existe un nombre de techniques de localisation qui peuvent être utilisées, séparément, pour la mise en place de systèmes de localisation « mono-technique » (non hybrides).

Plusieurs travaux ont traité la possibilité d'en combiner deux ou plus afin de proposer des solutions par des systèmes hybrides de localisation qui assurent de meilleures performances de point de vue sécurité et fiabilité.

Un de ces travaux a été présenté dans (LAARAIEDH, 2010) en proposant une hybridation algébrique et une hybridation géométrique des techniques RSSI, ToA et TDoA : ToA + RSSI, TDoA + RSSI, ToA+TDoA et ToA+TDoA+RSSI.

Ce processus d'hybridation consiste essentiellement à commencer par établir une modélisation de chaque technique de localisation puis à combiner ces techniques afin de choisir celle qui présente les meilleures performances (« ToA + RSSI » ou « TDoA + RSSI » ou « ToA+TDoA » ou « ToA+TDoA+RSSI »). Ce choix est basé sur les deux algorithmes « Fisher Information » et « Cramer-Rao Lower Bound » qui permettent d'évaluer les performances de chaque technique selon l'environnement de test.

#### 2.4.2.2. Localisation Hybride ToA/AoA

Vu la diversité des opérateurs mobiles, assurer un service meilleur et des applications plus originales s'avère une nécessité pressante. Ainsi, la localisation des abonnés des différents systèmes mobiles (GSM) est devenue un axe de recherche très sollicité. Plusieurs techniques ont été testées.

Dans (DELIGINNIAS et al., 2009), les auteurs proposent un système hybride de localisation qui combine les deux techniques les plus utilisées dans la localisation dans réseaux mobiles, à savoir ToA et AoA. L'approche proposée commence par réaliser une révision mathématique des deux techniques ToA et AoA : Enhanced ToA (E-ToA) et enhanced AoA (E-AoA), puis met en place un système hybride combinant ces deux techniques (E-ToA et E-AoA).

La combinaison de ces deux techniques révisées est assurée par l'introduction de coefficients de précision qui caractérisent le degré d'atténuation propre à la propagation NLOS des deux techniques.

Ce système a été testé dans trois environnements différents incluant l'intérieur des bâtiments : zone rurale, zone urbaine, centre ville. Les résultats ont montré une amélioration de la précision de localisation de 40% (DELIGINNIAS et al., 2009).

#### 2.4.2.3. Localisation Hybride Ultrason/radio

Un des systèmes les plus connus en littérature est le système Cricket (PRIYANTHA et al., 2000). Ce système a été développé dans le cadre du projet Oxygen du MIT. Il est parmi les premiers systèmes de localisation hybride en combinant deux technologies différentes : l'ultrason et la radio. En effet, le système Cricket exploite les informations provenant d'une interface ultrason ainsi que celles provenant d'une interface radio pour estimer la distance.



**Figure 2.3** Un nœud Cricket, figure inspirée des travaux de(BODHI, 2005)

Les émetteurs ultrasons émettent deux types de signaux : des signaux radio qui contiennent des informations de localisation et une onde ultrason afin de synchroniser l'émetteur et le récepteur. Ces deux signaux sont détectés successivement par les capteurs (récepteurs). Ces derniers calculent alors la distance émetteur /récepteur et ceci en se basant sur les vitesses de propagation des deux ondes (radio et ultrason), leurs TOA (Temps d'arrivée) ainsi que la TDOA (différence des temps d'arrivée) calculée :

$$d = \frac{C_{ultrason} \times C_{radio}}{C_{radio} - C_{ultrason}} \times \Delta t$$

avec:  $TDOA = \Delta t = t_{ultrason} - t_{radio} = \frac{d}{C_{ultrason}} - \frac{d}{C_{radio}}$ ;  $C_{ultrason}$  et  $C_{radio}$  étant les vitesses de propagation respectives des signaux ultrason et radio.

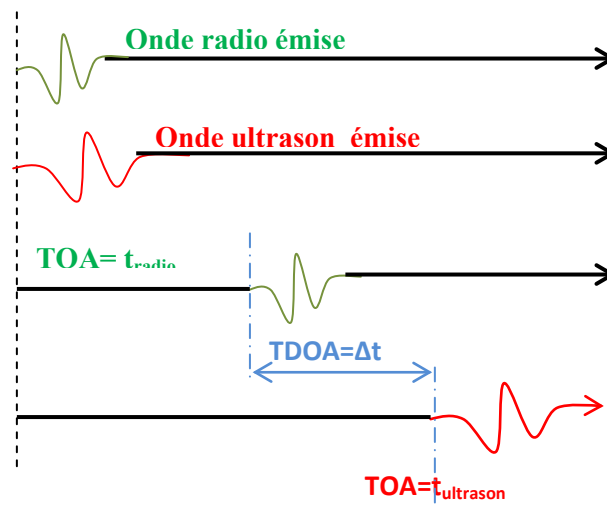


Figure 2.4- La TDOA dans le système Cricket

## 2.5. Indicateurs de précision pour une hybridation serrée

Généralement, tout signal se propageant à l'air libre est susceptible à des atténuations qui affectent sa puissance. Ainsi, nous pouvons affirmer que, plus la portée de la technologie est grande, plus les résultats, qu'elle retourne, soient précis. En outre, la disposition des balises (beacons, microphones, caméras, LEDs, ....) peut affecter la qualité des résultats retournés en termes de précision et exactitude. En effet, en prenant l'exemple du GPS, détaillé dans le

paragraphe 1.2.1, nous avons vu que selon les positions des quatre satellites que le récepteur GPS utilise pour le calcul de sa position, la précision du résultat varie énormément. L'utilisateur utilise donc cette information sur la précision du système pour évaluer la « confiance » à accorder aux résultats retournés.

Cette quête d'efficacité des résultats retournés par le système de localisation de point de vue précision et exactitude a longtemps constitué un axe de recherche assez intéressant, en ciblant plus particulièrement la géométrie ainsi que le signal lui-même.

Deux grandes familles d'indicateurs de précisions sont donc à considérer : les indicateurs d'optimisation de la géométrie et les indicateurs basés sur le signal lui-même.

### **2.5.1. Indicateurs de précision liés à l'emplacement des balises**

#### **2.5.1.1. DOP de GPS**

Le principe de dilution de précision du système GPS a été largement étudié en littérature (KAPLAN, 1996)(PARKINSON, 1996)(LEONARD, 1999)(EVENNOU, 2007). Il s'agit d'une métrique qui permet d'évaluer la qualité de la configuration géométrique des quatre satellites assurant la localisation de la cible.

En effet, comme nous l'avons détaillé au paragraphe 1.2.1, un récepteur GPS nécessite trois satellites afin de calculer sa position en 3 dimensions. Un quatrième satellite est utilisé afin de considérer l'erreur due à la non-synchronisation entre l'horloge du récepteur et celles des satellites. Il s'ensuit que la précision de la position retournée se trouve affectée par la disposition géométrique de ces satellites. Ainsi, le DOP est calculé en considérant la distance entre le récepteur GPS avec chacun de ces satellites.

#### ∨ Formule de Taylor

Par définition la série de Taylor, proposée par Brook Taylor en 1712, permet le développement d'une fonction  $g(x)$ , plusieurs fois dérivable, au voisinage d'un point  $x_0$ .

La forme développée est un polynôme dont les coefficients dépendent uniquement des dérivées de  $g(x)$  en  $x_0$ .

A cet effet, rappelons qu'une propriété est vérifiée « au voisinage » d'un réel  $y$  s'il existe  $\gamma > 0$  tel que pour tout  $x \in [y - \gamma, y + \gamma]$  cette propriété est vérifiée.



Ainsi, en nous basant sur ces définitions, considérons une fonction  $f(x)$  et soit un point  $x_0$  ;  $f(x)$  étant définie au voisinage du point  $x_0$ . Alors le développement de  $f(x)$  en série de Taylor au voisinage du point  $x_0$  est défini comme suit :

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!} (x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!} (x - x_0)^2 + \dots \quad (19)$$

### ✓ Formulation mathématique du DOP GPS

Afin de pouvoir générer la formulation mathématique du DOP, considérons le vecteur position  $\vec{r}_i$  du récepteur GPS par rapport au satellite  $i$  ( $i = 1,2,3,4$ ).

La distance  $\|\vec{r}_i\|$ , appelée pseudo-distance  $\rho_i$ , est déterminée en utilisant le temps de propagation (ToF) du signal radio émanant du satellite  $i$  vers le récepteur ainsi que la position du satellite  $i$ , qui est donnée dans le système ECR ( en anglais Earth Centered Rotational) :

$$\vec{r}_i = \vec{s}_i - \vec{u} \quad (20)$$

Où

- $\vec{s}_i (x_i, y_i, z_i)$  représente le vecteur entre le centre de la terre et le satellite  $i$
- $\vec{u} (x_u, y_u, z_u)$  représente le vecteur entre le centre de la terre et le récepteur GPS

Ainsi, la pseudo-distance relative au satellite  $i$  est définie comme suit (MOHINDER et al., 2001):

$$\rho_i = \|\vec{s}_i - \vec{u}\| + C \times t \quad (21)$$

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} + C \times t \quad (22)$$

Où  $C$  est la célérité de la lumière et  $t$  est l'offset de l'horloge du récepteur.

Plusieurs méthodes sont proposées pour résoudre ce système d'équations, les plus connues sont la méthode du filtre de Kalman (RAO and al., 1995) et la méthode des moindres carrés. Jugée plus simple et nécessitant peu de calcul, nous optons pour la seconde méthode.

La méthode des moindres carrés en linéarisant l'équation (17) par les séries de Taylor autour de la position du récepteur  $p_i(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u)$ :

$$\Delta\rho_i = \rho_i - \hat{\rho}_i = a_{xi}\Delta x_u + a_{yi}\Delta y_u + a_{zi}\Delta z_u - C \times \Delta t \quad (23)$$

$$\text{Où} \quad \begin{cases} a_{xi} = \frac{x_i - \hat{x}_i}{\sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 + (z_i - \hat{z}_i)^2}} \\ a_{yi} = \frac{y_i - \hat{y}_i}{\sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 + (z_i - \hat{z}_i)^2}} \\ a_{zi} = \frac{z_i - \hat{z}_i}{\sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 + (z_i - \hat{z}_i)^2}} \end{cases} \quad (24)$$

$$\text{et} \quad \begin{cases} \Delta x_u = x_i - \hat{x}_u \\ \Delta y_u = y_i - \hat{y}_u; \quad i = 1, 2, 3 \\ \Delta z_u = z_i - \hat{z}_u \end{cases} \quad (25)$$

Ce système peut être présenté sous une forme matricielle:

$$\Delta \rho = \begin{pmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \Delta \rho_3 \\ \Delta \rho_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & 1 \\ a_{x4} & a_{y4} & a_{z4} & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ -C \times \Delta t \end{pmatrix} \quad (26)$$

Cette formulation s'exprime sous sa forme matricielle réduite suivante :

$$\Delta \rho \approx H \Delta x \quad (27)$$

Nous en déduisons ainsi :

$$\Delta x \approx Q \Delta \rho \quad (28)$$

Où  $Q$  est la matrice pseudo-inverse. Elle peut être calculée selon l'équation suivante :

$$Q = (H^T H)^{-1} H^T \quad (29)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 & \sigma_{zt} \\ \sigma_{xt} & \sigma_{yt} & \sigma_{zt} & \sigma_t^2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Compte tenu des équations précédentes, le DOP est calculé comme suit :

$$DOP = \sqrt{\text{trace}(Q)} = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2} \quad (31)$$

En considération la relation entre les erreurs sur les positions des satellites et le DOP définie dans l'équation (27), nous pouvons conclure que plus cette métrique est grande, moins le système GPS est précis.

### 2.5.1.2. Généralisation du DOP du GPS en indoor

En littérature, le DOP est utilisé afin d'évaluer la précision des résultats retournés par le GPS avec la seule information qu'on a est celle sur les erreurs sur les positions des satellites :

$$DOP = \frac{\text{Erreur sur la position calculée du récepteur}}{\text{Erreur sur la position des satellites}} \quad (32)$$

Cette métrique a été une source d'inspiration pour plusieurs chercheurs constituant ainsi la base de plusieurs indicateurs de précision, citons particulièrement les travaux de (SALEM, 2014)(KAMMOUN et al., 2014)(BAIS et al., 2014)(ZIRARI et al., 2009)(DEMPSTER, 2006)(LEE, 1975)...

En effet, dans (SALEM, 2014), l'auteur propose SHMPS. Il s'agit d'un système hybride de localisation indoor/outdoor à travers la fusion entre plusieurs technologies : l'analyse d'images, les données GPS et le WiFi. La continuité entre les résultats de chacune de ces technologies est assurée par la proposition de deux indicateurs de précision DOP WiFi et DOP Image.

Le DOP WiFi est calculé en considérant le déploiement des points d'accès « visibles », dont la puissance de signal est supérieure à un certain seuil ainsi que le modèle d'atténuation du signal WiFi :

$$d_i = \sqrt{(X_i - x_u)^2 + (Y_i - y_u)^2 + (Z_i - z_u)^2} \quad (33)$$

Où :

- $d_i$  est le rayon du cercle de la zone couverte par le point d'accès  $AP_i$ , de coordonnées connues  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ,  $d_i$  est calculé en considérant le modèle de FRIIS (FRIIS, 1946),
- $\vec{u}(x_u, y_u, z_u)$  représente les coordonnées inconnues de l'utilisateur.

Ainsi :

$$DOP\_WiFi = \sqrt{\text{trace}(G)} \quad (34)$$

Avec :

- $G = (H_p^T H_p)^{-1}$ ,
- $H_p$  est une « matrice force » que l'auteur établit en se basant sur les puissances des points d'accès visibles.

Dans (KAMMOUN et al., 2014), les auteurs proposent un indicateur de précision dans le but d'améliorer les performances du système de localisation indoor en agissant sur la disposition des balises tout en considérant les contraintes topologiques du bâtiment. L'indicateur proposé est une extension du DOP GPS pour des mesures RSS des balises exploitées.

### 2.5.2. Indicateurs de précision liés aux propriétés des technologies de localisation

Généralement, tout signal se propageant à l'air libre subit des atténuations qui affaiblissent sa puissance. Dans la littérature, plusieurs modèles ont été proposés afin de représenter cet affaiblissement et ce en fonction de la technologie mise en œuvre.

En effet, si nous prenons l'exemple du son qui est un ensemble d'ondes mécaniques longitudinales caractérisées par des fluctuations, aussi bien de densité que de pression qui se propagent dans l'air. De façon générale, la puissance du son se répartit dans l'espace sous forme de surfaces sphériques successives dont le centre est la source sonore : plus le capteur s'éloigne de cette source, plus l'intensité du son (sa surface par unité de surface) diminue. Cette atténuation est due à l'absorption atmosphérique et elle est souvent représentée par la formule suivante :

$$I(d) = \frac{P \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (35)$$

Où  $I$  désigne l'intensité acoustique,  $P$  la puissance acoustique ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $Q$  le coefficient de directivité et  $d$  la distance.

Pour le cas des ondes radio, l'atténuation de la puissance du signal radio en fonction de la distance est généralement modélisée par le modèle de propagation en espace libre "Free space model" (voir section 1.4.1.1) :

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t \times G_r \times \frac{1}{L} \times \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

où  $P_t$  est la puissance d'émission radio,  $P_r$  est la puissance de réception,  $G_t$  et  $G_r$  sont les gains respectifs de l'antenne émettrice et de l'antenne réceptrice,  $L$  est la perte du système et  $\lambda$  est la longueur d'onde.

Comme nous pouvons le comprendre, plus nous nous éloignons de la source du signal, plus sa puissance et sa stabilité diminuent. Par stabilité, nous désignons la répétitivité et la reproductibilité des mesures de la puissance du signal en question en le même point. Ainsi, la probabilité d'avoir un signal stable et puissant diminue avec la distance. Cette probabilité a été représentée dans la littérature par un « score de confiance ». Le principe de ce score est d'évaluer le niveau de « confiance » à accorder aux résultats retournés par un système de localisation.

En effet, dans (CHAN et al., 2006), les auteurs proposent un système de localisation à base de la technologie WiFi. Afin d'estimer le taux de confiance à accorder aux résultats retournés par ce système de localisation, les auteurs proposent un « score ». Ce score permet d'évaluer la probabilité que la position calculée soit proche à la position réelle. Ainsi, un « score de confiance » élevé implique une importante probabilité que la position estimée soit « stable » durant un intervalle de temps :

$$Conf(t) = e^{-\frac{[\sum_{i=0}^s w(i).uc(t-i)]^2}{K}} \quad (36)$$

Avec  $t$  le timbre temporel,  $s$  la longueur de la fenêtre temporelle et  $K$  est une constante d'ajustement.  $w(i)$  est le poids des incertitudes accumulées au moment  $i$  et  $uc(t - i)$  dénote l'incertitude d'une position, il s'agit de la différence entre la position retournée et la position estimée par un filtre particulière à un instant  $(t - i)$ .

$Conf(t) \in [0,1]$  : plus ce score est proche de 1, plus la position retournée par le système à l'instant  $t$  est proche de celle retournée par un filtre particulière et inversement.

Dans (TANIUCHI et al., 2015), les auteurs proposent une autre façon d'estimer ce « score de confiance ». En effet, le système de localisation proposé permet d'estimer la position d'un mobile en combinant les mesures RSS WiFi et RSS Bluetooth. Ce système opère en trois étape :

- (1) Estimation des positions des mobiles en utilisant les RSS WiFi : chaque mobile mesure de façon continue la puissance du signal reçu à partir des points d'accès déployés dans le bâtiment et calcule sa position.

- (2) Score de confiance : Pour chaque position calculée  $pos(x)$ , un score lui est attribué  $conf(x)$  évaluant la probabilité que cette position soit précise. Il s'agit du « score de confiance » :  $\langle Pos(x), conf(x) \rangle$  :

$$Conf(x) = e^{-|\sigma_x|} \quad (37)$$

Où  $\sigma_x$  dénote l'écart type des coordonnées des positions calculées du même mobile.

- (3) Correction des positions « précises » par les mesures RSS Bluetooth entre mobiles.

## 2.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les principaux exemples de systèmes hybrides de localisation mettant en jeu un ensemble de techniques et technologies de localisation. L'accent a été mis, à chaque fois, sur la technique d'hybridation de ces systèmes : « fusion » ou « sélection » via des métriques de pondération.

Dans le prochain chapitre, nous allons annoncer notre approche d'hybridation originale de techniques et technologies de localisation. Une modélisation mathématique des technologies, mises en jeu, sera établie. Une attention particulière sera accordée à la technique d'hybridation que nous mettons en jeu. En effet, de nouvelles métriques seront introduites se basant sur des fondements théoriques.

# Chapitre 3 Approche proposée : Système de localisation Hybride Audio-Radio-Lumière

## 3.1. Introduction

Comme nous l'avons présenté dans les deux premiers chapitres de ce mémoire, chaque technique et technologie de localisation présente ses points forts ainsi que ses propres faiblesses. L'objectif de notre travail est donc de tirer profit de ces points forts et d'en éviter les points faibles. Un tel objectif est assuré par la combinaison de certaines techniques et technologies afin de proposer un système hybride de localisation indoor précis et exact.

Dans ce chapitre, nous présentons les composantes de notre nouveau système de localisation en étalant les différentes étapes de notre approche d'hybridation

## 3.2. Cahier des charges

Notre thèse constitue une application particulière de l'assistance à domicile d'une personne âgée dans une maison intelligente. Cette application projetée doit répondre aux objectifs suivants :

- Notre système de localisation doit être capable de retourner les coordonnées 2D d'une cible à l'intérieur d'un bâtiment ; l'information sur l'élévation (coordonnée z) ne constitue pas une donnée importante dans notre cas.
- Le système de coordonnées de la cible est cartésien, dont l'origine est un des coins de la salle à l'intérieur du bâtiment.
- Les résultats à retourner par notre système doivent être aussi précis qu'exactes.
- Les composantes du système à proposer doivent bien s'intégrer à l'environnement ambiant à localiser sans nuire à la personne cible.

Afin d'atteindre les objectifs fixés, le système de localisation hybride que nous proposons combine trois technologies : radio, audio et lumière (**Figure 3.1**).

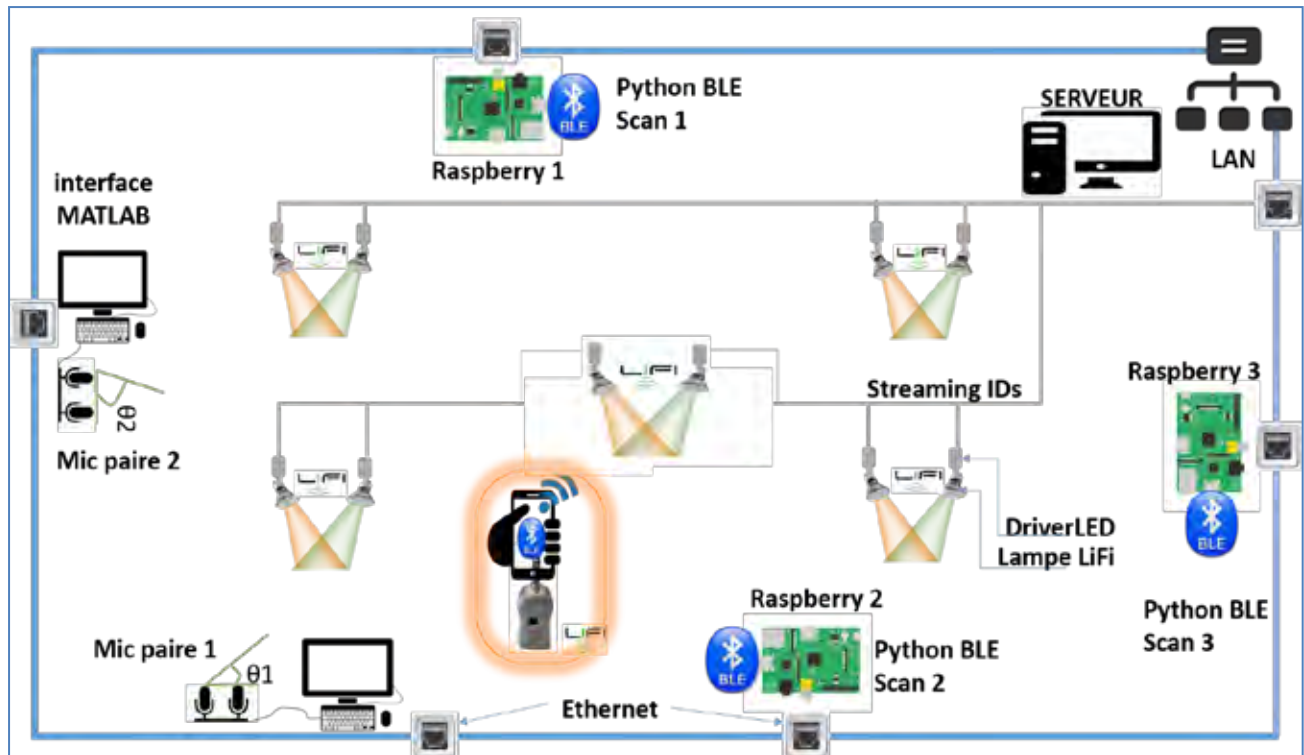


Figure 3.1- Architecture de l'approche proposée

Trois sous-systèmes sont alors proposés mettant en œuvre chacun une technologie et technique de localisation :

- ✓ **Sous-système de localisation radio:** Trois ancres BLE (*Bluetooth Low Energie*) sont déployés dans la pièce captant de façon périodique les signaux BLE émis par un émetteur BLE fixé sur la cible. La technologie BLE est combinée à la technique de trilatération afin de localiser cette cible.
- ✓ **Sous-système de localisation audio:** Le son émis par une source sonore fixée sur la cible est capté par un réseau de quatre microphones. Le son est traité puis utilisé afin d'estimer la position de la source en exploitant la technique de triangulation.
- ✓ **Sous-système de localisation lumière:** Nous proposons de mettre en jeu le protocole LiFi (Light Fidelity) afin d'estimer les coordonnées de la cible.

Or les trois sous-systèmes que nous proposons se basent sur des observations expérimentales recueillies en temps réel (son, onde BLE, lumière) dépendant directement des variations jugées dynamiques du milieu d'étude. Une étape de filtrage de ces données est alors indispensable en rejetant celles qui sont susceptibles d'être aberrantes ou non représentatives. Nous appliquerons cette opération de rejet des données aberrantes aussi bien sur les



données d'entrée aux sous-systèmes qu'aux résultats obtenus. Ainsi, pour chaque sous-système,  $N$  acquisitions seront traitées avec une périodicité  $T$ . Ces deux paramètres seront fixés pour chaque sous-système selon leurs effets sur le temps de calcul sans gêner la personne à localiser.

Outre cela, le principe de combinaison des trois sous-systèmes que nous proposons repose sur la fusion de leurs résultats respectifs via la mise en œuvre de trois nouvelles métriques « DOP-Like » que nous proposons afin d'évaluer le degré de « précision » et « d'exactitude » du résultat de chaque sous-système. Cette évaluation sert à constituer une pondération des résultats intermédiaires afin de calculer le résultat final.

### **3.3. Système de localisation hybride proposé**

#### **3.3.1. Rappel sur le rejet des données aberrantes (*Outlier Removal*)**

Les enjeux des données recueillies lors du processus de localisation sont importants dans le sens où chaque imprécision sur ces données impliquera forcément une imprécision sur le résultat escompté. Parfois, quelques-unes de ces données peuvent ne pas correspondre avec la tendance globale du reste de la collection ce qui entraîne une grande divergence des résultats obtenus.

En effet, ces données sont généralement des observations enregistrées suite à des expérimentations faites dans des conditions dynamiques. Comme nous l'avons indiqué dans 2.2.2, il existe plusieurs sources de ces données aberrantes tel est le cas des erreurs de mesure ou les erreurs d'exécution.

Une opération de filtrage de ces données s'avère nécessaire afin de garder les « données pertinentes » et rejeter « données aberrantes ». Il s'agit d'éliminer toute source d'erreur susceptible de dévier la précision et l'exactitude du système. Toutefois, une observation jugée aberrante n'est pas nécessairement erronée. Ainsi, avant d'appliquer une méthode de rejet de données aberrantes, nous devons avant tout nous assurer que l'échantillon à étudier n'est pas lui-même erroné.

Plusieurs méthodes de rejet de données aberrantes existent dans la statistique en réalisant des comparaisons par rapport à l'écart-type de la collection tel est le cas du Test de Grubbs (GRUBBS, 1969), le Test de Peirce (PEIRCE, 1852), le Test Q (SKOOG et al., 2004), le Test de Mahalanobis (MAHALANOBIS, 1936), méthode de Thompson  $\tau$  (THOMPSON, 1985)...

Dans notre travail, nous appliquons une de ces méthodes, celle du Thompson  $\tau$  modifié, en suivant les étapes suivantes (CIMBALA, 2011):

- Nous disposons d'une « distribution » de données  $x_i; i = 1, \dots, N$ ;  $N$  étant le nombre de données choisi au préalable,
- Nous commençons par calculer la moyenne  $S$  des données de cette distribution,
- Pour chacune de ces données, nous calculons l'écart absolu  $\delta_i$  par rapport à la moyenne de la distribution :  $\delta_i = |x_i - S|$ ,
- A ce stade, la donnée la plus suspectée d'être une « donnée aberrante » est celle ayant la plus grande valeur de  $\delta_i$ ,
- La valeur de  $\tau$  est calculée en appliquant la formule suivante :

$$\tau = \frac{t_{\alpha/2}(n-1)}{\sqrt{n} \sqrt{n-2+t_{\alpha/2}^2}} \quad (38)$$

- Une table est donnée dans (CIMBALA, 2011) permettant de trouver la valeur de  $\tau$  selon la valeur du  $N$ ,
- Une « zone de rejet » est alors établie en fonction de la valeur de  $\tau$  :
  - Si  $\delta_i > \tau \times S$ , la donnée  $x_i$  est considérée « aberrante »,
  - Si  $\delta_j \leq \tau \times S$ , la donnée  $x_j$  est considérée « pertinente ».
- La donnée jugée « aberrante » ayant la plus grande valeur de  $\delta_j$  est rejetée,
- Cette donnée rejetée est éliminée de la distribution
- Le processus de rejet est repris pour cette nouvelle distribution en considérant une valeur de  $S$  et une valeur de  $\tau$ ,
- Ce processus se répète jusqu'à ne plus avoir de données aberrantes.

### 3.3.2. Sous-système de localisation audio

Le sous-système de localisation sonore que nous proposons s'inspire essentiellement de l'opération de perception de sons chez les mammifères, plus particulièrement chez les humains. En effet, l'être humain est capable de percevoir la direction d'un son, en utilisant seulement deux oreilles, et ce, à travers une succession de conversions d'informations de pressions (ondes sonores) en données électriques (activités nerveuses) pouvant être traitées par le cerveau humain. Intégrées à d'autres données sensorielles, ces activités nerveuses peuvent être utilisées afin de guider les réactions de l'être humain (ARGENTIERI, 2006). Agissant en tant que transducteur mécanique (microphone), l'oreille humaine assure la

conversion d'une onde sonore à travers ses trois parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne. Généralement, l'oreille humaine n'est capable de percevoir qu'une gamme de fréquences, dites « audibles » qui s'étendent de 20 Hz à 20KHz.

Ainsi, notre idée est de concevoir un système de localisation d'un son audible via un réseau de microphones.

Comme nous l'avons annoncé plus haut, à l'instar des humains, la détection de la direction d'un son nécessite deux microphones, mais, en considérant des opérations géométriques, la détermination de sa position requiert quatre microphones. La disposition géométrique de ces quatre microphones est en L.

De ce fait, le principe de base du processus de localisation audio, comme nous l'avons abordé dans nos travaux (THALJAOUÏ et al., 2014)(THALJAOUÏ et al.bis, 2014)(NASRI et al., 2015), combine les données physiques et géométriques des ondes sonores.

Avant de passer à la description du principe de notre premier sous-système, nous détaillons dans ce qui suit les hypothèses que nous avons considérées lors de sa conception.

### **3.3.2.1. Hypothèses**

#### **3.3.2.1.1 Choix du signal sonore**

Le premier détail à considérer est le type du signal sonore que nous devrions utiliser. En effet, l'application que nous nous proposons de concevoir est destinée à l'utilisation humaine, il ne doit pas être gênant à l'oreille humaine. Il existe alors principalement trois paramètres à prendre, à savoir:

- Le contenu du signal : Afin de simplifier la détection du signal par notre système et suite à une série d'expérimentations, nous avons choisi un signal simple constitué d'une seule fréquence (4 KHz). Un tel son peut être émis par un émetteur fixé sur la personne à localiser.
- Durée et périodicité du signal : La durée du signal à considérer doit être assez courte pour ne pas être gênante à la personne à localiser et assez longue pour être détectée de manière fiable, surtout en présence de sources de bruit. Suite à une série d'expérimentations, nous avons choisi une durée de signal de 100 ms.
- Distance entre la source sonore et les microphones : Pour plus de simplicité, nous supposons que le milieu d'étude est un milieu homogène et isotrope et que l'onde

acoustique résultant de la source sonore est « **plane** ». Rappelons qu'en appliquant le principe de diffraction de Huygens-Fresnel (FRESNEL et al., 1870) aux ondes acoustiques, l'onde captée par un récepteur peut être considérée comme étant le résultat d'une succession d'ondes sphériques émises par l'ensemble des points de chaque front d'onde. Dans le cas où la source sonore est assez éloignée du récepteur, ces fronts d'ondes prennent la forme de plans infinis tous perpendiculaires à la direction de l'onde.

### **3.3.2.1.2      *Choix des Microphones***

Appelé en électronique un transducteur électrostatique, un microphone permet de transformer une énergie acoustique transportée par une onde sonore en une énergie mécanique (mouvement de la membrane du microphone) pour être finalement perçue en tant qu'énergie électrique.

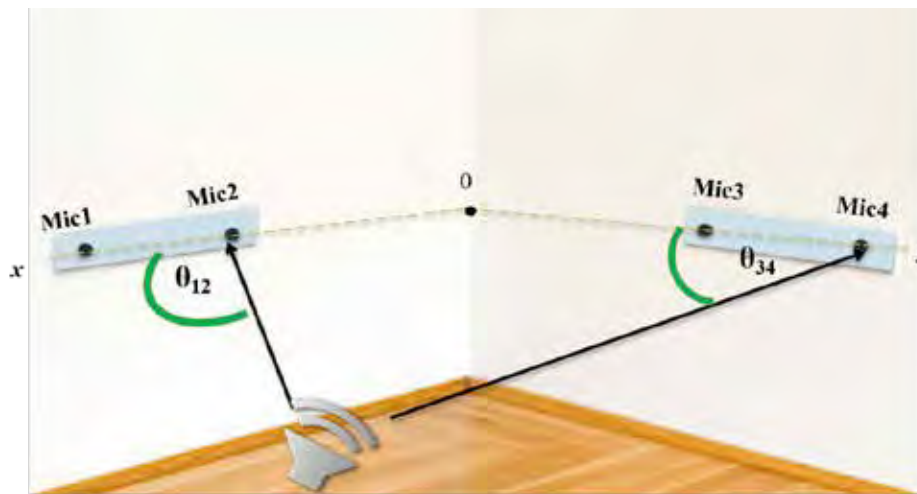
Le choix du type de microphones à utiliser dans notre cas d'application repose essentiellement sur deux paramètres : la disposition géométrique des microphones dans la pièce ainsi que la qualité de leur réponse par rapport aux conditions environnantes (bruits, température, humidité, ...).

Comme détaillé dans (GLYNN, 2016) et (HUB, 2013), il existe plusieurs types de microphones selon leurs applications, leurs directivités, leurs tailles ainsi que leurs composantes électroniques. En effet, si pour les microphones dynamiques, nous notons une meilleure sensibilité aux vibrations et à l'humidité ainsi qu'une meilleure stabilité, faisant de lui l'instrument le plus utilisé par les musiciens, son caractère omnidirectionnel peut gêner une prise de son nette dans un milieu confiné et bruyant. Une meilleure solution pour notre cas serait donc d'opter pour un microphone directionnel, pouvant être utilisé dans des conditions sensibles de prise de son (variation d'humidité et de température, bruits ambiants, ...) et avec une possibilité de miniaturisation pour une meilleure adaptation à notre environnement d'étude. Ces caractéristiques sont assurées par un microphone à électret.

### **3.3.2.1.3      *Disposition géométrique du réseau de microphones***

Etant unidirectionnels, les quatre microphones constituant le sous-système de localisation audio que nous proposons doivent être géométriquement disposés de façon à couvrir tout l'environnement d'étude sans pour autant nuire à la personne à localiser. Ils seront alors fixés sur les cloisons de la pièce, prenant la forme en L (en anglais *L-shaped*).

Ainsi, si deux microphones retournent la direction du son audible, quatre microphones permettront de calculer la position de la source de ce son.



**Figure 3.2-** Réseau de quatre microphones disposés en L

### 3.3.2.2. Principe du sous-système audio proposé

Le sous-système de localisation audio que nous proposons emploie un réseau de deux barres munies chacune de deux microphones.

Ce module permet la localisation d'une source sonore en estimant pour chaque période d'acquisition ( $T_{ac}$ ) sa direction d'arrivée ( $\theta$ ) par rapport à chacun des deux barres en exploitant les différences des temps d'arrivée ( $TDOA$  ou  $\tau$ ) des signaux sonores captés par chacun des microphones.

Les estimations des directions d'arrivée permettent ainsi la détermination, à chaque  $T_{ac}$ , de la position de la source sonore. En effet, si nous considérons deux récepteurs (microphones) géométriquement séparés et compte tenu la vitesse du son dans l'air, ces deux microphones perçoivent le signal acoustique de façon décalée dans le temps. Ce décalage dénote la différence des temps d'arrivée du même signal sonore aux deux microphones. Il s'agit du retard que fait le signal sonore détecté par le premier microphone avant d'être perçu par le second microphone (**Figure 3.3**).

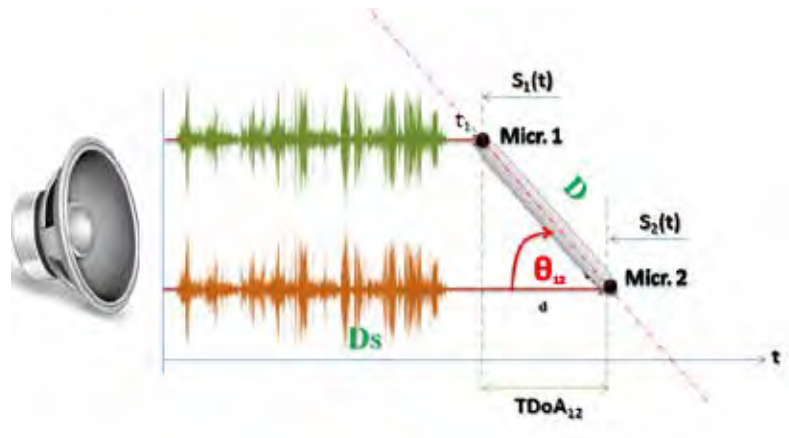


Figure 3.3- Différence de temps d'arrivée (TDoA)

Ce retard est exploité afin de déterminer la direction d'arrivée du son. Deux directions d'arrivée permettraient ainsi de déterminer la provenance du son.

Nous procédons ainsi en deux étapes :

- ✓ Estimation des directions d'arrivée pour chaque barre de microphones
- ✓ Calcul des coordonnées de la source sonore dans le plan  $(O, x, y)$  par la technique de triangulation

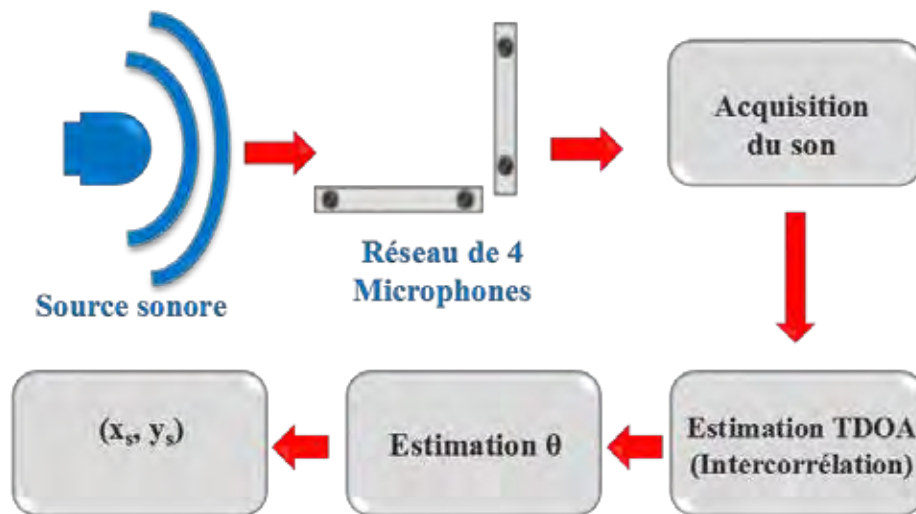


Figure 3.4- Principe du sous-système de localisation audio

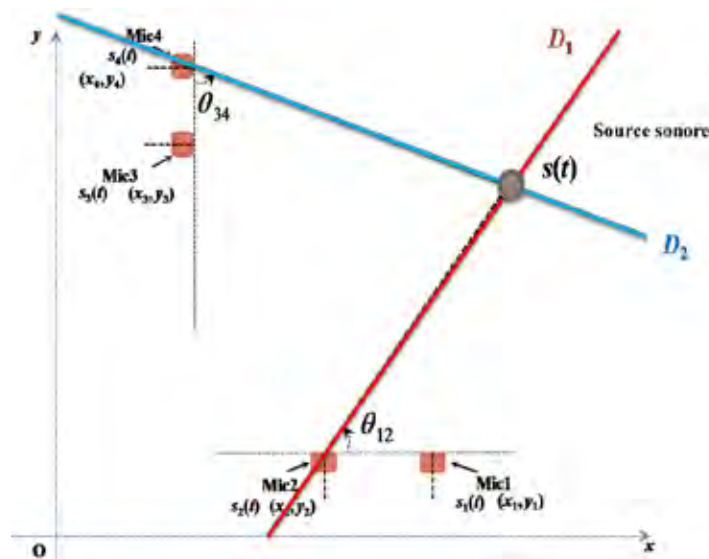
### 3.3.2.2.1 1ère phase : Ranging

Le principe de l'estimation de la direction d'arrivée ( $\theta$ ) d'une onde sonore repose sur le calcul de ses temps de capture par chaque microphone puis en déduire le retard ( $\tau$ ) ou la différence d'arrivée (*TdOA*) entre ces deux microphones.

Rappelons que notre sous système de localisation audio s'inspire du fonctionnement du système d'audition chez l'être humain. En effet, les Hommes sont généralement capables de déterminer la direction d'arrivée d'un son, et ce en utilisant ses deux oreilles. C'est la combinaison des deux signaux légèrement en retard l'un de l'autre, perçus par nos oreilles qui nous permet de déduire, la direction de ce son. Ainsi, de façon intuitive, l'exploitation du retard que met un son pour arriver à deux microphones pourrait nous conduire à déterminer la Direction d'Arrivée de ce son.

Nous supposons que le rapport entre  $D_s$  (la distance séparant la source du réseau de microphones) et  $D$  (la distance entre les deux capteurs) est suffisamment important. Il est donc possible de considérer que l'onde sonore captée est plane.

Ainsi, considérant les hypothèses que nous avons fixées, l'architecture du sous-système de localisation audio est donnée par la **Figure 3.5** :

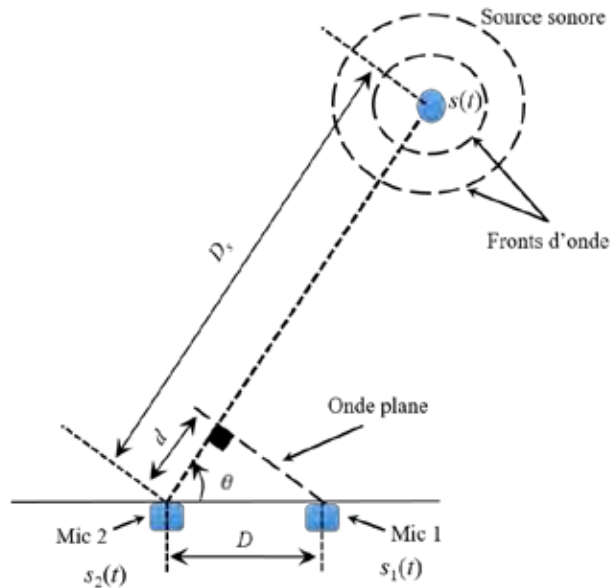


**Figure 3.5-** Réseau de quatre microphones

### A. Estimation de la Direction d'arrivée

Le travail réalisé dans cette partie est valable pour chacun des deux paires de microphones.

Considérons alors le réseau de deux microphones suivant :



**Figure 3.6-** Réseau de deux microphones

Notons :

- $\theta$  l'angle indiquant la direction d'arrivée de l'onde sonore ;  $\theta \in ]0 \pi[$ .
- $D_s$  = distance entre S et Mic2
- $D_s - d$  = distance entre S et Mic1
- $v$  : vitesse de propagation du son dans l'air:  $v = (331 + 0.6 \times T)$  m/s ; où  $T$  : température en °C
- $d = (t_2 - t_1) \times v$  ; où  $t_1$  (respectivement  $t_2$ ) est le temps d'arrivée du signal sonore au niveau du microphone n°1 (respectivement du microphone n°2).
- $(t_2 - t_1)$  dénote ainsi le retard  $\tau$  que met le signal pour arriver au microphone n°2 par rapport au microphone n°1. En fait, le signal  $s_2$  reçu par le microphone n°2 est une version plus ou moins retardée du signal  $s_1$  reçu par le microphone 1 (selon le signe de  $\tau$ ). Il s'agit donc de la différence du temps d'arrivée TDoA.

Ainsi :

$$TDoA = \tau = \frac{d}{v} \quad (39)$$



En nous référant à la Figure 3.6, afin de déterminer l'angle  $\theta$ , nous appliquons les formules de la trigonométrie pour un triangle rectangle :

$$\cos \theta = \frac{d}{D} = \frac{\tau \times v}{D} \quad (40)$$

Ce qui donne :

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\tau \times v}{D} \quad (41)$$

### **B. Estimation de la TDoA**

Afin de pouvoir appliquer l'équation (42), il nous faut la connaissance de la valeur du retard (TDoA). Une des méthodes les plus utilisées pour l'estimation du TDoA est la méthode d'inter-corrélation (en anglais Cross-Correlation GC).

Le concept de cette méthode vise à extraire le taux de ressemblance entre les deux signaux  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$ . Dans le cas de signaux continus, cette fonction est donnée par:

$$C_{s_1s_2}(t) = \int_{-T}^{+T} s_1(t) s_2(t - \tau) d\tau \quad (42)$$

Il s'agit donc de comparer deux signaux l'un décalé dans le temps de l'autre. Le principe est de balayer le premier signal selon un axe de temps  $i$  croissant alors que le second signal est décalé d'un retard  $\tau$  mais balaie le temps à l'envers ( $-i$ ). La fonction d'inter-corrélation prend comme paramètres d'entrée deux vecteur  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{B}$  représentant respectivement les deux signaux audio captés par les deux microphones (dans notre cas, les signaux  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$ ). Ces signaux sont "glissés" l'un à travers l'autre dans tous les points pour aboutir enfin à un vecteur  $\mathbf{C}$  de longueur donnée par :  $longueur(\mathbf{C}) = (longueur(\mathbf{A}) + longueur(\mathbf{B})) - 1$ .

La valeur maximale que peut prendre le vecteur obtenu  $\mathbf{C}$  représente en fait la position de la similarité maximale entre les deux vecteur  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{B}$  (respectivement les deux signaux  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$ ) moyennant un délai  $\tau$ .

Dans notre cas, les signaux observés sont échantillonnés, l'équation (43) devient alors :

$$C_{s_1s_2}(\tau) = \sum_{-T}^{+T} s_1(n) s_2(n - \tau) \quad (43)$$

Le retard est obtenu en détectant le pic maximum de cette fonction (GU et al., 2012) :

$$\tau = Argmax(C_{s_1s_2}) \quad (44)$$

Cependant, dans le domaine temporel, les performances de cette méthode sont affectées par plusieurs facteurs tels que le phénomène d'autocorrélation du signal sonore et les phénomènes de réflexion.

Une des solutions possibles est de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel. Il s'agit dans ce cas de la méthode d'intercorrélation généralisée (en anglais Generalized Cross-Correlation GCC). Cette méthode a été proposée par Knapp et Carter en 1976 (KNAPP et al., 1976). En fait, la GCC est une GC précédée par un filtre afin de minimiser le bruit additif dû au canal de transmission. En fait, comme expliqué dans (KNAPP et al., 1976), le but de la GCC est de rendre plus net le pic du maximum de ressemblance entre les deux signaux captés par les deux microphones et ce en les filtrant dans le domaine fréquentiel par l'ajout d'une fonction de pondération (en anglais *weighting function*) :

$$GCC_{s_1s_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_g(f) \times G_{s_1s_2}(f) \times e^{j2\pi f\tau} df \quad (45)$$

où  $G_{s_1s_2}(f)$  est le spectre croisé (en anglais *cross-spectrum*) des deux signaux, défini par:

$$G_{s_1s_2}(f) = S_1(f) \times S_2^*(f) \quad (46)$$

Et  $\Psi_g(f)$  est la fonction générale de pondération du domaine fréquentiel:

$$\Psi_g(f) = H_1(f) \times H_2^*(f) \quad (47)$$

Comme nous pouvons le remarquer, les performances de la GCC dépendent du choix de cette fonction de pondération  $\Psi_g(f)$ . Les fonctions de pondération les plus utilisées sont données dans le tableau suivant :

Méthode	Fonction de pondération
GCC-PHAT (KNAPP, 1976)	$\frac{1}{ S_{s_1s_2}(\omega) }$
GCC-ROTH (ROTH, 1971)	$\frac{1}{S_{s_1s_1}(\omega)}$
GCC-SCOT (CARTER, 1973)	$\frac{1}{\sqrt{S_{s_1s_1}(\omega) \times S_{s_2s_2}(\omega)}}$
GCC-Cps-m (KNAPP, 1976)	$\frac{1}{\beta \sqrt{S_{s_1s_1}(\omega) \times S_{s_2s_2}(\omega)}}$ ; $\beta$ varie de 0.5 à 1
GCC-ECKART (TIANSHUANG, 1996)	$\frac{ G_{xy}(\omega) }{(S_{s_1s_1}(\omega) -  S_{s_1s_2}(\omega) ) \times (S_{s_2s_2}(\omega) -  S_{s_1s_2}(\omega) )}$
GCC-HB (CHEN, 2006)	$\frac{ S_{s_1s_2}(\omega) }{S_{s_1s_1}(\omega) \times S_{s_2s_2}(\omega)}$

Tableau 3-1: Différentes Méthodes GCC

Le choix de la meilleure méthode à adopter pour notre système de localisation fera l'objet d'une évaluation expérimentale dans la section 4.3.1.1.

### 3.3.2.2.2 2ème phase : Positioning

Si pendant la première étape du processus de localisation acoustique, notre sous-système détecte la direction d'arrivée de l'onde sonore par rapport à chaque paire de microphones, cette étape vise à localiser la source de cette onde dans un plan  $(O, x, y)$ .

En continuant à supposer que l'onde sonore captée par les quatre microphones est plane, nous proposons la disposition suivante des deux paires de microphones (« L-shaped ») :

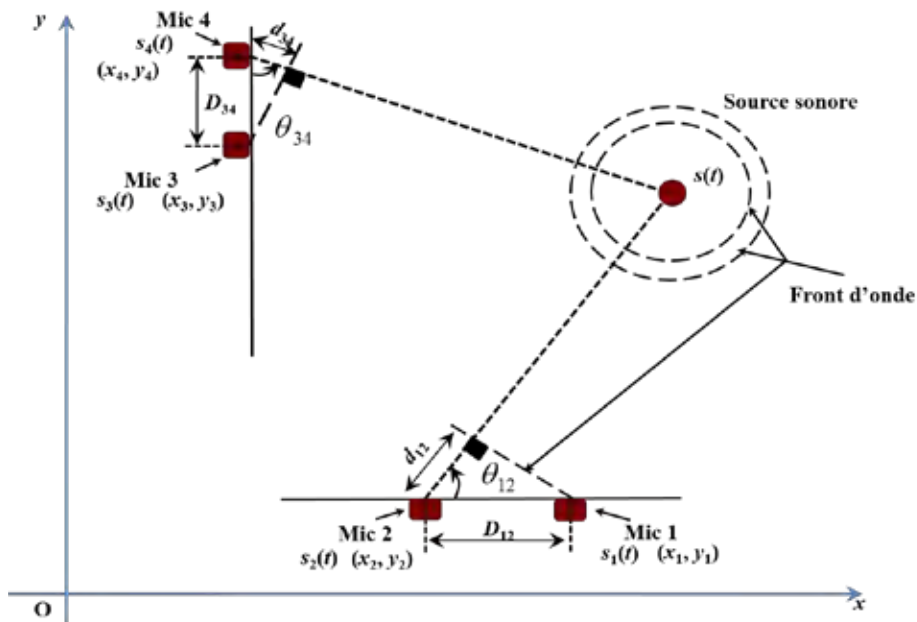


Figure 3.7- Localisation d'une sonore par un réseau de 4 microphones

Une fois les directions d'arrivée  $\theta_{12}$  et  $\theta_{34}$  de chacun des deux paires de microphones sont estimées, nous pouvons calculer les coordonnées de la source sonore dans le plan  $(O, x, y)$ .

Soient :

- $D_1$  d'équation  $y = a_{12}x + b_{12}$ : la droite qui relie la source sonore au Microphone n°2.
- $D_2$  d'équation  $y = a_{34}x + b_{34}$ : la droite qui relie la source sonore au Microphone n°4.

Notons  $(x_s, y_s)$  les coordonnées de la source sonore S dans le repère  $(O, \vec{x}, \vec{y})$ . Nous obtenons alors un système à deux équations et à deux inconnus :

$$\begin{cases} y_s = a_{12} \times x_s + b_{12} \\ y_s = a_{34} \times x_s + b_{34} \end{cases} \quad (48)$$

Ce système peut être résolu ainsi:

$$\begin{cases} y_s = a_{12} \times \frac{y_s - b_{34}}{a_{34}} + b_{12} \\ x_s = \frac{y_s - b_{34}}{a_{34}} \end{cases} \quad (49)$$

Il ne nous reste alors qu'à déterminer les équations de  $D_1$  et  $D_2$ .

#### **A. Equation de la droite $D_1$**

Soient  $(x_2, y_2)$  les coordonnées du microphone n° 2 dans le repère  $(O, \vec{x}, \vec{y})$ . Comme nous l'avons annoncé plus haut, l'équation de  $D_1$  s'écrit selon la formule:  $y = a_{12}x + b_{12}$

Il s'agit donc de déterminer  $a_{12}$  et  $b_{12}$  ; où  $a_{12}$  représente le coefficient angulaire de la droite. Il s'agit de la tangente de l'angle qu'elle forme avec l'axe des abscisses, dans notre cas :

$$a_{12} = \tan \theta_{12} .$$

Connaissant  $a_{12}$  ainsi que les coordonnées d'un point appartenant à cette droite, nous pouvons déterminer  $b_{12}$ . En effet,  $y_2 = a_{12}x_2 + b_{12} \Rightarrow b_{12} = y_2 - a_{12}x_2$ .

Ainsi l'équation de la droite que forme le capteur 2 avec la source S est donnée par :

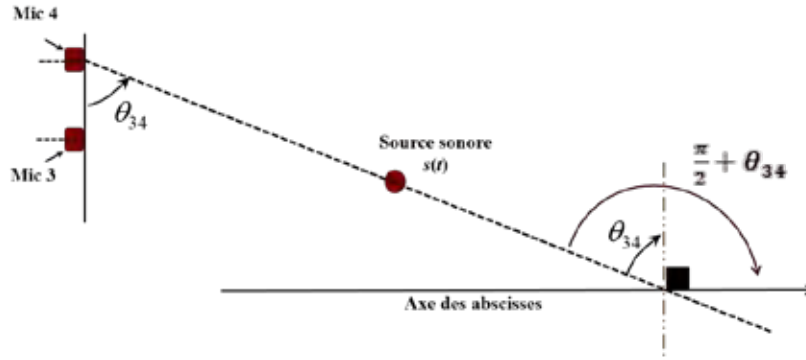
$$y = a_{12}x + b_{12} ; \text{ avec } \begin{cases} a_{12} = \tan \theta_{12} \\ b_{12} = y_2 - a_{12}x_2 \\ \theta_{12} = \cos^{-1} \frac{v \times r_{12}}{D_{12}} \end{cases} \quad (50)$$

#### **B. Equation de $D_2$**

L'équation de la droite  $D_2$  que forme le capteur 4 avec la source S est donnée par l'équation :

$$y = a_{34}x + b_{34}.$$

Nous procédons de la même manière que pour déterminer l'équation de  $D_1$  sauf que l'angle que forme la droite  $D_2$  avec l'axe des abscisses est  $\alpha = \frac{\pi}{2} + \theta_{34}$ . **(Figure 3.8).**



**Figure 3.8-** Angle que fait  $D_2$  avec l'axe des abscisses

L'équation de  $D_2$  est donnée donc ainsi :

$$y = a_{34}x + b_{34} ; \text{ avec } \begin{cases} a_{34} = \tan \alpha \text{ avec } \alpha = \frac{\pi}{2} + \theta_{34} \\ b_{34} = y_4 - a_{34}x_4 \\ \theta_{34} = \cos^{-1} \frac{v \times \tau_{34}}{D_{34}} \end{cases} \quad (51)$$

### C. Détermination des coordonnées de la source sonore ( $x_s, y_s$ )

Ainsi, en reprenant les équations précédentes, nous obtenons :

$$\begin{cases} y_s = a_{12} \times \frac{y_s - b_{34}}{a_{34}} + b_{12} \\ x_s = \frac{y_s - b_{34}}{a_{34}} \end{cases}$$

Les coordonnées de la source sonore sont alors données par :

$$\begin{cases} y_s = a_{12} \times \frac{y_s - b_{34}}{a_{34}} + b_{12} \\ x_s = \frac{y_s - b_{34}}{a_{34}} \end{cases}$$

$$\text{avec } \begin{cases} a_{12} = \tan \theta_{12} \\ b_{12} = y_2 - a_{12}x_2 \\ \theta_{12} = \cos^{-1} \frac{v \times \tau_{12}}{D_{12}} \end{cases} \quad \text{et } \begin{cases} a_{34} = \tan \alpha \text{ avec } \alpha = \frac{\pi}{2} + \theta_{34} \\ b_{34} = y_4 - a_{34}x_4 \\ \theta_{34} = \cos^{-1} \frac{v \times \tau_{34}}{D_{34}} \end{cases}$$

### 3.3.3. Sous-système de localisation radio

Le second sous-système de localisation indoor que nous proposons (THALJAOUÏ, 2015) se base sur la technologie BLE (*Bluetooth Low Energy*). Notre choix a porté sur cette technologie, essentiellement pour les potentiels qu'elle offre faisant d'elle une des technologies les plus présentes dans les nouvelles gammes d'appareils téléphoniques. En effet, selon le rapport de recherche de l'ABI de l'année 2015 (ABI, 2015), vers l'année 2020, près de 19 milliards d'appareils seront équipés de cette technologie.

L'idée de notre second sous-système repose sur la localisation d'une personne munie d'un émetteur BLE par un réseau de trois récepteurs BLE. Notre travail consiste essentiellement à établir un modèle de propagation BLE en mettant en jeu uniquement les lectures RSSI en temps réel.

Partant du fait que les signaux radio sont des ondes électromagnétiques qui se propagent à travers un medium, plusieurs modèles ont été proposés afin de modéliser cette propagation. Dans nos travaux, nous optons pour le modèle de « Log-Distance path-loss » de (FRIIS, 1946) donné par l'équation suivante :

$$RSSI(d) = RSSI(d_0) - 10 \times n \times \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (52)$$

Où  $RSSI(d)$  est la puissance du signal reçu à la distance  $d$  (entre un émetteur et un récepteur),  $RSSI(d_0)$  est la puissance du signal reçu à une distance  $d_0$  (généralement  $d_0=1m$ ) et  $n$  est l'indice du milieu de propagation (path loss index). Cet indice caractérise l'affaiblissement que subit l'onde radio en parcourant une distance. Cet affaiblissement est essentiellement dû à la dispersion de la puissance, mais également aux obstacles rencontrés sur le parcours.

Ainsi pour  $d_0=1m$ , l'équation ci-dessus donne :

$$d = 10^{\frac{RSSI(d_0) - RSSI(d)}{10 \times n}} \quad (53)$$

Or, comme nous l'avons déjà détaillé dans 1.4.1, la puissance d'un signal reçu est souvent affectée par plusieurs phénomènes liés directement aux conditions environnementales: l'atténuation lors de la propagation causée par la présence d'obstacles, l'évanouissement (*fading*) et les zones d'ombre (*shadowing*) ce qui agit directement sur la valeur de l'indice  $n$ , ce qui affecte par conséquent le calcul de la distance (Eq. 47). Ainsi, la précision de localisation à base des lectures RSSI est d'autant plus fine que la modélisation du canal de propagation est précise. Nous avons alors ajouté à notre sous-système une première phase qui con-

siste à caractériser de façon dynamique l'environnement d'étude. Ainsi, le sous-système de localisation radio que nous proposons opère selon le schéma suivant :

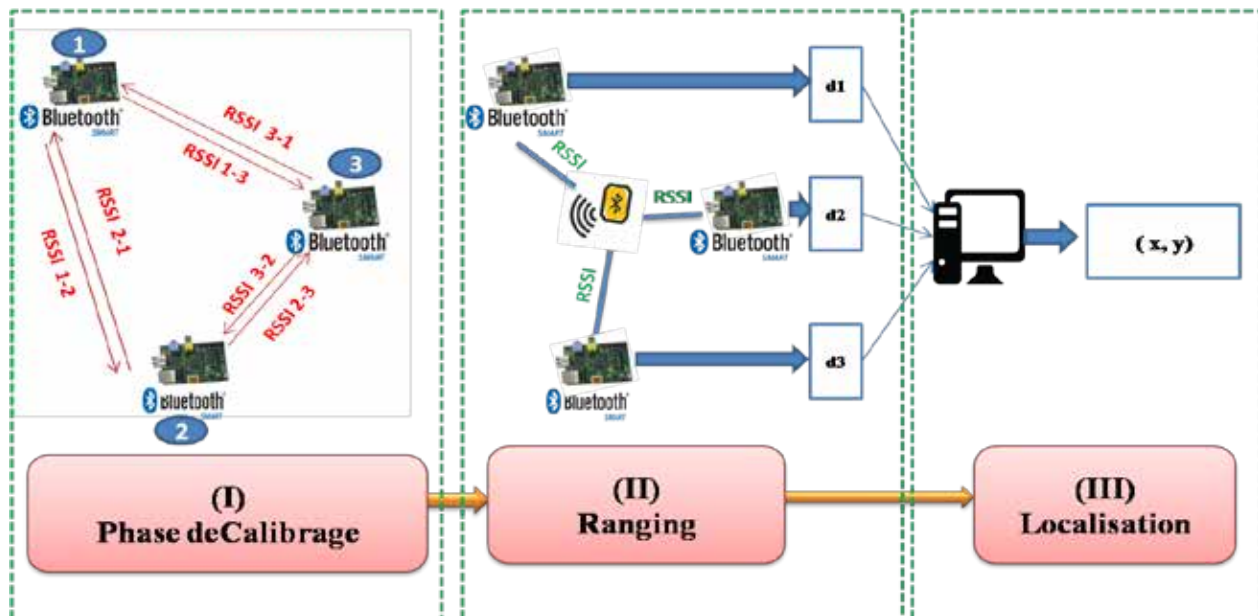


Figure 3.9- Schéma de localisation radio proposée

- ✓ Phase 1 : Calibrage des paramètres du sous-système de localisation ( $n$  et  $RSSI(d_0)$ )
- ✓ Phase 2 : Evaluation des distances entre l'émetteur et les trois récepteurs BLE à partir des valeurs des puissances du signal reçu (RSSI) associées au modèle de propagation du signal BLE établi en tenant compte des conditions de propagation locales enregistrées dans l'environnement.
- ✓ Phase 3 : Détermination de la position de la cible par la méthode de trilatération

### 3.3.3.1. Hypothèses

Afin de pouvoir appliquer le modèle de « Log-Distance Path-Loss », les propriétés du signal sont supposées être équivalentes quel que soit la direction et la qualité des antennes ainsi que la présence ou non d'obstacles au niveau de la zone de déploiement, ce qui n'est pas toujours valable dans le monde réel.

Afin de remédier à cette anisotropie du signal BLE, pour chaque calcul de distance, une distribution de valeurs RSSI est considérée. Le modèle FRIIS est alors appliqué à la moyenne de cette distribution après avoir appliqué l'opération de rejet des données aberrantes (paragraphe 3.3.1).

### 3.3.3.2. Phase Offline : Calibrage des paramètres radio

Durant cette première phase, notre objectif est de caractériser l'environnement de propagation de l'onde radio généralement affecté par les effets multi-trajets et d'atténuation. Nous mettrons en évidence les conditions de propagation BLE dans le milieu d'étude, souvent dues aux instabilités des valeurs de l'humidité et de la température, les variations au niveau de l'emplacement des meubles et le mouvement des personnes.

Une investigation a été menée sur les travaux ayant déjà traité un tel problème. A l'université CORUNA par exemple, une série d'expérimentations réalisées par une équipe de chercheurs (FERNANDEZ et al., 2007) ont permis de caractériser les fluctuations dynamiques des valeurs RSSI Bluetooth en liaison étroite avec les variations des conditions de l'environnement. En effet, des valeurs RSSI ont été enregistrées durant une période de 24 heures dans des conditions d'activité normale (présence et déplacements des étudiants, ..). Les résultats obtenus montrent que pendant la période où l'environnement est stable (pas de variation de meubles ou d'emplacement des équipements émetteurs et récepteurs RSSI) et dans des conditions réelles (jour/nuit, entrée/sortie de personnes, ..), les moyennes des valeurs mesurées du RSSI pour chaque heure de la journée varient considérablement. Afin de pallier ces variations dynamiques de l'environnement, les auteurs de (FERNANDEZ et al., 2007) proposent d'ajouter une première étape dite 'phase de calibrage en temps réel'.



**Figure 3.10-** Principe de calibrage dynamique, figure inspirée des travaux de (FERNANDEZ et al., 2007)

Ainsi, cette opération permet d'établir un modèle de propagation du signal Bluetooth « en temps réel » en fonction des facteurs ambiants et ce en se basant sur les lectures des RSSI entre les ancres. Ce modèle donne la relation entre les RSSI et la distance via une fonction de 'mappage'



ou ‘translation’. En effet, considérant les positions de trois ancrs, les auteurs de (FERNANDEZ et al., 2007) commencent par définir les matrices 3×3 suivantes :

- ü **D** : matrice des distances réelles entre les trois ancrs. L’élément  $d_{ij}$  est la distance entre le  $i^{\text{ème}}$  ancre et le  $j^{\text{ème}}$  ancre.
- ü **S** : matrice des RSSI entre les trois ancrs. L’élément  $s_{ij}$  est la valeur RSSI reçue par le  $i^{\text{ème}}$  ancre à partir du  $j^{\text{ème}}$  ancre.
- ü **T** : matrice de translation **RSSI** vers **distances**. Les éléments  $t_{ij}$  est le coefficient de translation entre les beacons  $i$  et  $j$ .
- ü **E** : la matrice des erreurs. L’élément  $e_{ij}$  est la différence entre la distance réelle entre le  $i^{\text{ème}}$  ancre et le  $j^{\text{ème}}$  ancre et la distance estimée en utilisant l’équation de mappage.

Comme nous l’avons déjà détaillé, le modèle établi par (FERNANDEZ et al., 2007) tend à minimiser l’erreur entre la distance réelle et celle calculée par une fonction de « mappage » (entre chaque couple d’ancres) :

$$e_{ij} = (d_{ij} - t_{ij}s_{ij})^2 \quad (54)$$

En effet, en considérant la notation matricielle, l’expression de l’erreur peut être exprimée :

$$E = |D - TS|^2 \quad (55)$$

Pour une erreur nulle, la fonction de mappage est donnée par la fonction suivante :

$$T = DS^{-1} \quad (56)$$

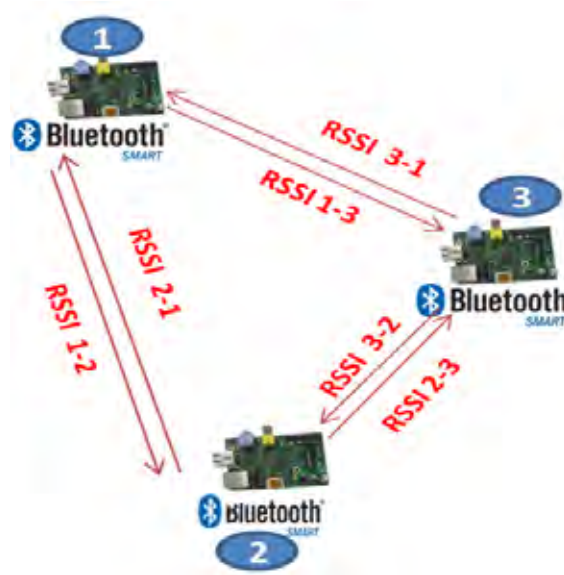
Ainsi, pour un instant  $n$ , la distance entre l’équipement Bluetooth à localiser et les 3 ancrs est donnée par :

$$d_n = T \times s_n \quad (57)$$

où  $d_n$  dénote le vecteur des distances estimées à un instant  $n$  et  $s_n$  est le vecteur des RSSI reçues à un instant  $n$  par l’équipement Bluetooth à partir des trois ancrs.

Analogiquement, le but de la phase offline que nous proposons dans le cadre de la mise en place de notre second sous-système de location indoor, est d’effectuer un calibrage périodique des paramètres dynamiques du modèle radio, à savoir l’indice  $n$  et le RSSI(do) afin de mettre en évidence les conditions environnementales au moment même de la prise des mesures RSSI.

L'idée de ce calibrage périodique est d'exploiter les données dont nous disposons sur les distances entre les trois beacons BLE lors de l'établissement du modèle BLE que nous appliquerons pour le calcul des distances entre l'émetteur BLE et chacun des trois beacons BLE.



**Figure 3.11-** Localisation BLE : Phase de calibrage dynamique

Ainsi, de façon périodique, à des instants précis dans la journée, le modèle de propagation BLE (Eq.46) est appliqué au niveau de chacun des trois ancres de la figure ci-dessus:

$$RSSI(d_j^i) = RSSI(d_0) - 10 \times n_i \times \log\left(\frac{d_j^i}{d_0}\right) \quad (58)$$

Deux inconnues sont à déterminer pour ce modèle :  $RSSI(d_0 = 1m)$  et l'indice  $n$ .

- ü  **$RSSI(d_0)$**  : Cette valeur sera calculée en offline et ce en réalisant la moyenne des mesures  $RSSI(d_0, t)$  pour une journée entière (24 mesures en 24 heures).
- ü **L'indice  $n$**  : À un instant  $t$ , choisi de façon périodique durant la journée selon le taux d'activité dans le milieu d'étude, nous calculons l'indice  $n_i$ :

$$n_i = \frac{RSSI(d_0) - RSSI(d_j^i)}{10 \times \log\left(\frac{d_j^i}{d_0}\right)} \quad (59)$$

Avec  $d_j^i$  : distance déjà connue entre les deux ancres  $i$  et  $j$  ( $i, j : 1..3$ )

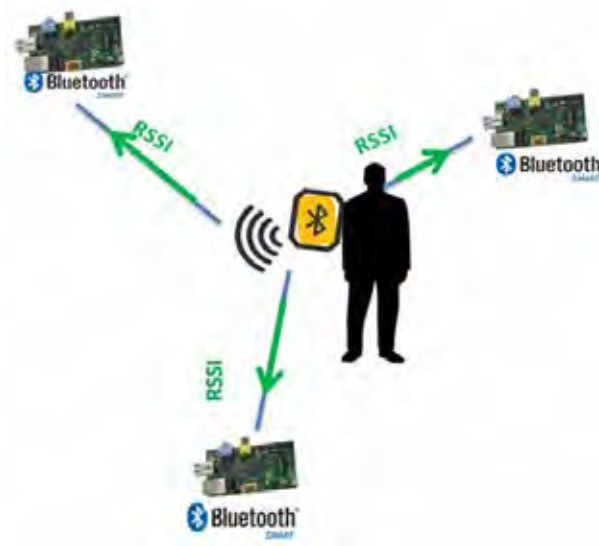
$n_i$  : indice  $n$  calculé au niveau de l'ancre  $n^oi$  ( $i : 1..3$ )

Nous obtenons alors pour cette période  $T$ , l'indice suivant:

$$n_T = \frac{\sum_{i=1}^3 n_i}{3} \quad (60)$$

### 3.3.3.3. 1ème phase : Ranging

Durant cette phase, nous exploitons notre connaissance sur l'indice d'environnement déjà calculé pour la période en cours ( $n_T$ ) afin d'estimer les distances entre chaque ancre BLE et l'émetteur BLE fixé sur la cible à localiser (**Figure 3.12**) en mettant en œuvre l'équation (47) pour chaque ancre.



**Figure 3.12-** Localisation BLE : Phase de Ranging

Comme nous l'avons supposé dans le paragraphe 3.3.3.1, afin de pouvoir appliquer le modèle de FRIIS pour le calcul de la distance tout en remédiant au caractère dynamique des lectures *RSSI* à cause des fluctuations inhérentes au canal radio, nous considérons une distribution des valeurs de *RSSI* enregistrées en temps réel tout en lui appliquant la méthode de rejet des données aberrantes de Thompson  $\tau$  (paragraphe 3.3.1).

Nous mettons en œuvre donc l'équation (47) afin d'obtenir pour chaque ancre, une distance  $d_j$  :

$$d_j = 10^{\frac{RSSI(d_0) - RSSI(d_j)}{10 \times n_T}} \quad (61)$$

où  $j$  dénote le numéro de l'ancre BLE ( $j = 1, 2, 3$ ).

### 3.3.3.4. 2ème phase : Positioning

Une fois les distances entre l'émetteur BLE et chacun des trois ancres BLE sont estimées, il ne nous reste qu'à déterminer la position de la cible. Notre approche consiste à calculer  $N$  fois ces coordonnées  $(x, y)$  ;  $N$  est un entier à choisir de manière à assurer la répétitivité des résultats obtenus ainsi que leur reproductibilité. Le résultat final sera le centroïde des points obtenus.

A l'instar du système GPS, notre sous-système de localisation BLE fait appel à la technique de trilatération en 2D afin de calculer les coordonnées de la cible.

Ainsi, en nous basant sur le calcul détaillé dans 1.5.2, nous considérons:

- $X(x_{BLE}, y_{BLE})$  la cible à localiser.
- $A_1(x_1, y_1)$ ,  $A_2(x_2, y_2)$  et  $A_3(x_3, y_3)$  les trois ancres BLE.
- $d_1$ ,  $d_2$  et  $d_3$  les distances séparant la cible respectivement à  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$ .

La position de la cible peut alors être déterminée suite à la résolution du système d'équations suivant:

$$\begin{cases} d_1^2 = (x_1 - x_{BLE})^2 + (y_1 - y_{BLE})^2 \\ d_2^2 = (x_2 - x_{BLE})^2 + (y_2 - y_{BLE})^2 \\ d_3^2 = (x_3 - x_{BLE})^2 + (y_3 - y_{BLE})^2 \end{cases} \quad (62)$$

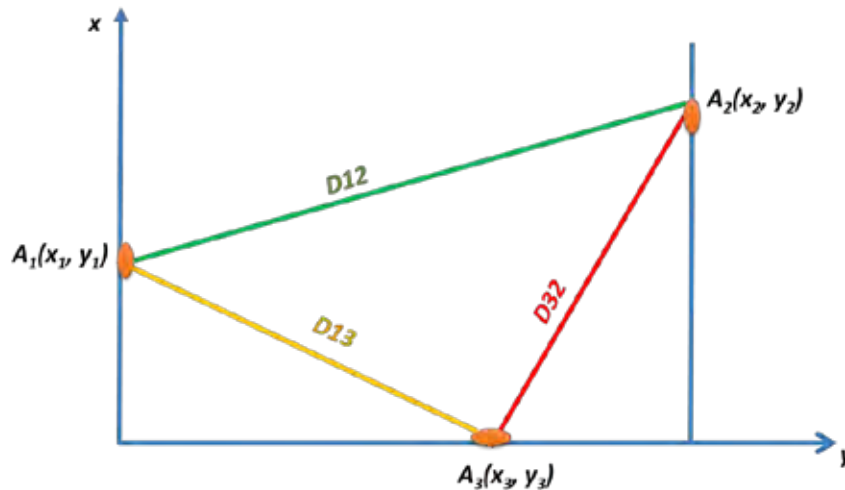


Figure 3.13- Résolution du problème de trilatération

Une des méthodes de résolution d'un tel système est de le ramener en un système linéaire  $Ax = b$  dont la solution est obtenue par inversion de la matrice  $A$ . Nous aurons ainsi :

$$\begin{pmatrix} x_{BLE} \\ y_{BLE} \end{pmatrix} = A^{-1}b \quad (63)$$

$$\text{avec } A = \begin{pmatrix} (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) \\ (x_3 - x_2) & (y_3 - y_2) \end{pmatrix} \text{ et } b = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} d_1^2 - d_3^2 + D_{13}^2 \\ d_2^2 - d_3^2 + D_{23}^2 \end{pmatrix}$$

où  $D_{13}$  (respectivement  $D_{23}$ ) est la distance entre  $A_1$  et  $A_3$  (respectivement  $A_2$  et  $A_3$ ) comme le montre la Figure 3.13.

### 3.3.4. Sous-système de localisation lumière

Le troisième sous-système que nous proposons met en œuvre une technologie nouvelle qui n'a pas été encore assez exploitée. Il s'agit du LiFi (en anglais *Light Fidelity*) qui est un protocole de transmission de données via la lumière.

Ce protocole se base sur les potentiels offerts par les lampes LED qui, outre leur longue durée de vie ainsi que leur faible consommation en énergie, possèdent une capacité de clignoter (changer d'états ON/OFF) assez rapidement sans s'abîmer ni être détectées par l'œil humain.

Ainsi, comme nous l'avons déjà expliqué dans 1.6.5, le LiFi opère par modulation des données coté émetteur (LEDs), afin de pouvoir les transmettre sous une forme binaire (des bits 0 et 1) en se basant sur le principe OOK (On-Off keying). Interceptés par des récepteurs optiques dédiés, ces messages binaires sont transformés sous forme de signaux électriques, puis démodulés et décodés afin de reconstituer les données originalement transmises.

De plus, la lumière étant directive, la zone de propagation de la lumière est souvent représentée par un cône ce qui assure une bonne précision de la position de la zone de transmission des données.

#### 3.3.4.1. Composantes du sous-système

Notre idée est d'exploiter les potentiels offerts par le LiFi en mettant en œuvre un système de localisation construit autour des composantes suivantes :

- ✓ Emetteurs LiFi : des lampes LED, caractérisées par leurs angles du faisceau  $\theta$ , leurs puissances d'émission  $P_e$ , leurs temps de chauffe  $T$  (au bout desquels un signal stable peut être généré), leur hauteur  $H$  ainsi que leur portée  $P$  en ligne de vue directe (Figure 3.15),
- ✓ Un module de cryptage et de modulation du signal à émettre,
- ✓ Signal émis : dans notre cas, il s'agit de l'identifiant  $ID_i$  de la lampe LED  $i$ ,
- ✓ Un récepteur optique : un Smartphone muni d'une photodiode dédiée,
- ✓ Un module de Traitement et reconstitution du signal reçu.

### 3.3.4.2. Principe de localisation LiFi

Le principe du sous-système de localisation LiFi que nous proposons repose sur l'estimation des coordonnées 2D d'une cible munie d'un récepteur optique pointé sur des lampes LED dont les identifiants sont déjà connus. Il s'agit donc d'exploiter le pouvoir des lampes LED de transmettre les données via le protocole LiFi afin de communiquer leur ID au mobile équipé d'une photodiode dédiée selon le schéma de localisation suivant :

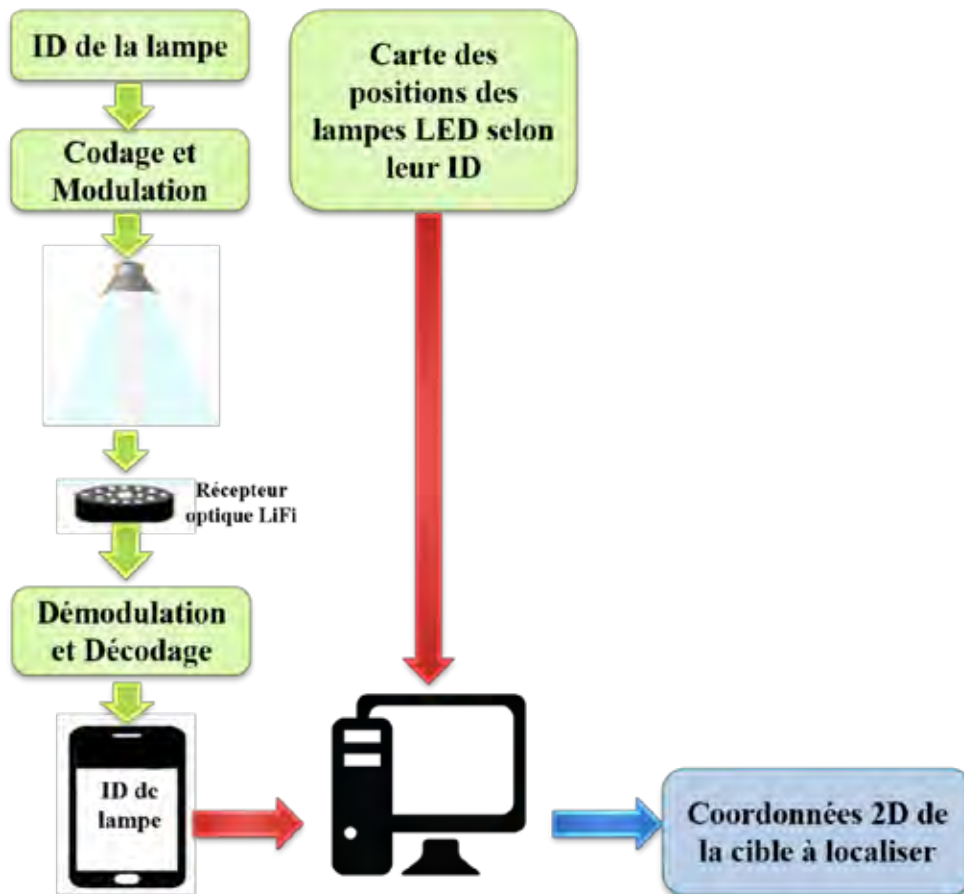


Figure 3.14- Schéma proposé pour la localisation LiFi

- ✓ Le signal à émettre par chaque lampe est leur identifiant respectif. Ce dernier est de taille 2 octets et correspond aux adresses MAC des lampes LED données en hexadécimal.
- ✓ **Codage et Modulation du signal émis** : Dans le cadre de notre travail, nous avons opté pour le codage des données à transmettre par le codage biphasé, plus connu sous le nom de codage de Manchester, largement utilisé dans les liaisons radio à courte distance pour sa non-complexité de mise en œuvre.

Il s'agit de réaliser une opération logique OU exclusif (XOR) entre l'horloge et les données binaires à transmettre en provoquant une transition du signal pour chaque bit transmis (MICHOT, 2004):

- Un bit de donnée à 0 sera codé en un front montant en  $\frac{T}{2}$
- Un bit de donnée à 1 sera codé en un front descendant en  $\frac{T}{2}$

Où T est la période de l'horloge servant à cadencer l'émission des bits.

Une fois codé, l'amplitude du signal est soumise à une étape de modulation de type tout ou rien OOK (On-Off keying) par un signal binaire unipolaire (0, 1).

- ✓ Emission du signal codé et modulé par les lampes LED
- ✓ Démodulation et Décodage du signal reçu par le décodage Manchester
- ✓ Estimation des coordonnées de la cible : Cette opération sera détaillée dans la section suivante.

### 3.3.4.3. Estimation des coordonnées de la cible

La détermination des coordonnées de la cible par le protocole LiFi devient possible une fois la lampe transmettant le signal identifiée.

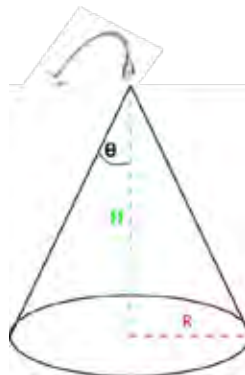


Figure 3.15- Lampe LiFi

La Figure 3.15 représente le faisceau lumineux de forme conique d'une lampe LED correspondant à la zone de couverture de la lampe, caractérisée par un angle  $\theta$ , un rayon  $R$  et une hauteur  $H$ .

Ainsi, un mobile, muni d'un récepteur optique dédié et se trouvant à l'intérieur de cette zone de couverture, récupère l'identifiant de la lampe et le transmet au système qui retournera sa position. En ne considérant qu'une seule lampe, les coordonnées du mobile seraient intuitivement celles du centre de son faisceau lumineux qui n'est autre que le centre du cercle de rayon  $R$  (en dimensions 2D). Cette hypothèse rend le résultat imprécis.

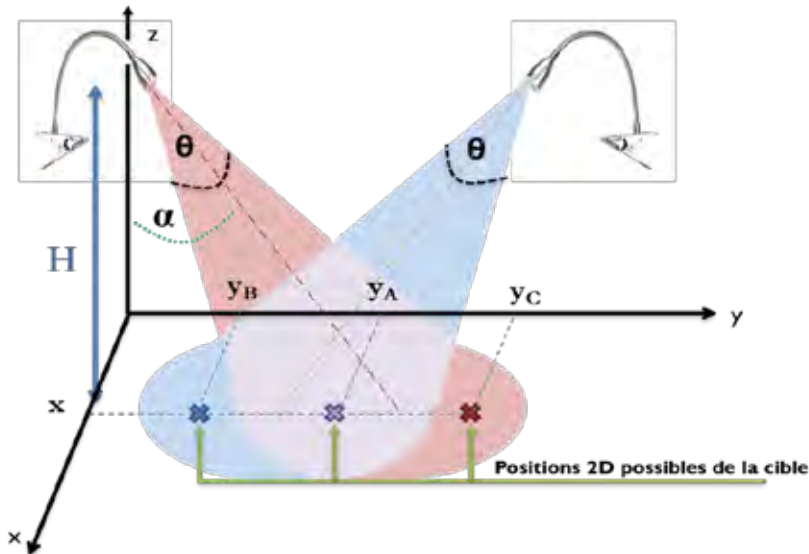
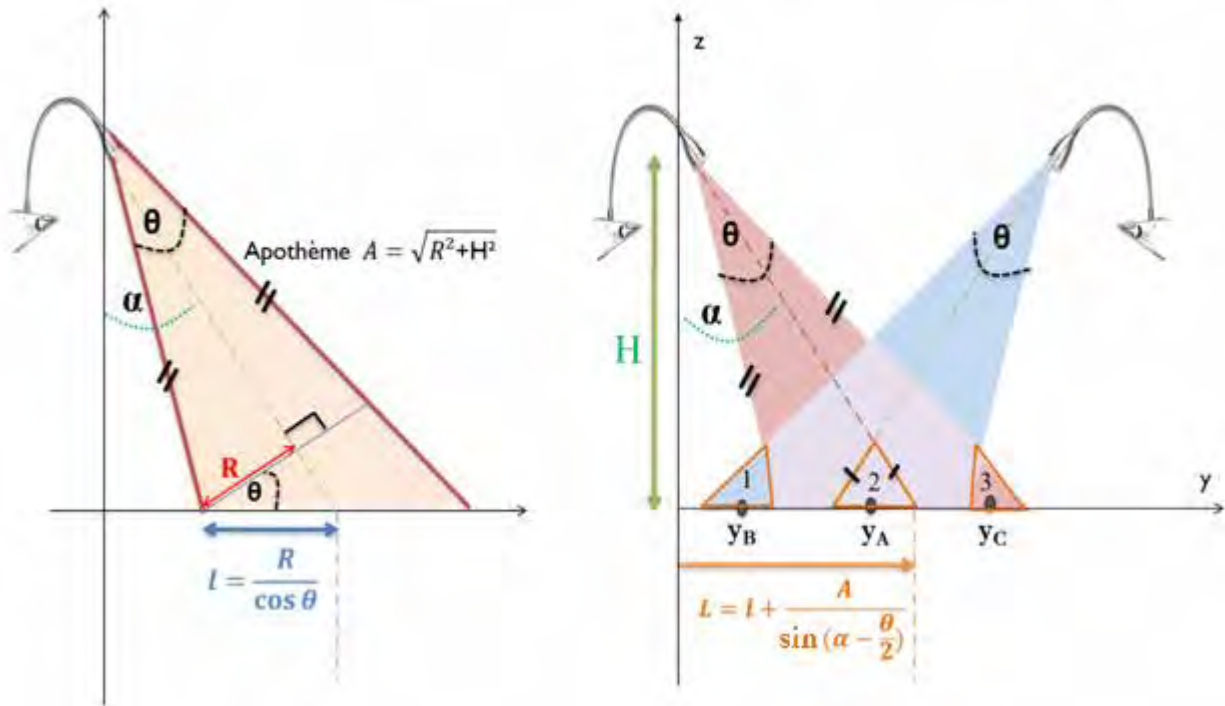


Figure 3.16- Intersection de deux faisceaux lumineux

Notre idée est de considérer le croisement des faisceaux de deux lampes  $LED_1(x_1, y_1)$  et  $LED_2(x_2, y_2)$  plutôt qu'une seule (Figure 3.16). Ces deux lampes sont inclinées d'un angle absolu  $\alpha$  et leurs coordonnées sont déjà connues.





**Figure 3.17-** Caractéristiques du faisceau lumineux d'une lampe LED

Selon l'approche que nous proposons, nous obtenons, pour chaque paire de lampes (en cas de détection), trois positions possibles de la cible:

✓ La cible détecte les deux lampes  $LED_1(x_1, y_1)$  et  $LED_2(x_2, y_2)$ : les coordonnées  $(x, y_A)$  de la cible sont telles que :

$$\begin{aligned} \ddot{U} \quad & x = x_1 = x_2 \\ \ddot{U} \quad & y_A = L - \frac{2L - (y_2 - y_1)}{2} \end{aligned}$$

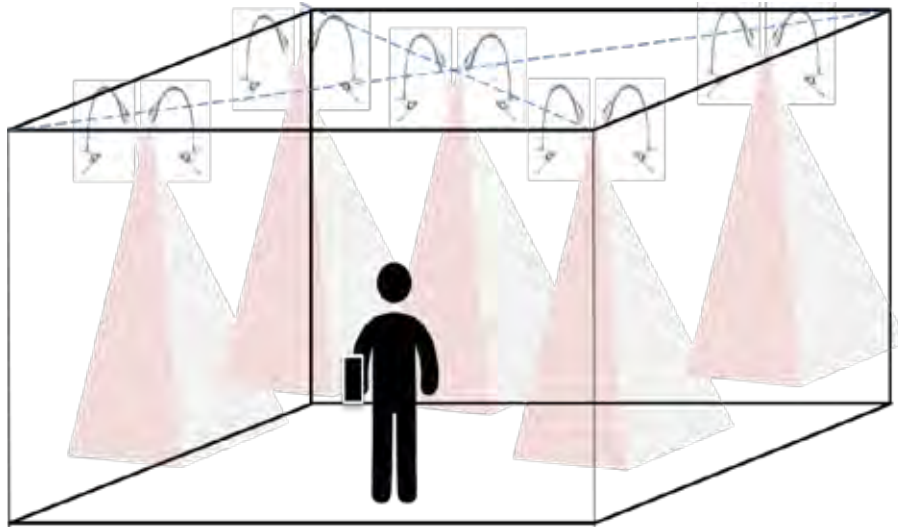
✓ La cible ne détecte que la lampe  $LED_1(x_1, y_1)$  : les coordonnées  $(x, y_C)$  de la cible sont telles que :

$$\begin{aligned} \ddot{U} \quad & x = x_1 = x_2 \\ \ddot{U} \quad & y_C = (y_2 - y_1) - \frac{A}{2 \times \sin(\alpha - \frac{\theta}{2})} \end{aligned}$$

✓ La cible ne détecte que la lampe  $LED_2(x_2, y_2)$  : les coordonnées  $(x, y_B)$  de la cible sont telles que :

$$\begin{aligned} \ddot{U} \quad & x = x_1 = x_2 \\ \ddot{U} \quad & y_B = \frac{A}{2 \times \sin(\alpha - \frac{\theta}{2})} \end{aligned}$$

Ainsi, pour une meilleure localisation, nous considérons un réseau de paires de lampes LED déployées sur tout l'environnement comme le montre la figure suivante :



**Figure 3.18-** Localisation d'une cible par un réseau de lampes LED

### **3.4. Approche d'hybridation proposée**

Comme nous l'avons expliqué dans les sections précédentes, chacune des techniques et technologies que nous utilisons dans notre système de localisation présente ses avantages et inconvénients. Dans l'approche d'hybridation que nous proposons, notre but est de tirer profit des points forts de chaque technique et technologie mise en œuvre et d'en éviter les faiblesses afin d'obtenir des résultats précis et exacts.

En effet, bien que les ondes radio soient actuellement les plus exploitées pour la définition de nouvelles applications de localisation indoor, leur **fiabilité** reste parmi les points à discuter surtout à cause de leur dépendance aux variations du milieu de déploiement. Il s'avère donc indispensable de combiner les résultats découlant de la localisation radio avec ceux d'autres systèmes afin d'assurer un certain niveau de **précision**.

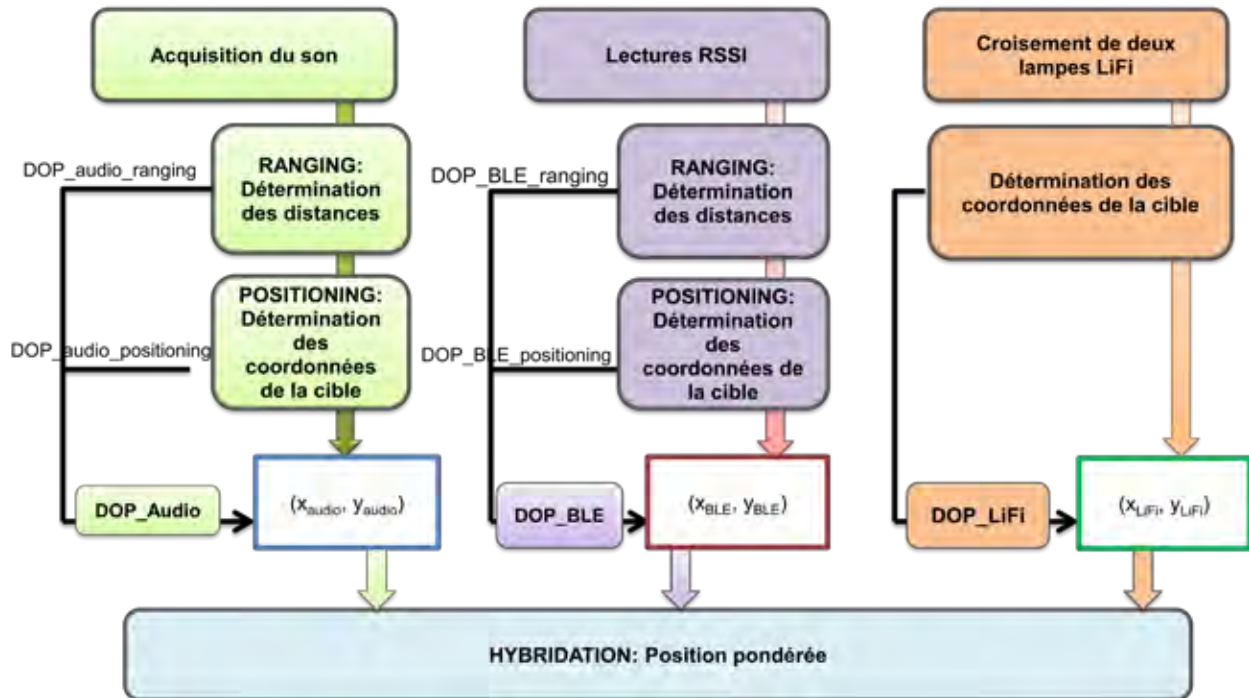


Figure 3.19- Approche d'hybridation proposée

Dans notre cas, nous proposons une nouvelle approche de combinaisons des résultats obtenus par chaque sous-système en introduisant des métriques de précision et d'exactitude «DOP\_Like» ( $DOP_{Audio}$ ,  $DOP_{BLE}$  et  $DOP_{LiFi}$ ), établis au moment de localisation e afin d'obtenir des positions à la fois précises et exactes :

$$\begin{cases} X_{Cible} = \frac{DOP_{BLE} \times X_{BLE} + DOP_{Audio} \times X_{Son} + DOP_{LiFi} \times X_{LiFi}}{DOP_{BLE} + DOP_{Audio} + DOP_{LiFi}} \\ Y_{Cible} = \frac{DOP_{BLE} \times Y_{BLE} + DOP_{Audio} \times Y_{Son} + DOP_{LiFi} \times Y_{LiFi}}{DOP_{BLE} + DOP_{Audio} + DOP_{LiFi}} \end{cases} \quad (64)$$

Nous détaillons dans les paragraphes ci-dessous le processus de mise en place de chacune de ces métriques.

### 3.4.1. DOP Audio

Le principe de localisation audio que nous proposons repose sur la détection d'une onde sonore par un réseau de deux paires de microphones.

Le son détecté sera dans un premier temps enregistré puis traité. La comparaison des signaux sonores reçus par chacun des microphones de chaque paire par l'estimation de la

différence de leurs temps d'arrivée TDOA nous permettra d'estimer l'angle  $\theta$  que fait l'onde sonore à chacun des deux paires, afin de calculer l'emplacement de la source de l'onde sonore en faisant l'intersection des deux droites que fait l'onde avec chacun des deux paires de microphones.

Afin d'estimer la précision du sous-système de localisation audio, nous exploiterons la notion de reproductivité des estimations pour la même position. Ainsi, au moment de la localisation, pendant la phase de ranging, le système effectue  $N$  captures sonores puis élimine les données aberrantes qui pourraient dévier notre jugement sur la précision du sous-système. Cette opération sera répétée pendant la seconde phase de positioning.

Le  $DOP_{audio}$  est donc le résultat des deux  $DOP_{audio-RANGING}$  et  $DOP_{audio-POSITIONING}$  :

$$DOP_{audio} = \frac{DOP_{audio-RANGING} + DOP_{audio-POSITIONING}}{2} \quad (65)$$

#### 3.4.1.1. DOP\_audio-RANGING

Il s'agit dans la première phase de localisation audio d'estimer la direction d'arrivée (angle  $\theta$ ) du signal audio sur chaque paire de microphones : estimation du retard  $\tau$  puis calcul de l'angle :

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\tau \times v}{D}\right)$$

Une fois les coordonnées des quatre microphones connues, la position de la source sonore sera obtenue en fonction de ces angles par triangulation. Toute erreur sur l'estimation des angles influe donc sur la précision de tout le sous-système. Dans notre cas d'étude, notre objectif est d'avoir une métrique qui décrit le taux de confiance que nous pouvons attribuer aux résultats retournés par notre sous-système audio avant de les combiner avec les résultats des deux autres sous-systèmes.

Rappelons que par sa définition, l'écart type donne une idée sur le caractère homogène ou hétérogène d'un ensemble de mesures. En effet, si l'écart-type est faible, les valeurs sont peu dispersées autour de la moyenne (série homogène) et inversement (série hétérogène). Il s'agit donc de l'écart des mesures obtenues par rapport à la moyenne des valeurs. Notre idée est de commencer par déterminer la valeur maximale que peut atteindre l'écart type des estimations de chaque angle.

Prenons alors le cas extrême où notre but est de déterminer un angle  $\theta$  qui correspond réellement à l'angle  $\pi$ , les angles retournés par le système forment une distribution contenant des valeurs extrêmes qui pourraient contenir des 0 et des  $\pi$ . La moyenne est donc au maximum égale à la moitié de ces limites extrêmes.

Ainsi, dans un cas extrême, soit  $\theta = 0$  ou  $\theta = \pi$ , l'écart type  $STD$  est égal à la moyenne relative à la distribution :  $STD(\theta) = \frac{\pi}{2}$ .

Nous proposons alors un  $DOP_{audio-RANGING}$  exprimé en fonction des écart-types de chacun des deux ensembles des estimations de chaque angle ( $\theta_i ; i \in \{1, 2\}$ ):

$$DOP_{audio-RANGING} = \frac{DOP_{audio-RANGING}(\theta_1) + DOP_{audio-RANGING}(\theta_2)}{2} \quad (66)$$

Où :

$$DOP_{audio-RANGING}(\theta_i) = 1 - \frac{2 \times STD(\theta_i)}{\pi} \quad ; i \in \{1, 2\} \quad (67)$$

#### 3.4.1.1. DOP\_audio POSITIONING

Il s'agit dans cette phase de considérer le DOP de la technique de triangulation que nous exploitons dans notre sous système audio pour le calcul de la position de la source sonore.

Considérons le premier angle  $\theta_{12}$  formé par la droite des abscisses et l'onde sonore donné par la **Figure 3.20**:

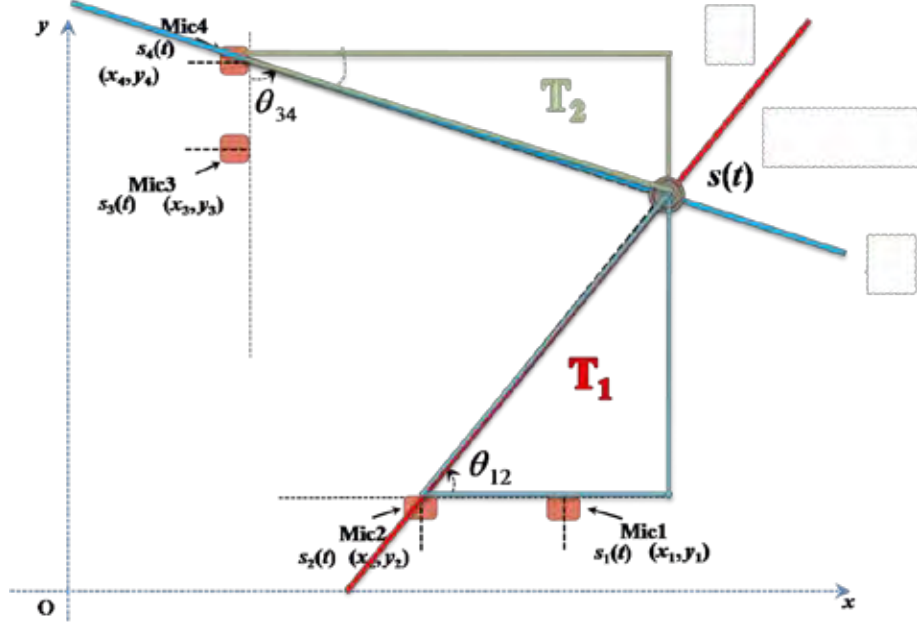


Figure 3.20- Localisation audio par triangulation

En notant  $T_1$ , le triangle formé par l'angle  $\theta_{12}$  et la source sonore, nous obtenons:

$$\tan(\theta_{12}) = \frac{y_s - y_1}{x_s - x_1} \quad (68)$$

De même, en notant  $T_2$ , le triangle formé par l'angle  $(\frac{\pi}{2} - \theta_{34})$  et la source sonore, nous obtenons:

$$\tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{34}\right) = \frac{y_s - y_4}{x_s - x_4} \quad (69)$$

Ainsi, en notant :  $\theta_1 = \theta_{12}$  et  $\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta_{34}$ , nous aurons le système suivant :

$$\begin{cases} \tan(\theta_1) = \frac{y_s - y_1}{x_s - x_1} \\ \tan(\theta_2) = \frac{y_s - y_4}{x_s - x_4} \end{cases} \quad (70)$$

La résolution de ce système donne :

$$\begin{pmatrix} x_s \\ y_s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \tan(\theta_1) & -1 \\ \tan(\theta_2) & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \times \tan(\theta_1) & -y_1 \\ x_4 \times \tan(\theta_2) & -y_4 \end{bmatrix} \quad (71)$$

Pour ce type de système, le facteur de précision  $GPS_{DOP_{Like}}$  est donné par la formule suivante :

$$\sigma_P = DOP \times \sigma_\theta \quad (72)$$

où  $\sigma_P$  dénote l'écart-type des positions calculées et  $\sigma_\theta$  l'écart-type des mesures d'angles.

Nous obtenons alors :

$$\begin{pmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(y_s - y_1)}{R^2} & \frac{-(x_s - x_1)}{R^2} \\ \frac{-(y_s - y_2)}{R^2} & \frac{-(x_s - x_2)}{R^2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} dx_s \\ dy_s \end{pmatrix} \quad (73)$$

$$\begin{pmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} dx_s \\ dy_s \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} dx_s \\ dy_s \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{pmatrix} \quad (74)$$

Or le « DOP », comme utilisé dans le système GPS, est inversement proportionnel au « facteur de confiance » ou « indicateur de précision » que nous proposons. D'où, nous pouvons établir la formule suivante pour l'indicateur de précision de la phase positioning de la technique AUDIO comme suit:

$$DOP_{Audio-POSITIONING} = \frac{1}{GPS_{DOP_{Like}}} = \frac{1}{\sqrt{trace(H)}} \quad (75)$$

### 3.4.1. DOP BLE

Comme expliqué dans la section 1.4.1, RSSI n'est pas une mesure fiable ; elle est très sensible aux changements dynamiques du milieu de déploiement ce qui la rend contaminée par la présence d'erreurs. Lors de la localisation, ce n'est plus une seule lecture RSSI qui sera considérée, mais plutôt une série de lectures RSSI répétées durant une période d'acquisition assez longue de façon à caractériser les variations d'environnement. Cette étape sera couplée à une opération de rejet de lectures RSSI aberrantes afin de ne considérer que les valeurs RSSI significatives.

L'établissement du métrique DOP\_BLE s'effectue en parallèle aux phases de localisation BLE. En effet, comme nous l'avons détaillé au début de ce chapitre, le processus de localisation BLE est assuré par trois phases dont une est pour le calibrage des paramètres à utiliser durant les deux autres phases. Ainsi, DOP\_BLE est constitué de deux composantes, l'une cal-

culée lors de la phase d'estimation des distances ( $DOP_{BLE-RANGING}$ ) et l'autre lors de la phase de calcul des coordonnées de la cible ( $DOP_{BLE-POSITIONING}$ ) :

$$DOP_{BLE} = \frac{DOP_{BLE-RANGING} + DOP_{BLE-POSITIONING}}{2} \quad (76)$$

#### 3.4.1.1. DOP\_BLE-RANGING

Durant la phase de RANGING, seules les valeurs RSSI collectées en temps réel seront prises en compte pour l'estimation de la distance séparant chaque récepteur BLE à la cible. Or plus cette cible ne s'éloigne des récepteurs, plus le taux d'erreurs des mesures RSSI augmente. Ce qui laisse envisager que la probabilité que la distance, estimée à partir de telles mesures, soit précise, est petite.

Le métrique  $DOP_{BLE-RANGING}$  que nous proposons est un score qui évalue pour un instant  $t$  le taux de confiance que nous accordons aux mesures RSSI collectées :

$$DOP_{BLE-RANGING} = \sum_{i=1}^3 e^{-\left| \frac{RSSI_i}{RSSI_{min}} \right|} \quad (77)$$

Où  $RSSI_{min}$  dénote la valeur minimale que les mesures RSSI peuvent atteindre et  $i$  le numéro du récepteur BLE ( $i \in \{1, 2, 3\}$ ).

Ainsi, plus  $\left| \frac{RSSI_i}{RSSI_{min}} \right|$  est proche de zéro, plus la précision est « bonne » et inversement plus  $\left| \frac{RSSI_i}{RSSI_{min}} \right|$  est proche de 1, plus la précision est « mauvaise ».

#### 3.4.1.1. DOP\_BLE-POSITIONING

Lors de la phase de positioning, nous avons opté pour la méthode de trilatération afin de déterminer les coordonnées de la cible.

Notre approche consiste à calculer  $N$  fois ces coordonnées  $(x, y)$  ;  $N$  est un entier à choisir de manière à assurer la répétitivité des résultats obtenus ainsi que leur reproductibilité. Le résultat final sera le centroïde des points obtenus.

Considérons les vecteurs 2D suivants :

$$\left( \frac{x_i - x}{R_i}, \frac{y_i - y}{R_i} \right) \quad (78)$$



Où

$(x, y)$  : la position estimée de la cible

$(x_i, y_i)$  : la position connue de l'ancre BLE  $i$  ( $i \in \{1, 2, 3\}$ )

$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$  : la distance entre l'ancre  $i$  et la cible ( $i \in \{1, 2, 3\}$ ),

Dans notre cas :  $R_i = d_i = 10^{\frac{RSSI(d_0) - RSSI(d_i)}{10 \times n}}$  ; ( $i \in \{1, 2, 3\}$ )

En utilisant le principe trilatération (paragraphe 3.3.3.4), nous obtenons :

$$\begin{cases} d_1^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \\ d_2^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 \\ d_3^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 \end{cases} \quad (79)$$

Par analogie au calcul du DOP GPS détaillé dans 3.3.3, nous considérons la matrice A suivante :

$$A = \begin{pmatrix} \frac{x_1 - x}{R_1} & \frac{y_1 - y}{R_1} & 1 \\ \frac{x_2 - x}{R_2} & \frac{y_2 - y}{R_2} & 1 \\ \frac{x_3 - x}{R_3} & \frac{y_3 - y}{R_3} & 1 \end{pmatrix} \quad (80)$$

Soit  $A^T$  sa matrice inverse donnée par :

$$A^T = \begin{pmatrix} \frac{x_1 - x}{R_1} & \frac{x_2 - x}{R_2} & \frac{x_3 - x}{R_3} \\ \frac{y_1 - y}{R_1} & \frac{y_2 - y}{R_2} & \frac{y_3 - y}{R_3} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (81)$$

Nous calculons la matrice de covariance  $Q$  donnée par  $Q = (A \times A^T)^{-1}$  qui sert à calculer un DOP analogue à celui du GPS :

$$GPS_{DOP_{Like}} = \sqrt{\text{trace}(Q)} \quad (82)$$

Or, comme nous l'avons déjà présenté dans le premier chapitre, plus les valeurs du  $GPS_{DOP}$  sont grandes, plus le système est imprécis. D'autant plus,  $GPS_{DOP}$  varie entre 1 et  $+\infty$ , alors que notre objectif est de proposer une métrique de pondération qui varie dans l'intervalle

[0, 1]. Intuitivement, le DOP que nous proposons doit être inversement proportionnel au  $GPS_{DOP}$  :

$$DOP_{BLE-POSITIONING} = \frac{1}{GPS_{DOP_{Like}}} = \frac{1}{\sqrt{trace(Q)}} \quad (83)$$

### 3.4.1. DOP LiFi

Comme nous l'avons détaillé dans 3.3.4.2, le principe de localisation d'un mobile, muni d'un récepteur optique dédié par le protocole LiFi sur la récupération de l'identifiant d'au moins une lampe LiFi.

L'indicateur de précision  $DOP_{LiFi}$  que nous proposons pour le sous-système de localisation LiFi varie entre 0 et 1. Il peut prendre trois valeurs possibles selon la détection du mobile d'une ou deux lampes :

- Aucune lampe n'est identifiée, le sous système LiFi n'est pas en mesure de localiser la cible :  $DOP_{LiFi} = 0$
- Une seule lampe est identifiée, le sous système LiFi dispose de l'identifiant de cette lampe et peut par conséquent localiser la cible :  $DOP_{LiFi} = 1$
- Deux lampes sont identifiées :  $DOP_{LiFi} = 1$

## 3.5. Conclusion

Nous avons présenté dans le présent chapitre les différents modules du système de localisation hybride que nous proposons. Plus particulièrement, nous avons détaillé notre approche d'hybridation en étalant les métriques de pondération, à la base des précisions de chaque sous-système, utilisées pour combiner leurs résultats afin d'obtenir une position précise et exacte de la cible.

Dans le chapitre suivant, nous allons évaluer et tester la fiabilité de notre système hybride en mettant en pratique les formulations mathématiques de chaque sous-système ainsi que des métriques de précision.

# Chapitre 4 Validation de l'approche d'hybridation proposée

## 4.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté notre approche pour la mise en place d'un nouveau système hybride de localisation indoor basé sur la combinaison pondérée de trois technologies de localisation. Nous avons bâti cette pondération sur des indicateurs qui rappellent le taux de précision de chacune de ces technologies.

Dans le présent chapitre, nous évaluerons les performances de ce nouveau système en termes de précision en le comparant avec chacune de ses composantes. Pour ce faire, nous commencerons par présenter le prototype expérimental que nous avons adopté. La seconde partie sera consacrée à la discussion des résultats obtenus pour les sous-systèmes de localisation ainsi que pour le système hybride. Ensuite, nous détaillerons les tests que nous avons menés pour la validation de notre approche d'hybridation.

## 4.2. Prototype expérimental

Rappelons tout d'abord les objectifs à atteindre de notre nouveau système hybride de localisation indoor (section 3.2):

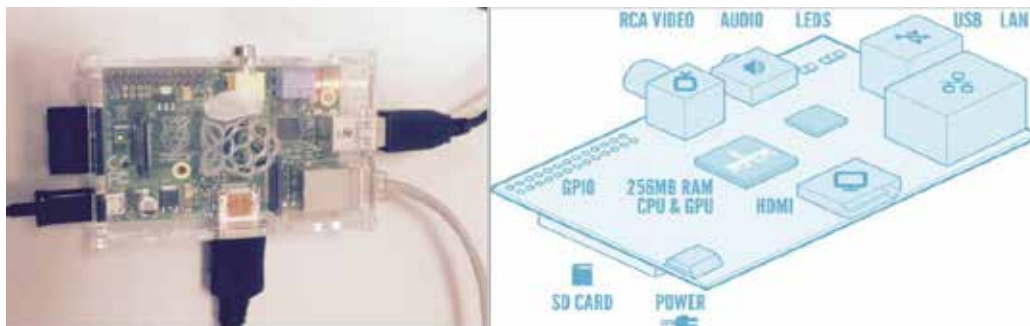
- être capable de retourner les coordonnées 2D d'une cible à l'intérieur d'un bâtiment ; l'information sur l'élévation (coordonnée z) ne constitue pas une donnée importante dans notre cas.
- les résultats à retourner par notre système doivent être aussi précis qu'exactes.
- ses composantes doivent bien s'intégrer à l'environnement ambiant à localiser sans nuire à la personne cible.

Dans le but d'évaluer les performances du système hybride de localisation indoor que nous avons proposé et de vérifier si nos objectifs de départ ont été bien réalisés, nous avons mis en place un prototype expérimental que nous avons conçu autour d'un ensemble de moyens matériels et logiciels dédiés. En effet, comme nous l'avons déjà détaillé dans le chapitre précédent, notre système hybride de localisation indoor est conçu en mettant en œuvre trois

technologies différentes (audio, BLE, LiFi) qui nécessitent chacune son propre matériel. La combinaison de ces trois technologies passe par un serveur qui communique avec le reste du matériel via des sockets TCP sur un réseau Ethernet.

Afin de mettre en place notre prototype expérimental (Figure 4.17), nous avons eu recours aux dispositifs suivants :

- Un ordinateur de bureau de RAM 4Go agissant en tant que serveur
- 2 ordinateurs de bureau de RAM supérieure à 2Go dont un agissant en tant que serveur. Le système d'exploitation installé dans chacun de ces ordinateurs est Windows7.
- Un Raspberry Pi (Fig. 4.1): un nano-ordinateur monocarte à processeur ARM permettant l'exécution du système d'exploitation libre GNU/Linux ainsi qu'un ensemble de logiciels compatibles. Ce nano-ordinateur est muni de :
  - o une Carte microSD en guise de disque dur sur laquelle nous avons installé l'image Raspbian,
  - o deux sorties USB sur l'une d'elle nous avons branché un dongle BLE (Module IOGEAR GBU521 présenté dans Fig.4.2,
  - o un port Ethernet, d'un port HDMI
  - o une alimentation micro-USB de la carte mère.



**Figure 4.1-** Raspberry Pi



**Figure 4.2-** Module IOGEAR GBU521

- 2 ordinateurs portables que nous avons installé sur chacun un Raspbian PIXEL via une clé USB afin d'agir en tant que Raspberry Pi. Deux modules IOGEAR GBU521 sont branchés à ces deux ordinateurs.
- Deux modules audio (Fig.4.3) constitué chacun d'une paire de deux microphones Electret. Ces deux modules sont fixés en forme de L sur deux murs de la salle d'expérimentation.



**Figure 4.3-** Module audio

- Un smartphone (samsung S6 edge +) muni d'une application Android d'émission RSSI et d'une application d'émission d'un son continu à une fréquence choisie.
- En ce qui concerne la partie LiFi, il nous était difficile de l'expérimenter par manque du nombre du matériel nécessaire. En revanche, ce module a été testé individuellement en utilisant le kit éducation LiFi développé par la société CAMPUS IP en partenariat avec la société OLEDCOMM (Fig. 4.5).

Ce kit est composé d'une lampe LED LiFi émettrice (alimentée en 5v ayant une puissance d'émission 115,2Kbit/s, un temps de chauffe de 10 minutes et qui émet son adresse MAC en continu), d'un Dongle LiFi récepteur composé d'un photorécepteur

conçu pour smartphone ou tablette et d'une application TagDetector qui permet d'afficher l'adresse MAC de la lampe LiFi en question.



**Figure 4.4-** kit éducation LiFi développé par la société CAMPUS IP

Afin de tester notre nouveau système de localisation, nous avons procédé par étapes. En effet, nous avons commencé par tester chaque sous-système individuellement en évaluant à chaque fois ses performances en termes de précision. Ensuite, nous avons combinés deux sous-systèmes audio et radio et nous avons comparé les performances obtenues à celles des sous-systèmes agissant chacun à part.

Comme logiciels, nous avons utilisé la plateforme MATLAB pour le traitement du signal sonore au moment de son acquisition par chaque microphone ainsi que pour la combinaison des résultats des sous-systèmes de localisation. En ce qui concerne le sous-système de localisation radio, nous avons conçu un module Python de scan périodique des paquets BLE émis par le smartphone.

### **4.3. Evaluation des performances des sous-systèmes de localisation indoor**

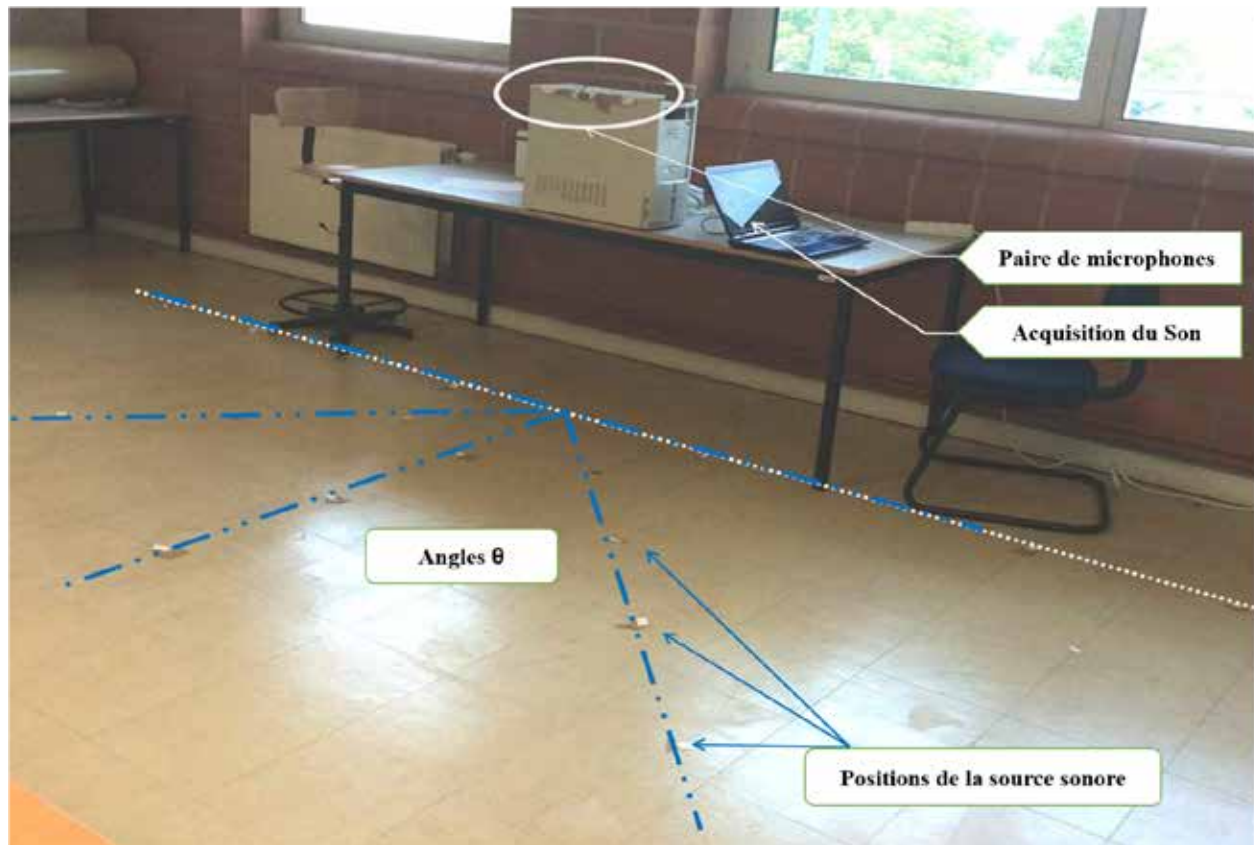
Avant de passer à la discussion des possibilités offertes par notre approche d'hybridation des trois technologies audio, radio et lumière pour un système plus précis, nous consacrons cette section pour l'évaluation des performances de chaque sous-système opérant seul.

#### **4.3.1. Sous-système de localisation audio**

Comme nous l'avons détaillé dans le précédent chapitre, le sous-système audio permet la localisation d'une source sonore en calculant pour chaque période d'acquisition ( $T_{ac}$ ) sa direction d'arrivée ( $\theta$ ) par rapport à chacune des deux barres de microphones et ce en exploitant les différences des temps d'arrivée (TDOA ou  $\tau$ ) des signaux sonores captés par chacun de ces microphones. Ce travail s'effectue en deux phases : l'estimation des directions d'arrivée pour chaque réseau de microphones (phase de *ranging*) et la localisation de la source sonore dans un repère prédéfini (phase de *positioning*).

##### **4.3.1.1. Phase de ranging**

L'expérimentation a été réalisée dans le laboratoire, comme le montre la figure 4.5. L'idée est de tester la méthode d'intercorrélation pour différents angles et différentes positions de la source sonore par rapport à la paire de microphones.



**Figure 4.5-** Expérimentation de la phase ranging audio

Les essais de ce système ont été effectués en quatre étapes via une application MATLAB que nous avons développée (Fig. 4.6):

- Acquisition du signal sonore observé par la paire de microphones
- Conversion des signaux analogiques captés en utilisant un convertisseur analogique numérique (CAN)
- Estimation du TDOA et de la direction d'arrivée de la source sonore à chaque  $T_{ac}$  en faisant appel à la méthode d'intercorrélation (voir section 3.3.2.2.1),
- Estimation de l'angle  $\theta$ .



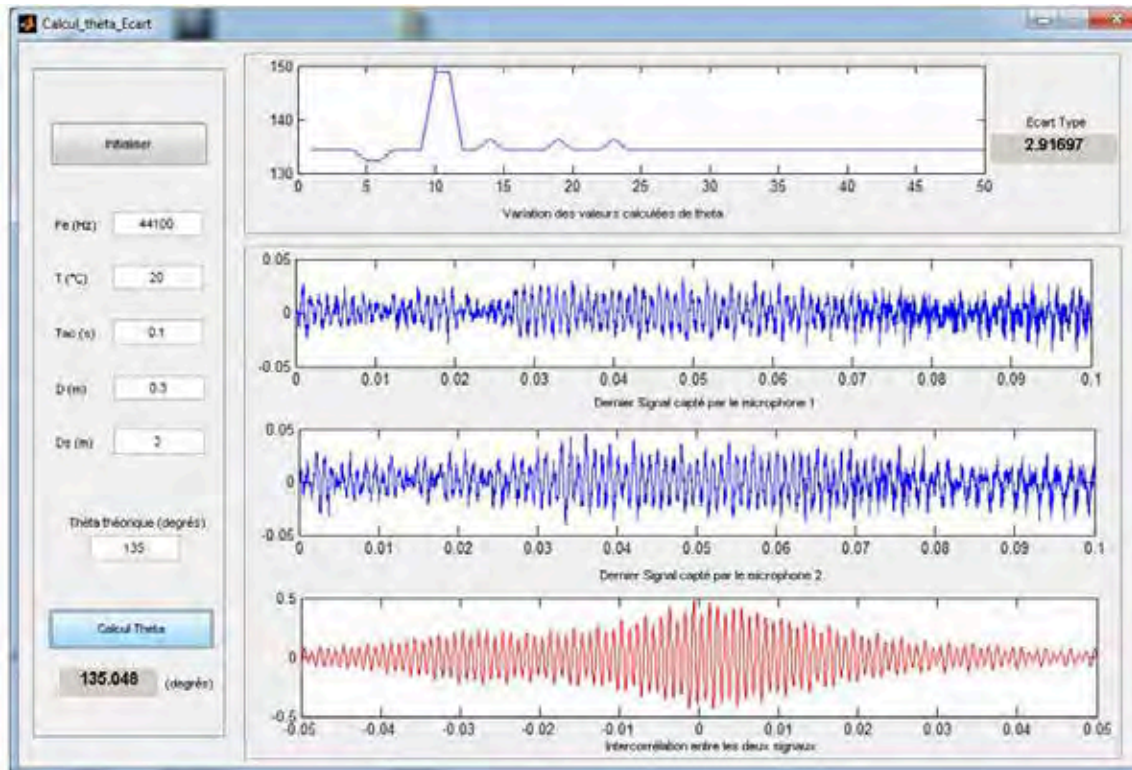


Figure 4.6- Application MATLAB pour l'expérimentation de la phase ranging audio

Les résultats obtenus sont donnés par les courbes suivantes :

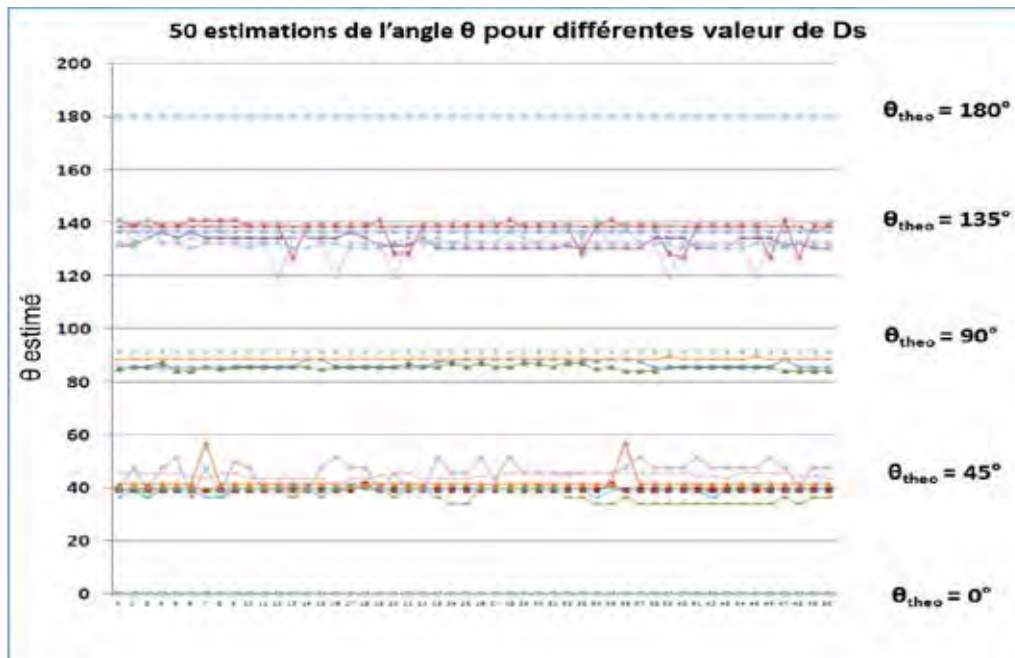
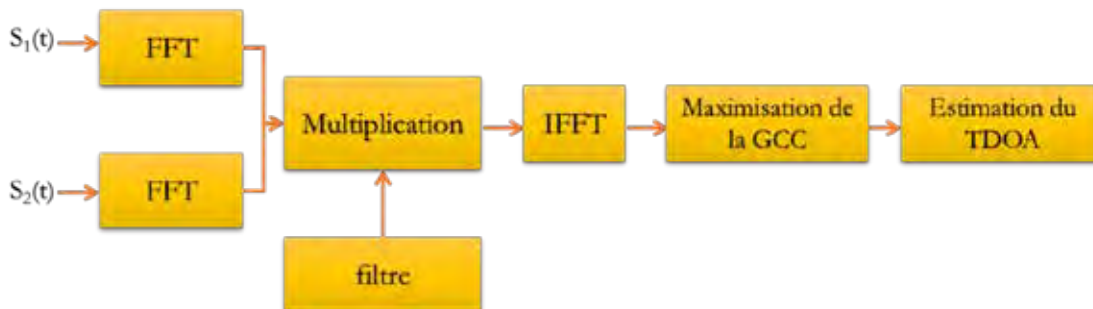


Figure 4.7- Estimation de l'angle  $\theta$  pour différentes positions de l'onde sonore

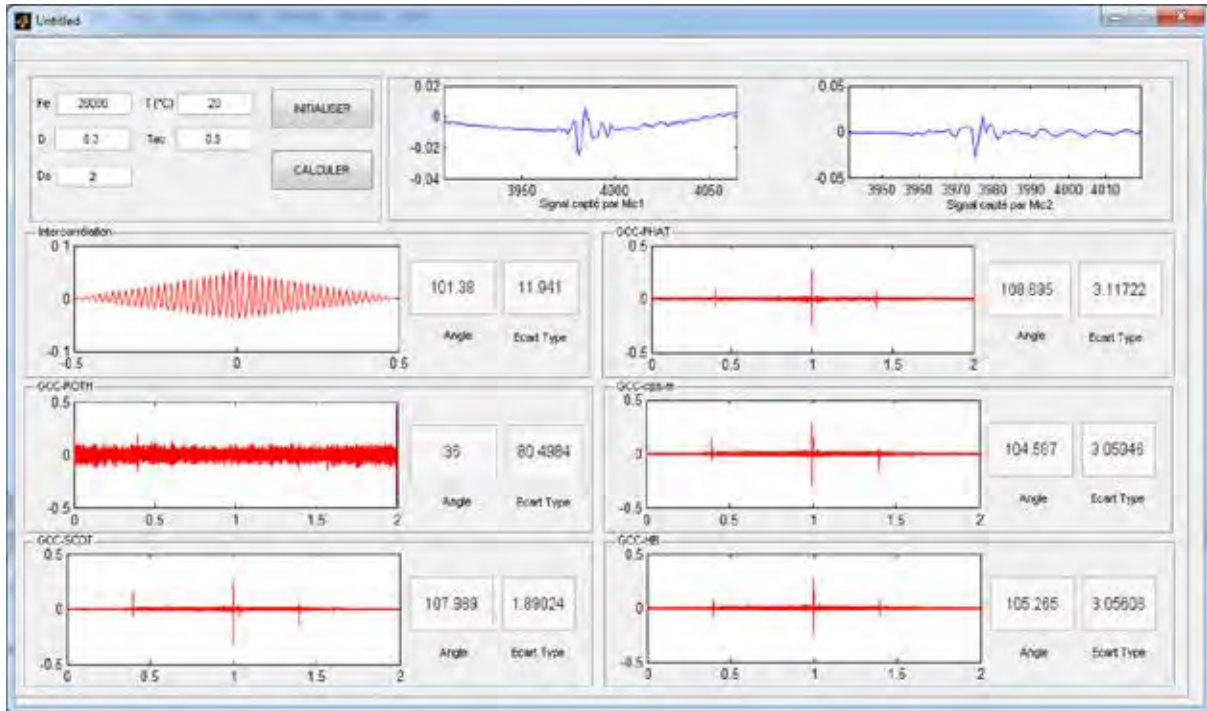
En considérant les angles calculés à différentes distances de la source sonore, nous notons principalement les constats suivants :

1. Plus la distance entre la paire de microphones et la source sonore est grande, plus l'erreur est grande
2. La présence d'incohérences ponctuelles au niveau de quelques résultats. Il s'agit de données aberrantes qui pourraient affecter la valeur de l'angle du fait qu'il s'agit de la moyenne des  $N_{est}$  angles estimés. Nous avons donc ajouté une étape de rejet des données aberrantes (voir section 3.3.1) et ce en adoptant la méthode de Thompson Tau (THOMPSON, 1985).
3. Pour quelques observations, l'erreur atteint plus que  $15^\circ$ . Cette erreur est en partie due à une défaillance matérielle au niveau des microphones. Mais elle est aussi la conséquence de l'utilisation de l'intercorrélation dans le domaine temporel pour estimer le retard à cause de la présence du bruit. Une des solutions possibles est de passer au domaine fréquentiel tout en filtrant les sons observés par une fonction de pondération (Fig. 4.8).



**Figure 4.8-** Principe de la GCC (KNAPP et al., 1976)

Nous avons donc commencé par réaliser un comparatif des différentes fonctions les plus utilisées : PHAT (KNAPP, 1976), ROTH (ROTH, 1971), cps-m (KNAPP, 1976), SCOT (CARTER, 1973) et HB (CHEN, 2006) (voir section 3.3.2.2). Ainsi, pour un même signal sonore continu de fréquence 2KHz observé à une distance de 2m par la même barre de microphones Electret d'entraxe = 30 cm, la réponse simultanée de chacun de ces filtres (fonctions de pondération GCC) est donnée via une interface MATLAB (Fig. 4.8). Pour que les estimations que nous réalisons soient correctes, nous avons réalisé  $N_{est}$  estimations ( $N_{est} = 50$ ) du même angle  $\varphi$ .

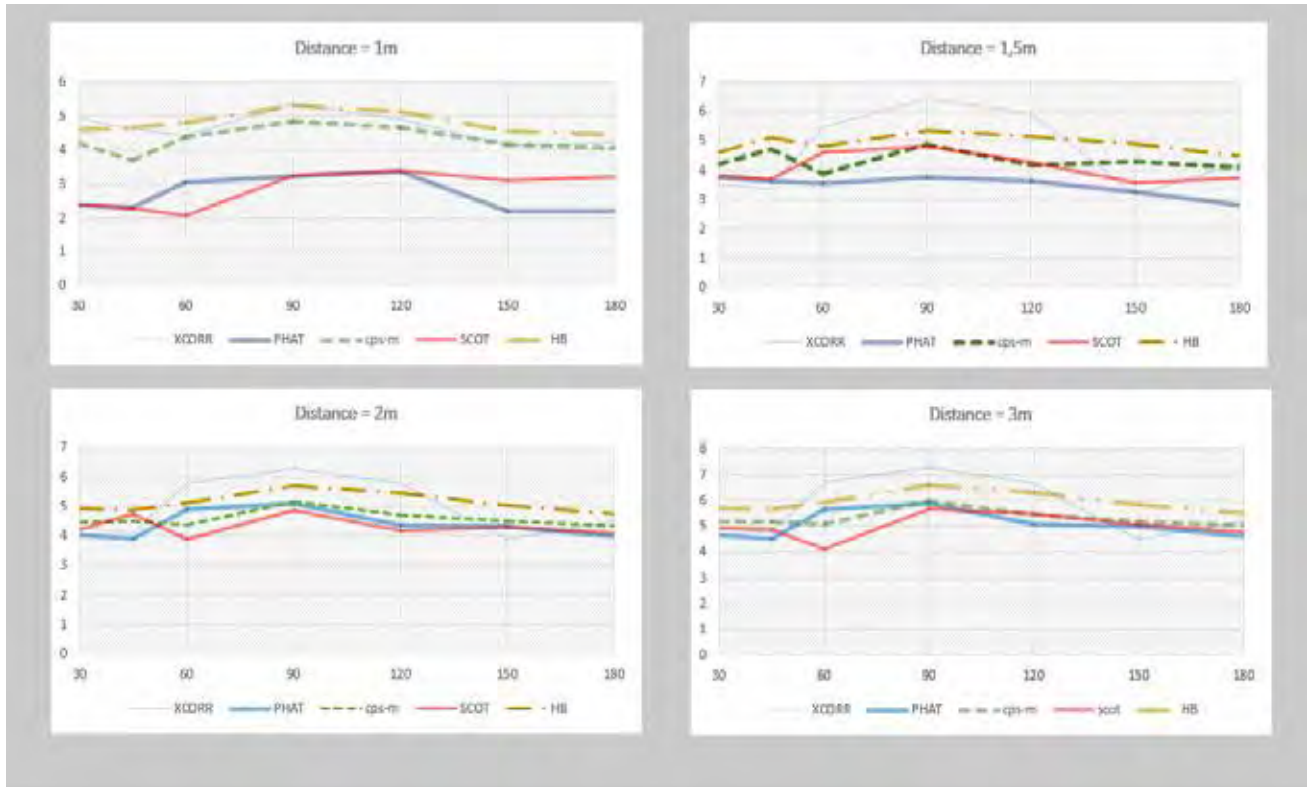


**Figure 4.9-** Interface MATLAB de comparaison des fonctions de pondération GCC

Ce programme permet de visualiser instantanément cette réponse et de calculer pour chacune la moyenne des  $N_{est}$  angles retournés ainsi que l'écart type de ces angles. L'évaluation des performances de chaque méthode GCC comparée à l'intercorrélation dans le domaine temporel se base sur les critères suivants :

- L'erreur de l'angle estimé par rapport à l'angle réel en fonction de la distance entre la source sonore et la paire de microphones :  $E = |\theta - \hat{\theta}|$
- L'écart type entre les  $N_{est}$  angles estimés

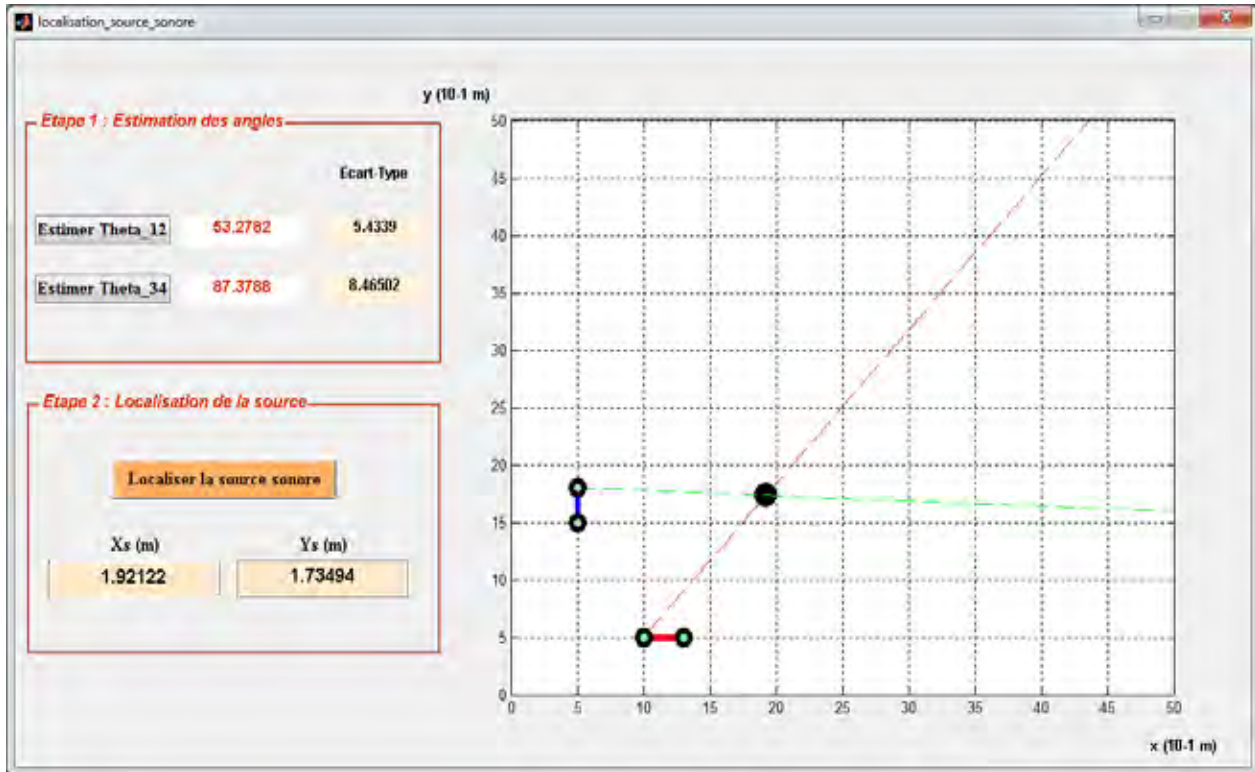
Les résultats obtenus ont montré que la méthode GCC-PHAT est la meilleure de point de vue minimisation de l'erreur de ranging (Fig. 4.10). C'est cette méthode que nous utiliserons pour le reste de nos expérimentations.



**Figure 4.10-** Comparaison des performances des fonctions de pondération GCC

#### 4.3.1.2. Phase de positioning

Une fois calculés, les deux angles observés par chaque paire de microphones sont envoyés vers un serveur sur lequel nous avons développé une application MATLAB (Fig. 4.11) qui permet de lire ces angles en utilisant des sockets TCP et de calculer la position de la source sonore.



**Figure 4.11-** Application MATLAB pour calcul de la position de la source sonore

Le principe de cette application de positionnement est le calcul des coordonnées du point d'intersection des deux directions d'arrivée de l'onde sonore par rapport aux deux barres de microphones. Il s'agit alors d'appliquer la technique de triangulation que nous avons déjà détaillée dans les sections 1.5.1 et 3.3.2.2.2.

Ainsi, pour des positions connues (Fig. 4.12 - a), les angles  $\theta_{12}$  et  $\theta_{34}$  sont estimés chacun sur un ordinateur puis envoyés vers le serveur qui les combine afin de calculer la position de la source sonore par triangulation. Les résultats obtenus sont donnés par le tableau suivant ainsi que la figure 4.12-b.



Angles réels (°)		Positions réelles (m)		Angles estimés (°)		Positions estimées (m)	
$\theta_{12}$	$\theta_{34}$	$X$	$Y$	$\theta_{12}$	$\theta_{34}$	$X$	$Y$
90	45	1	1.3	94.15	39.03	0.946	1.25
90	135	1	2.3	95.9	135.048	0.831	2.132
90	90	1	1.8	84.078	89.554	1.13	1.79
45	45	1.4	0.9	44.61	41.77	1.35	0.84
45	90	2.3	1.8	53.28	87.38	1.92	1.735

Tableau 4-1: Positionnement d'une source sonore par triangulation

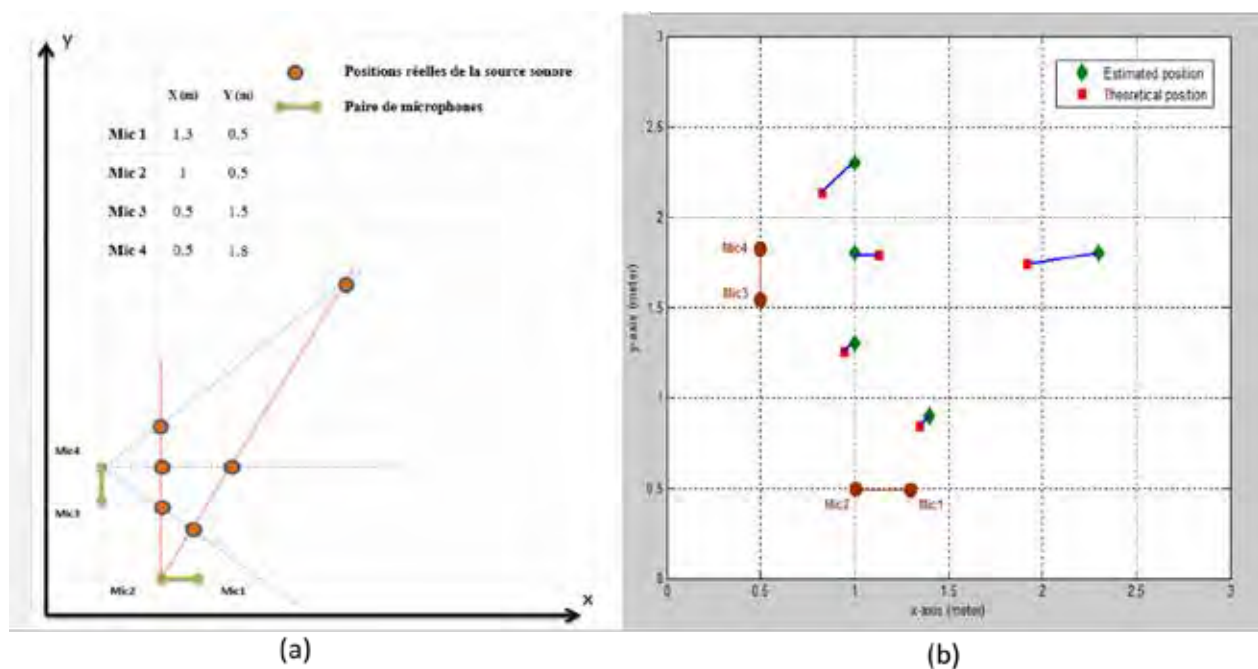


Figure 4.12- Précision du sous-système de localisation audio

Les résultats obtenus nous confirment que la précision du sous-système de localisation audio passe par celles des deux phases : *ranging* et *positioning*. En effet, une mauvaise estimation de l'un ou des deux des angles influe sur l'exactitude de l'application de la technique de triangulation qui est elle-même sujette à des imprécisions.

### 4.3.2. Sous-système de localisation BLE

Le sous-système de localisation BLE que nous avons proposé, a été l'objet d'un ensemble d'expérimentations qui avaient pour but de valider son architecture ainsi que d'évaluer ses performances. Nous avons donc mis en œuvre un prototype expérimental composé d'un RASPBERRY Pi et de deux ordinateurs sur lesquels nous avons installé une image RASPBIAN PIXEL. Ces trois ordinateurs sont tous munis de dongles BLE, qui leur permettent de recevoir les trames BLE émises par le smartphone à localiser.

#### 4.3.2.1. Phase de calibrage offline

Avant d'entamer les expérimentations de ranging radio, nous avons commencé par calibrer notre sous-système en calculant pour la période en cours l'indice d'environnement  $n$  ainsi que le RSSI ( $d_0 = 1$  m). Nous avons donc développé deux scripts python : PIScanBLE et PISendBLE. En effet, le Raspberry Pi, muni d'un dongle BLE peut jouer le rôle soit d'un émetteur BLE (beacon) en n'utilisant que le canal «advertisement» soit d'un d'un récepteur qui intercepte les paquets advertising communiqués par les autres appareils BLE.

Ainsi en appliquant les deux équations (58) et (59) de la section 3.3.3.2, l'indice

d'environnement  $n$  sera donné par :  $n_T = \frac{\sum_{i=1}^3 n_i}{3}$  où  $n_i = \frac{\text{RSSI}(d_0) - \text{RSSI}(d_j^i)}{10 \times \log\left(\frac{d_j^i}{d_0}\right)}$

Avec  $d_j^i$  : distance déjà connue entre les deux ancres  $i$  et  $j$  ( $i, j : 1..3$ )

$n_i$  : indice  $n$  calculé au niveau de l'ancre  $n^\circ i$  ( $i : 1..3$ )

#### 4.3.2.2. Phase de ranging

Ayant déjà calibré notre sous-système pour la période en cours, et afin de valider la phase de ranging de notre modèle radio, nous avons développé un script python qui permet de scanner le réseau à la recherche d'émetteurs BLE.

Une fois découverts, ces émetteurs BLE sont identifiés par leurs adresses MAC. Le programme Python interroge alors la cible et affiche son adresse MAC ainsi que les 10 RSSI BLE qu'il reçoit. Ces données sont envoyées via des sockets TCP vers le serveur. Une fois reçus, ces indicateurs de puissances RSSI seront exploités pour calculer la distance entre l'émetteur BLE (Smartphone) et le récepteur BLE (Raspberry).

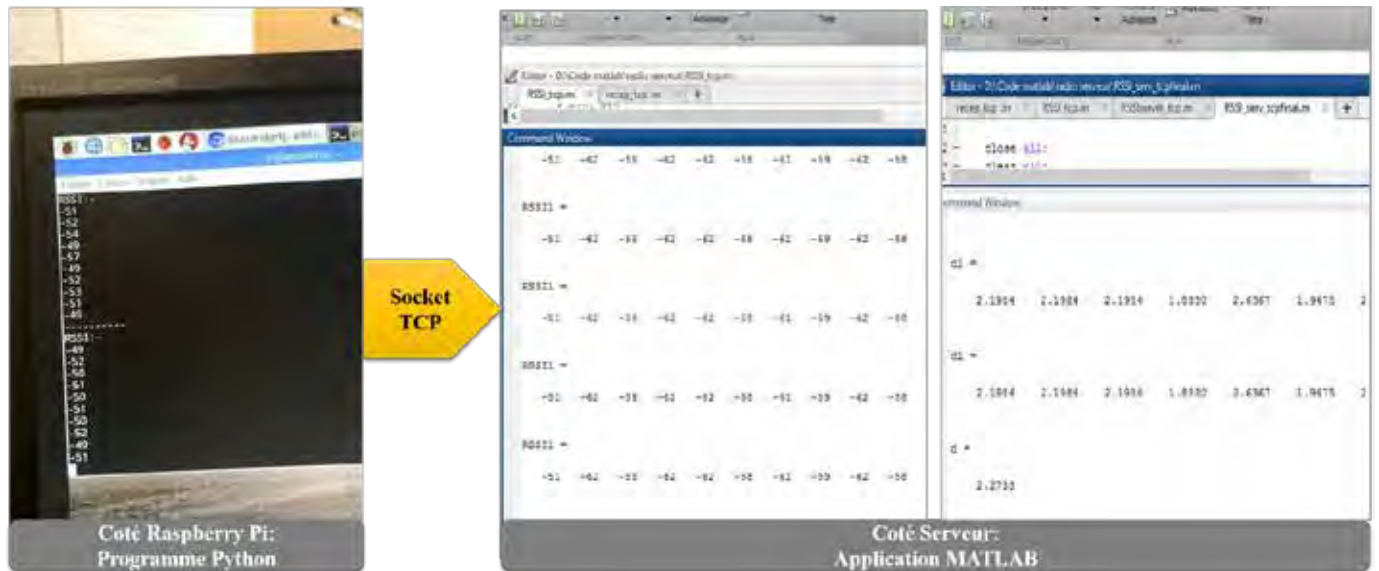


Figure 4.13- Phase ranging : Capture des RSSI BLE

Nous avons noté que les indicateurs RSSI doivent passer par une étape de "*filtration*" durant laquelle les mesures aberrantes doivent être rejetées.

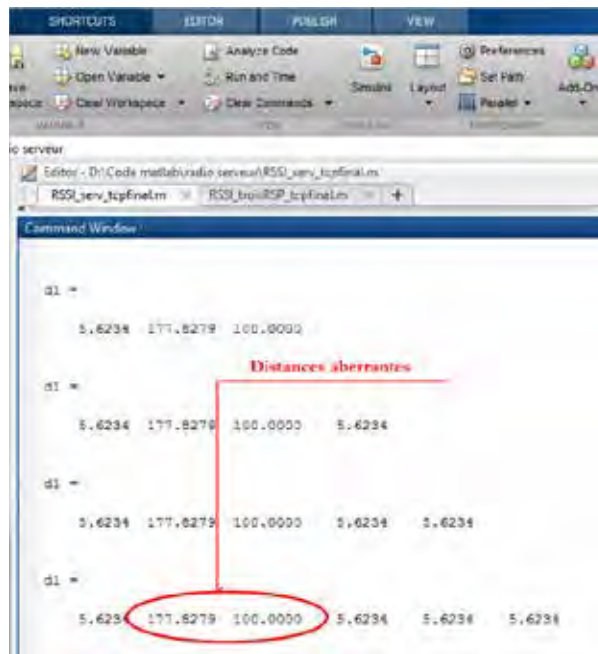


Figure 4.14- Phase ranging : données aberrantes

En effet, comme nous pouvons le voir dans la figure 4.15, la présence de valeurs incohérentes des lectures RSSI peut engendrer des valeurs aberrantes de distances.



Ainsi, après rejet des valeurs RSSI aberrantes, le calcul de la distance pour différentes positions retourne une erreur moyenne de 0,38626m (Tableau 4.2) ce qui est considéré acceptable.

<b>D réelle</b>	<b>moyenne RSSI</b>	<b>D estimée</b>	<b>Erreur</b>
1,5	-66	1,8738	0,3738
2	-66	1,8738	0,1262
2,5	-68	2,8480	0,3480
3	-68	2,8480	0,1520
3,5	-70	4,3288	0,8288
4	-69	3,5112	0,4888
<b>Erreur moyenne</b>			<b>0,38626</b>

**Tableau 4-2:** Evaluation de la précision de la phase ranging BLE

#### 4.3.2.3. Phase de positioning

Pendant cette phase, le sous-système calcule les coordonnées en appliquant la technique de trilateration. Comme nous l'avons déjà détaillé dans les sections 1.5.23.3.3.4, la solution que nous adoptons pour notre travail est la linéarisation du système d'équation (61) :

$$\begin{cases} d_1^2 = (x_1 - x_{BLE})^2 + (y_1 - y_{BLE})^2 \\ d_2^2 = (x_2 - x_{BLE})^2 + (y_2 - y_{BLE})^2 \\ d_3^2 = (x_3 - x_{BLE})^2 + (y_3 - y_{BLE})^2 \end{cases}$$

Afin de tester notre solution à ce système, nous avons développé une application MATLAB (Fig.4.16) qui prend en entrée les trois distances estimées et retourne la position du mobile cible. Durant ces expérimentations, nous avons eu affaire à trois cas de figure comme le montre la figure 4.15 : pour les cas où l'erreur de ranging est minimale, les trois cercles de diamètres respectifs les distances estimées se coupent en un seul point. Dans les cas où les estimations de distances sont erronées (erreur maximale), les cercles soient ne se coupent pas, soit forment une zone d'intersection.

En effet, comme nous l'avons déjà détaillé précédemment, en trilatération, généralement, une mesure « précise » et « exacte » mène à un seul point. Les éventuelles incertitudes de mesure conduisent à une zone plus ou moins grande (selon les erreurs de mesure) autour de la position réelle de la cible à localiser.

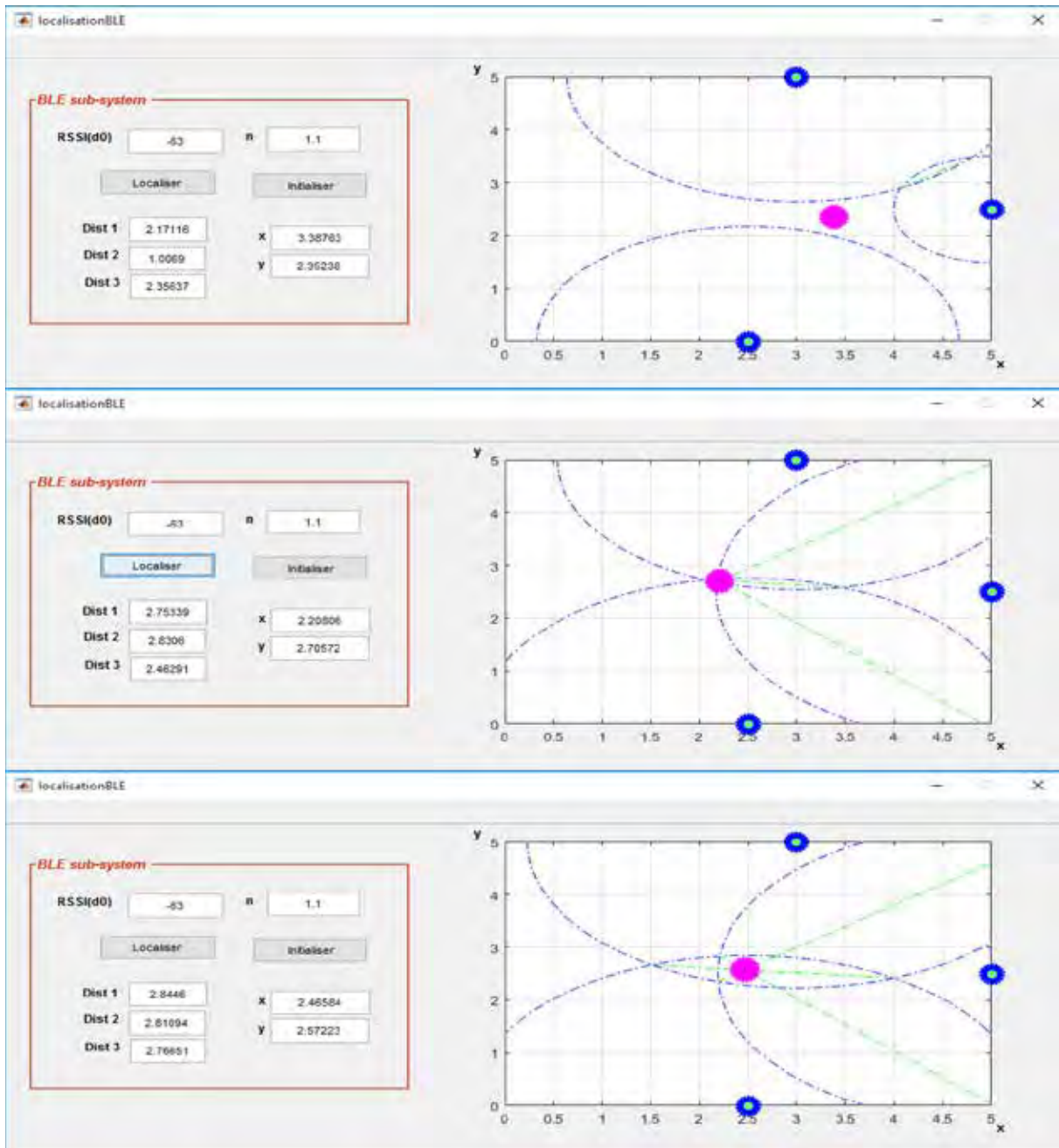


Figure 4.15- Interface MATABL pour la phase positioning BLE

Dans le système que nous proposons, la linéarisation du système d'équations résultant de la trilatération conduit dans tous les cas à un seul point. Dans le cas idéal, ce point coïncide avec l'intersection des trois cercles. Dans les deux autres cas (intersection de seulement deux cercles ou aucune intersection), le système retourne un seul point qui soit le plus proche du point réel.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Positions réelles		Distances estimées			Positions estimées		Erreur de positionnement		
<i>x</i>	<i>y</i>	<i>d1_ave</i>	<i>d2_ave</i>	<i>d3_ave</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>Distance</i>
3	2,5	2,11	1,37	2,11	3,045	2,471	0,045	0,029	0,473
3	4	3,76	2,11	0,77	3,12	3,818	0,12	0,182	0,218
4	3	3,76	1,19	1,37	3,937	3,607	0,063	0,607	0,398
1	3	3,34	4,01	1,28	0,32	3,695	0,68	0,695	0,972
3	2	2,11	1,19	2,82	3,536	2,071	0,536	0,071	0,541
2,5	2	1,37	1,37	2,11	2,661	2,164	0,161	0,164	0,377
2	2	0,67	2,44	2,82	2,083	1,816	0,083	0,184	0,456
2	3	2,44	2,82	1,58	1,644	2,956	0,356	0,044	0,359

Tableau 4-3: Evaluation de la précision de la localisation BLE

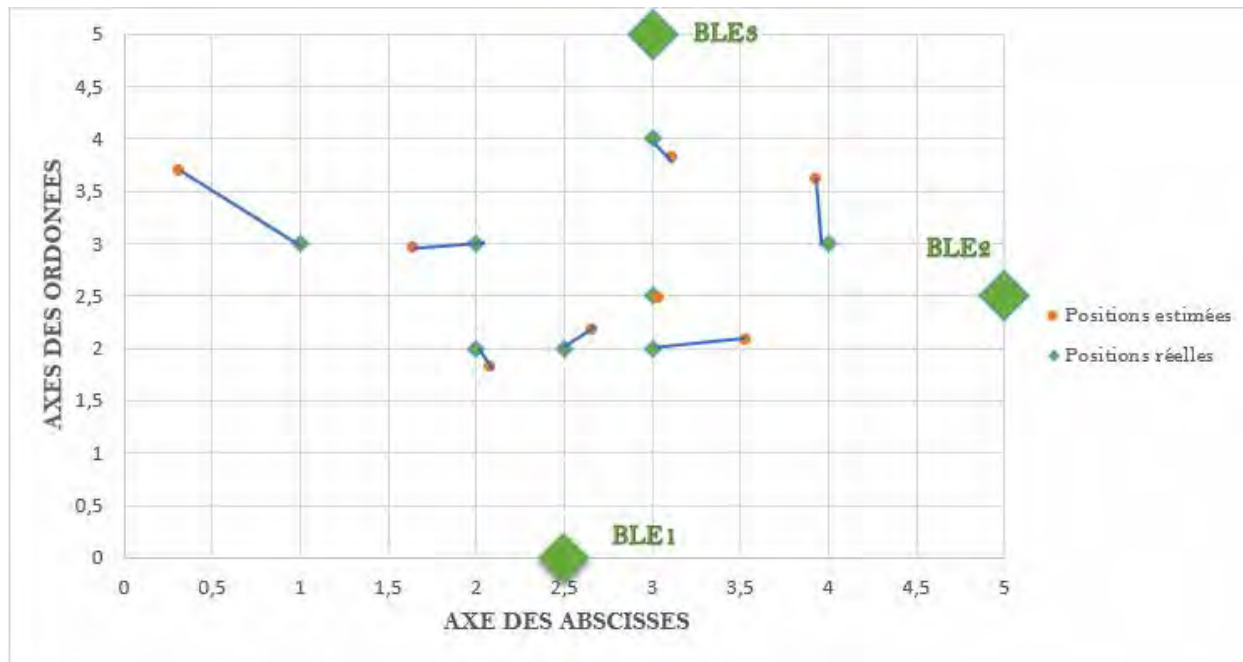


Figure 4.16- Taux d'erreur de la localisation BLE

Comme nous pouvons le constater dans la figure 4.16, pour différentes positions du mobile cible par rapport aux trois beacons fixes, l'erreur moyenne de localisation ne dépasse pas

0,5 m ce qui est considéré tolérable compte tenu du contexte de localisation d'une personne âgée se déplaçant dans une pièce à vitesse ne dépassant pas 0,8 m/s <sup>8</sup>.

#### **4.4. Validation de l'approche d'hybridation proposée**

A ce stade d'expérimentations, notre but est de valider notre choix des paramètres de combinaison des différentes technologies de localisation. En effet, il serait plus judicieux de vérifier si notre approche améliore ou non les résultats obtenus par chaque sous-système agissant séparément. Pour ce faire, notre idée est de réaliser des mesures à différentes distances et angles, en estimer les positions par rapport aux différents capteurs (microphones et beacons) et calculer les DOP respectifs tout en comparant à chaque fois l'erreur du système lors de la localisation de la cible.

En effet, comme nous l'avons détaillé dans le chapitre précédent, notre but est de tirer le maximum de profit des technologies mises en œuvre tout en minimisant leurs inconvénients, notamment de point de vue précision. La combinaison de ces technologies comme nous l'avons prévue est réalisée à l'aide de « poids » qui rappellent en temps réel « le taux de confiance » que nous accordons à chaque technologie à la seule connaissance de sa réponse durant les deux phases de ranging et de positioning.

Le prototype expérimental que nous avons testé se présente comme dans la figure 4.17. En effet, les différents capteurs sont déployés dans la salle d'essai de façon à ce que le mobile à localiser soit toujours à la portée d'au moins l'une des deux technologies.

---

<sup>8</sup>Selon une étude réalisée en 2013 par l'Institut de Recherche du Bien-être, de la Médecine et du Sport réalisée en 2013 sur l'évaluation de la vitesse de déplacement chez une personne sédentaire (IRBMS, 2017).

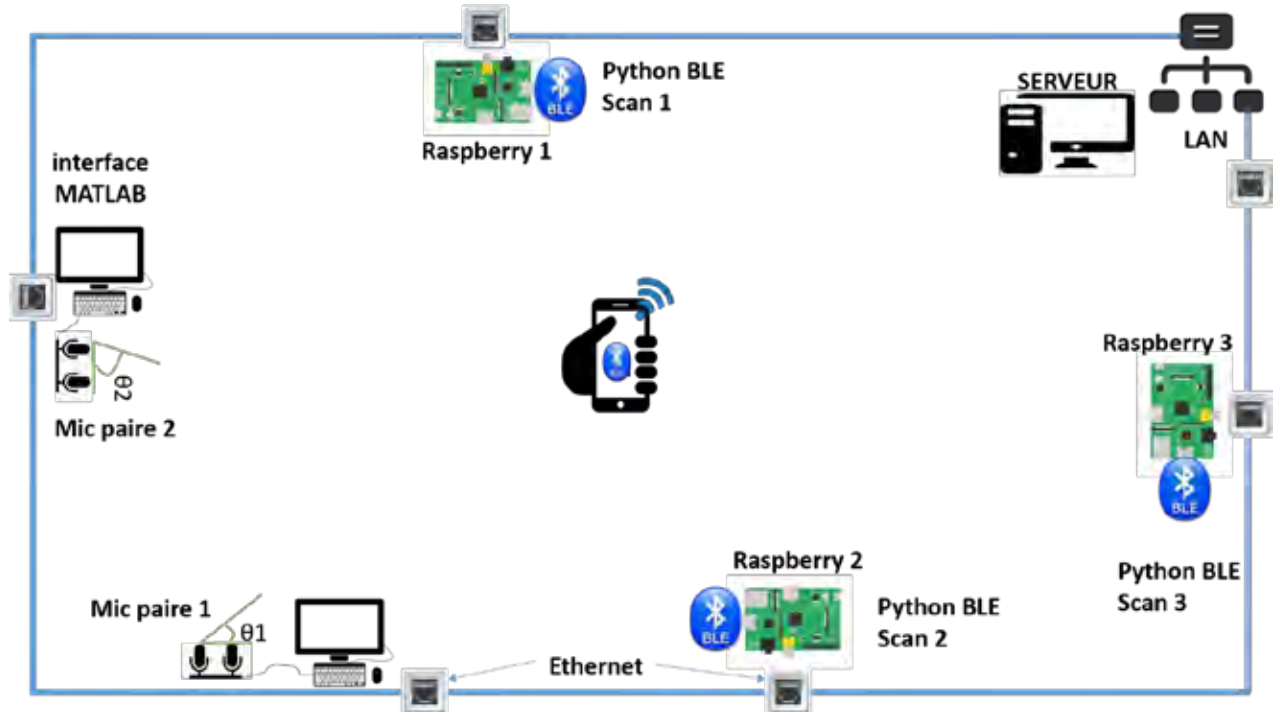


Figure 4.17- Prototype expérimental

De même, nous avons développé une application MATLAB (Figure 4.18) qui combine les deux technologies radio et audio (faute de matériels, la technologie LiFi n'a pas été mise en œuvre à ce stade) et retourne en temps réel la position de la cible calculée par chacun des deux sous-systèmes de localisation ainsi que celle obtenue après leur combinaison moyennant des facteurs de pondération calculés instantanément en fonction de la précision de ces sous-systèmes durant leurs phases de ranging et de positioning. Les résultats sont donnés dans le tableau 4.4 ainsi que la courbe à la figure 4.18.

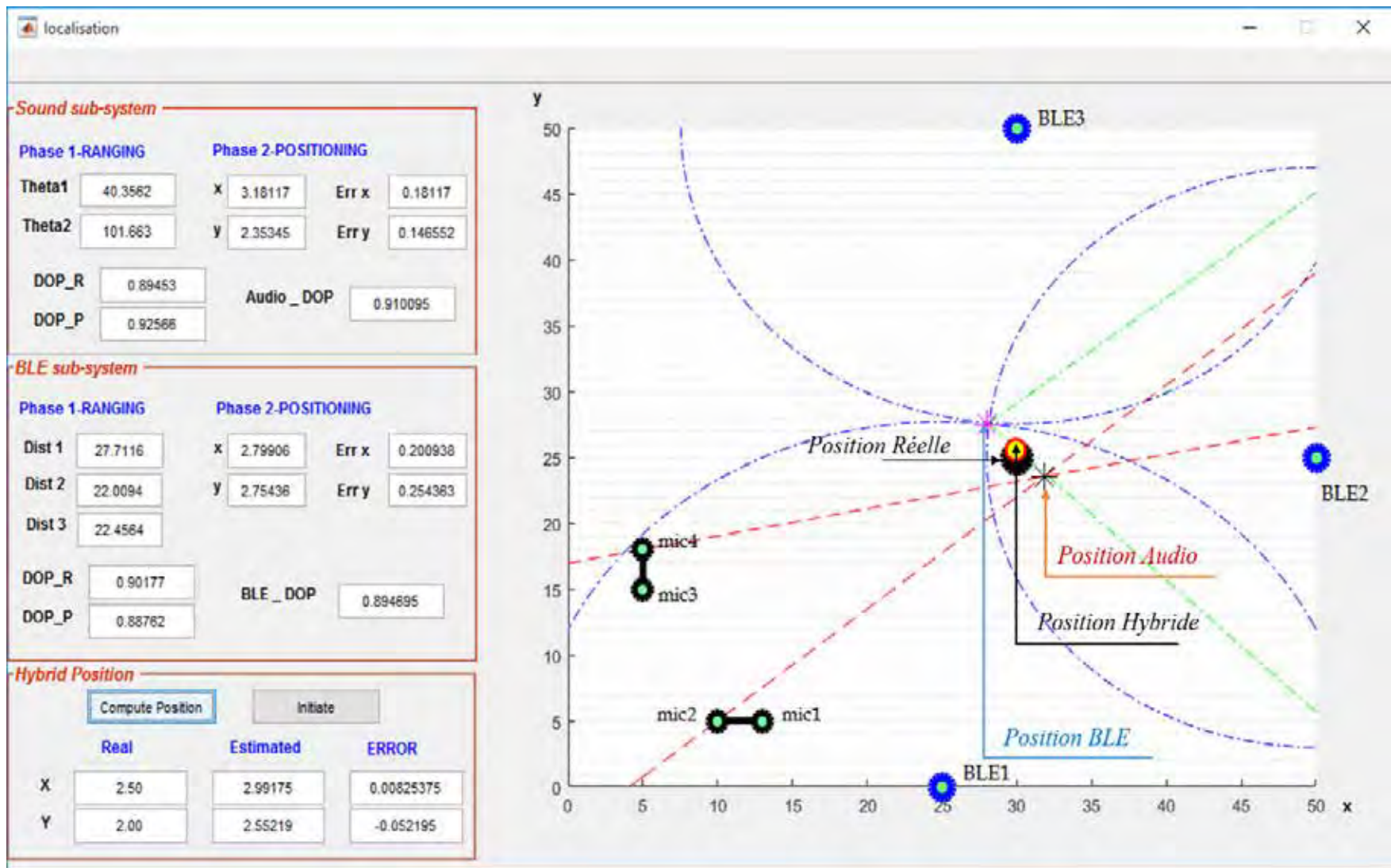


Figure 4.18- Interface MATABL pour localisation indoor hybride

	Position réelle							Sous système Audio						Sous système BLE						Position Hybride			
	$\theta_{12}$	$\theta_{34}$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	X	Y	$\theta_{12}$	$\theta_{34}$	X	Y	Erreur	DOP	$d_1$	$d_2$	$d_3$	X	Y	Erreur	DOP	X	Y	Erreur
1	45	45	1,4	3,9	4,4	1,4	0,9	50,37	52,92	1,47	1,07	0,18	0,812	1,51	4,23	4,87	1,38	0,49	0,41	0,812	1,43	0,78	0,12
2	45	90	1,8	2,8	3,3	2,3	1,8	57,86	108,97	2,18	2,38	0,59	0,547	1,98	3,03	3,27	2,05	1,89	0,27	0,867	2,10	2,08	0,34
3	45	120	4,8	1,8	1,9	4,75	4,25	59,18	133,12	3,89	4,31	0,86	0,201	4,72	1,71	1,67	4,91	4,16	0,18	0,908	4,73	4,19	0,07
4	90	45	2	4,2	4,2	1	1,3	98,37	50,23	0,85	1,51	0,26	0,791	2,53	4,41	4,97	1,61	0,78	0,80	0,768	1,22	1,15	0,27
5	90	90	2,3	4,1	3,8	1	1,8	84,31	96,83	1,14	1,88	0,16	0,834	2,58	4,31	3,73	0,63	1,98	0,41	0,836	0,88	1,93	0,17
6	90	110	2,5	4	3,6	1	2	80,66	118,17	1,28	2,22	0,36	0,816	2,69	4,38	3,79	0,6	2,03	0,40	0,839	0,94	2,12	0,14
7	110	45	2,7	4,6	4,1	0,75	1,75	101,08	41,31	0,82	1,44	0,32	0,706	2,89	4,32	3,86	0,9	2,03	0,32	0,828	0,86	1,76	0,11
8	60	120	2,9	2,6	2,2	2,4	2,9	49,03	111,71	2,99	2,79	0,60	0,582	2,99	2,72	2,56	2,54	2,76	0,20	0,922	2,71	2,77	0,34
9	30	100	3,2	0,6	2,9	4,45	2,5	41,88	113,32	4,25	3,42	0,94	0,335	3,49	0,62	3,11	4,81	2,54	0,36	0,818	4,65	2,80	0,36
10	30	90	2	1,9	3,2	3,25	1,8	43,13	101,98	2,94	2,32	0,61	0,561	2,27	2,12	3,37	3,43	1,92	0,22	0,916	3,24	2,07	0,27

Tableau 4-4: Evaluation des performances de l'approche d'hybridation proposée

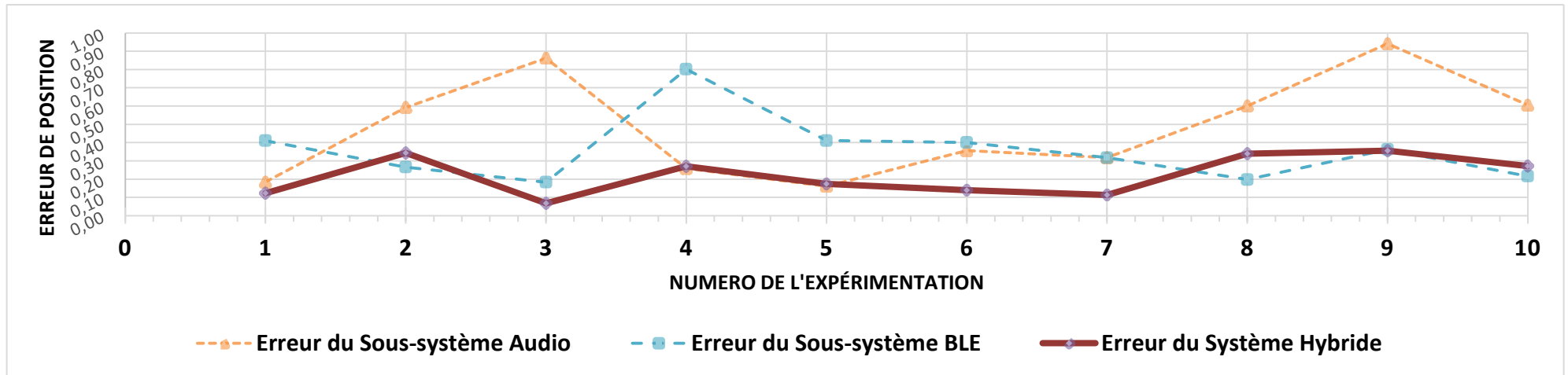
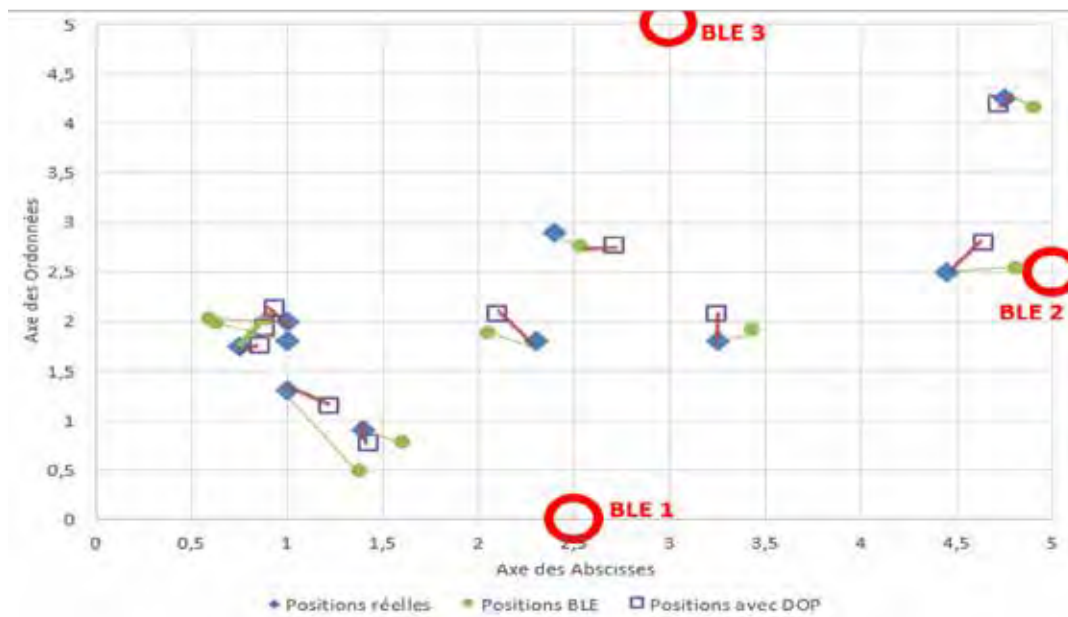
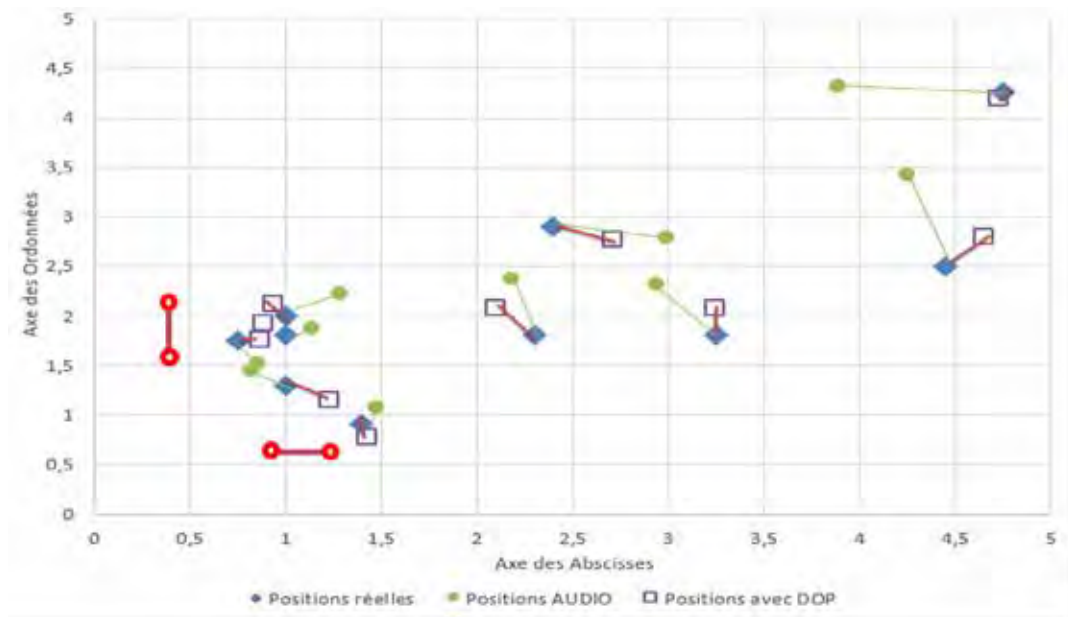


Figure 4.19- Evaluation des performances de l'approche d'hybridation proposée





**Figure 4.20-** Optimisation de la position par l'ajout des DOP

A l'issue de cette série d'expérimentations, nous pouvons constater ce qui suit :

- Comme le montre la **Figure 4.20**, pour les positions de la cible les plus « proches » des microphones, la réponse du sous-système audio est plus « précise ». Ceci se traduit par un meilleur DOP et de valeurs d'erreur plus petites. Ces performances dimi-



nent dès que la cible s'éloigne de la zone de portée de ces microphones. Ceci s'explique par les limites du signal sonore. En effet, le son audible est sensible aux bruits ambiants ainsi qu'aux conditions environnementales (température, pression, ...). Plus le capteur est loin de la source sonore, plus ces paramètres affectent considérablement la localisation.

- Analogiquement, les performances du sous-système BLE sont nettement meilleures pour les positions du mobile les plus proches du réseau de beacons.
- La combinaison de ces deux technologies permet une réponse plus précise et un taux d'erreur plus bas dans tout point de la salle d'expérimentation ce qui permet de couvrir les zones aveugles de chaque technologie.

Ainsi, l'approche d'hybridation de ces technologies donne des résultats nettement plus précis que ceux des deux technologies agissant séparément. En effet, en moyenne, l'erreur passe de 0,52 m pour le cas du sous-système de localisation audio et de 0,4 m pour le sous-système BLE à 0,2 m en combinant ces deux sous-systèmes.

#### **4.5. Conclusion**

Dans le présent chapitre, nous avons discuté les différentes expérimentations que nous avons réalisé le long de notre parcours de mise en place d'une approche d'hybridation des trois technologies de localisation indoor (audio, radio et LiFi).

Au terme de ces expérimentations, les résultats obtenus nous permettent de conclure que notre approche basée sur des indicateurs de précision agissant en tant que pondérations donne des résultats plus précis de l'ordre de 0,2 m près.

# Chapitre 5 Conclusion et Perspectives

Durant les dernières années, vu la chute du taux de fertilité en Europe contre une augmentation de l'espérance de vie de sa population, le nombre de personnes âgées ne cesse d'augmenter entraînant l'apparition de nouveaux besoins en terme d'assistance à domicile. En effet, les personnes âgées vivant seules sont de plus en plus nombreuses, soit parce qu'elles ont choisi de vivre de manière autonome, soit par manque de place dans les institutions spécialisées. Ainsi, par soucis de leur assurer une assistance continue, et de leur permettre, tout en restant chez eux, de mener une vie confortable et sûre, plusieurs recherches ont été menées afin d'adapter les habitats abritant ces personnes en y incorporant des fonctionnalités de domotique permettant de palier leurs inaptitudes. Il s'agit de la notion de « maison intelligente », un habitat disposant de certains systèmes domotiques permettant à ses habitants de mener une vie confortable tout en étant sécurisés (JEULAND, 2005).

L'une des premières études, ayant comme objectif d'adapter les fonctionnalités d'un habitat intelligent pour le suivi et l'enregistrement des signaux vitaux d'une personne vers une équipe de secours, a été proposée depuis 1992 dans (INADA et al., 1992); depuis lors, plusieurs autres études ont suivi permettant ainsi de généraliser la notion domotique pour des applications d'assistance à domicile dans le cadre de maisons intelligentes à l'instar de l'étude proposée dans (NOURY et al., 1992), (YAMAGUCHI et al., 1998) et (STEENKESTE et al., 2001).

Si la technologie la plus utilisée dans ce contexte de maisons intelligentes a été historiquement la radio, d'autres technologies ont fait dernièrement leur entrée sur la scène ouvrant d'autres axes de recherche, jusque lors, peu exploitées. L'analyse des informations sur le son et la lumière dans un habitat en est un exemple.

Notre travail consiste à combiner ces trois technologies afin de proposer un système hybride de localisation indoor qui soit efficace et précis. Un tel objectif a été atteint par la proposition de nouveaux indicateurs DOP-like qui ont contribué à améliorer les performances de notre système par rapport à celles des trois technologies mises en œuvre séparément comme le montrent les différentes expérimentations que nous avons effectuées pour cette fin. En effet, après l'introduction des indicateurs, l'erreur de localisation est passée de 0,5m

en moyenne pour le système audio et 0,4m pour le système BLE à 0,2 m pour une hybridation de ces deux technologies.

Nous avons donc consacré le premier chapitre de ce mémoire à la présentation des différentes techniques et technologies de localisation indoor. Le second chapitre a détaillé la notion de combinaison des technologies de localisation en dressant une liste d'exemples de systèmes hybrides de localisation.

Dans le chapitre 3, nous avons présenté notre nouvelle approche d'hybridation en détaillant chaque sous-système de localisation ainsi que les indicateurs de précision DOP-Like que nous avons proposés pour la mise en place d'un système précis bâti autour des trois technologies de localisation indoor radio, audio et LiFi.

Enfin, le dernier chapitre a parcouru l'ensemble d'évaluations et d'expérimentations auxquelles nous avons soumis notre nouveau système hybride afin de s'assurer de son efficacité du point de vue précision.

Le travail que nous avons réalisé, a contribué à mettre en avant les avantages de chacune des trois technologies mises en œuvre et à combler leurs inconvénients par une notion de pondérations calculées à base de leurs précisions respectives. Ces pondérations, calculées au moment de la mesure, donnent une idée assez réaliste sur la précision en temps réel de ces technologies.

Pousser encore plus loin nos recherches dans ce sens de « temps réel » donnerait encore plus d'exactitude et précision aux résultats retournés par notre système et ce en adoptant les mesures suivantes:

- Utiliser un modèle de propagation radio qui tient compte des conditions réelles de l'environnement d'étude. En effet, une des hypothèses que nous avons faites est que le signal radio que nous étudions se propage dans un espace libre qui ne présente aucun obstacle, ce qui n'est pas le cas en réalité, surtout dans un contexte de localisation indoor.
- Ajouter une phase de calibrage dynamique au sous-système BLE en augmentant la fréquence de mise à jour de l'indice d'environnement ; cet indice sera estimé au moment de la prise de mesure.
- Considérer un modèle plus réaliste de la propagation de l'onde sonore dans l'espace environnant en tenant compte de son atténuation géométrique ainsi que les pertes

dues à la nature de l'air et l'environnement de propagation (murs, meubles, humidité, température, ...).

- Augmenter le nombre de lampes LiFi pour couvrir toutes les zones « aveugles » de la pièce d'étude.

# PUBLICATIONS PERSONNELLES

## *Conférences et workshops internationaux*

- **Adel Thaljaoui, Thierry Val, Nejah Nasri, Damien Brulin.** *BLE Localization using RSSI Measurements and iRingLA (regular paper).* Dans : *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2015), Seville, 17/03/2015-19/03/2015, IEEEExplore digital library*, (en ligne), mars 2015.
- **Adel Thaljaoui, Thierry Val, Damien Brulin, Nejah Nasri.** *Real Time Acoustic Localization of Elderly Persons in a Smart Home (regular paper).* Dans : *Performance Evaluation and Modeling in Wireless Networks (PEMWN 2014), Sousse, Tunisie, 03/11/2014-07/11/2014, IJERT*, (support électronique), novembre 2014.
- **Sami Mnasri, Adel Thaljaoui, Nejah Nasri, Thierry Val.** *A genetic algorithm-based approach to optimize the coverage and the localization in the wireless audiosensors networks (regular paper).* Dans : *IEEE International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC 2015), Hammamet, Tunisie, 13/05/2015-15/05/2015, IEEEExplore digital library*, (en ligne), mai 2015.

## *Soumission à un Journal*

- **Adel Thaljaoui, Thierry Val, Damien Brulin, Nejah Nasri** *Adopting Dilution of Precision for Indoor Localization*, soumis à ACM Transactions On Sensor Networks (TOSN 2017)

## *Conférences et workshops nationaux*

- **Adel Thaljaoui, Damien Brulin, Thierry Val, Nejah Nasri.** *Localisation d'une source sonore par un réseau de microphones (regular paper).* Dans : *Journées Nationales des Communications Terrestres (JNCT 2014), Toulouse-Blagnac, 22/05/2014-23/05/2014, Éditions Universitaires Européennes*, (support électronique), mai 2014.

# BIBLIOGRAPHIE

- ABI. (2015). *ABI Research Report* . Récupéré sur ABI: <https://www.abiresearch.com/market-research/product/1021327-wireless-connectivity-ics/>
- AFNOR. (2002). *AFNOR - Statistiques – Vocabulaire et symboles – Partie 1 : Probabilité et termes statistiques généraux*. .ISO TC 69/SC 1 N26.
- AKYILDIZ et al. (2002). *I.F.Akyildiz, W.Su , Y.Sankarasubramaniam, E.Cayirci, Wireless sensor networks: a survey, Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*.
- ALHMIEDAT et al. (2013). *Tareq Alhmiedat, Ghassan Samara, Amer O. Abu Salem, "An Indoor Fingerprinting Localization Approach for ZigBee Wireless Sensor Networks", European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X / 1450-202X Vol. 105 No 2 July, 2013, pp.190-202*.
- ALLOUI. (2004). *Nadia Aloui, Localisation sonore par retournement temporel*. École doctorale électronique, électrotechnique, automatique, traitement du signal (Grenoble).
- AMUNDSON et al. (2009). Isaac Amundson and Xenofon D. Koutsoukos, “A Survey on Localization for Mobile Wireless Sensor Networks”. *R. Fuller and X.D. Koutsoukos (Eds.): MELT 2009, LNCS 580, 235-254*.
- AMUNDSON et al. (2009). *Amundson I., Koutsoukos X. D., “A Survey on Localization for Mobile Wireless Sensor Networks”, International Workshop on Mobile Entity Localization (MELT)*.
- ARGENTIERI. (2006). Sylvain Argentieri, Conception d’un capteur sonore pour la localisation de source en robotique mobile. *Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III*.
- BAHL et al. (2000). *P. Bahl and V.N. Padmanabhan. Radar : an in-building rf-based user location and tracking system. In The 19th Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom’00)*.

- BAIS et al. (2014). *A. Bais, H. Kiwan, Y. Morgan, On Optimal Placement of Short Range Base Stations for Indoor Position Estimation*. Journal of Applied Research and Technology, Volume 12, Issue 5, Pages 886-897.
- BENBADIS et al. (2005). *F. Benbadis, T. Friedman, M. Dias de Amorim, and S. Fdida. GPS-Free-Positioning System for Sensor Networks*. In *Proceedings of WOCN Conference*.
- BENNY et al. (2005). *Benny P L Lo and Guang Zhong Yang, "Key Technical Challenges and Current Implementations of Body Sensor networks", 2nd International Workshop on Body Sensor Networks*.
- BERGER. (2009). *Robert Berger, "Introduction to Wireless Sensor Networks", NI Technical Symposium*,  
[http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/ni\\_introduction\\_wireless\\_sensor\\_networks.pdf](http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/ni_introduction_wireless_sensor_networks.pdf).
- BESADA et al. (2007). *J.A. Besada, A.M. Bernardos, P. Tarrio, and J.R. Casar. Analysis of tracking methods for wireless indoor localization*. In *IEEE 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing, ISWPC '07*.
- BLANCHART et al. (2009). *P. Blanchart, Liyun He, and F. Le Gland. Information fusion for indoor localization*. In *IEEE 12th International Conference on Information Fusion, FUSION '09*.
- BLAURET. (1983). *Jens Blauert, Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. The MIT Press., Cambridge, Massachusetts.
- BODHI. (2005). *Nissanka Bodhi Priyantha. The Cricket Indoor Location System*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- BRABANT. (2003). *Michel BRABANT, "Maitriser la topographie, des observations au plan"*. Groupe Eyrolles, 2003.
- BULUSU et al. (2000). *N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, "GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices", IEEE Personal Communications Magazine, 7(5):28-34*.
- CALLAWAY. (2004). *Edgar H. Callaway, "Wireless Sensor networks. Architecture and Protocols", Auebach Publications*.
- CARTER, G. N. (1973). The smoothed coherence transform. *Proc. IEEE (Lett.)* 61, 1497-1498.

- CASTANO et al. (2003). F. J. Gonzalez-Castano, J. Garcia-Reinoso, Survivable Bluetooth Location Networks. *IEEE International Conference on Communication ICC 03*.
- CHAN et al. (2006). Li-wei Chan, Ji-rung Chiang, Yi-chao Chen, Chia-nan Ke, Jane Hsu, Hao-hua Chu, "Collaborative Localization: Enhancing WiFi-Based Position Estimation with Neighborhood Links in Clusters ". *Lecture Notes in Computer Science*, 50-66.
- CHEN et al. (2010). *Chen, Min; Gonzalez, Sergio and Vasilakos, Athanasios and Cao, Huasong and Leung, Victor. "Body Area Networks: A Survey". Mobile Networks and Applications (MONET) (Springer Netherlands)*.
- CHEN, J. B. (2006). The SCOT Weighted Adaptive Time Delay Estimation Algorithm Based on Minimum Dispersion Criterion. *Journal of EURASIP on Applied Signal Processing*(article ID 26503).
- CIMBALA. (2011). *John M. Cimbala, Outliers*. Penn State University .
- CLAUSEN et al. (2009). *Thomas Clausen, Ulrich Herberg, "Comparative Study of RPL-Enabled Optimized Broadcast in Wireless Sensor Networks", .*
- COSTA et al. (2005). *COSTA J. A., PATWARI N. et O.HERO A., « Distributed multidimensional scaling with adaptive weighting for node localization in sensor networks, », IEEE/ACM Trans Sensor Networks*.
- DALCE. (2013). *DALCE Réjane, "Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de capteurs sans fil en intérieur", Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse), SYSTEMES*.
- DALCE et al. (2011). *R. Dalce, T. Val, A. Van den Bossche. "Comparison of Indoor Localization Systems based on Wireless Communications." Wireless Engineering and Technology, Scientific Research Publishing, Irvine - USA, vol. 2, no. 4,*
- DALY. (1993). *Daly, P. " Navstar GPS and GLONASS: global satellite navigation system". Electronics & Communication Engineering Journal*.
- DATTA et al. (2006). *S. Datta, C. Klinowski, M. Rudafshani, et S. Khaleque, Distributed localization in static and mobile sensor networks. 2nd IEEE International conference on wireless and mobile computing, networking and communications (WiMob)*.



- DAVENPORT et al. (2009). *M. Davenport, Budhaditya Deb, and Fergus J. Ross. Wireless propagation and coexistence of medical body sensor networks for ambulatory patient monitoring. In 6th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, IEEE Computer Society.*
- DELIGINNIAS et al. (2009). Nikos Deligiannis , Spiros Louvros, "Hybrid TOA–AOA Location Positioning Techniques in GSM Networks". *Wireless Pers Commun.*
- DEMPSEY. (2003). "Indoor Positioning Systems in Healthcare". Radianse Inc.White Paper.
- DEMPSTER. (2006). A.G. Dempster, Dilution of precision in angle-of-arrival positioning systems. *Electronics Letters* , 291- 292.
- DESSALES. (2006). Denis Dessales, "Conception d'un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation", Thèse de doctorat, l'Université de Poitiers, Sciences et Ingénierie pour l'Information .
- DOHERTY et al. (2001). L. Doherty, K. S. J. Pister, and L. El Ghaoui, "Convex position estimation in wireless sensor networks". In *Proceedings of the IEEE INFOCOM, vol.3, Alaska.*
- DONOVAN et al. (2009). Donovan, T., Donoghue, J., Sreenan, C., Reilly, P., Sammon, D. and Connor, K.: *A Context Aware Wireless Body Area Network (BAN), In proceedings of the Pervasive Health Conference.*
- DUGAS. (2005). Christophe Dugas, "WAVENIS: Field Proven Ultra Low Power Wireless Solutions for WSN", *Builconn/M2M, Amsterdam.*
- EVENNOU. (2007). Frédéric Evennou. *Techniques et technologies de localisation avancées pour terminaux mobiles dans les environnements indoor. PhD thesis, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I.*
- FAHS. (2009). Walid Fahs, "Diffusion d'informations partagées entre mobiles coopérants évoluant sous une même cellule d'un réseau sans fil avec infrastructure », thèse, Université de Clément-Ferrand.

- FANG et al. (2008). *S. H. Fang, T. N. Lin, and K.-C. Lee, "A novel algorithm for multipath fingerprinting in indoor WLAN environments," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, no. 9, pp. 3579–3588.*
- FERNANDEZ et al. (2007). *Tiago M. Fernandez, Javier Rodas, Carlos J. Escudero, Daniel I. Iglesia: "Bluetooth Sensor Network Positioning System with Dynamic Calibration". A Coruna, Spain: IEEE ISWCS07.*
- Figel et al. (1969). *W.G Figel, N.H Shepherd et W.F Trammel: "Vehicle location by signal attenuation method". IEEE transactions on vehicular technology, 18: 245-251.*
- FRESNEL et al. (1870). *Henri de SENARMONT, Émile VERDET et Léonor FRESNEL, "Œuvres complètes d'Augustin Fresnel". Paris : Imprimerie impériale, trois tomes (1866, 1868, 1870).*
- FRIIS. (1946). *H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," Proc. IRE 34, 254-256. .*
- FRITSHE et al. (2009). *C. Fritsche, A. Klein, "On the Performance of Hybrid GPS/GSM Mobile Terminal Tracking". IEEE ICC Workshops, 1- 5.*
- GALILEO.* (s.d.). Consulté le Octobre 12, 2016, sur Comparaison entre le GPS et Galileo: <http://galileogps.free.fr/comparaison.htm>
- GAO et al. (2008). *T. Gao, C. Pesto, L. Selavo, Y. Chen, J. G. Ko, J. H. Lim, A. Terzis, A. Watt, J. Jeng, B. rong Chen, K. Lorincz, and M. Welsh, "Wireless medical sensor networks in emergency response : Implementation and pilot results",Technologies for Homeland Security.*
- GENG et al. (2013). *X. Geng, Y. Wang, H. Feng, and Z. Chen, Hybrid Radio-map for Noise Tolerant Wireless Indoor Localization. arXiv.org, vol. cs.NI.*
- GEZICI. (2007). *Sinan Gezici - "A Survey on Wireless Position Estimation", Wireless Personal Communications, Volume 44, pp. 263 - 282, No. 3.*
- GLONASS. (2010 ). *GLONASS constellation status.* Federal Space Agency GLONASS.
- GLYNN. (2016, Avril). *Lee Glynn, The Different Types Of Microphones Explained.* <http://www.dawsons.co.uk/blog/the-different-types-of-microphones-explained>

- GOGOLAK et al. (2011). L. Gogolak, S. Pletl, and D. Kukolj, "Indoor fingerprint localization in WSN environment based on neural network," in *Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, pp. 293–296, Subotica, Serbia.
- GRUBBS. (1969). F. E. Grubbs, « Procedures for detecting outlying observations in samples ». *Technometrics*, vol. 11, 1–21.
- GU et al. (2012). Hung-Yan Gu, Shan-Siang Yang, A sound-source localization system using three-microphone array and crosspower spectrum phase,. *Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), 2012 International Conference on (Volume:5)* .
- GUI. (2013). Linqing GUI, "Amélioration de la Localisation dans les Réseaux de Capteurs sans Fil par Méthodes Range-free", thèse de doctorat, Université de Toulouse, Ecole doctorales Systèmes (EDSYS), IRIT.
- GUY. (2005). Bernard GUY, "Qu'est-ce que la vérité? Introduction à la philosophie des sciences de Karl Popper". Ecole Nat. Sup. des Mines de Saint-Etienne.
- HARTER et al. (1994). A. Harter and A. Hopper, "A Distributed Location System for the Active Office", *IEEE Network*, .
- HARTER et al. (1999). A. Harter et al., "The Anatomy of a Context-Aware Application", *Proc. 5th Ann. Int'l Conf. Mobile Computing and Networking (Mobicom 99)*, ACM Press, New York.
- HASHEMI. (1993). H. Hashemi. *The indoor radio propagation channel. Proceedings of the IEEE*, 81(7) :943–968.
- HE et al. (2003). HE T., HUANG C., BLUM B. M. et al., « Range-free localization schemes for large scale sensor networks », *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*.
- HIGHTOWER et al. (2000, 02 02). J. Hightower, G. Boriello, and R. Want. SpotOn : An indoor 3D location sensing technology based on RF Signal Strength. *Technical Report UW-CSE* , University of Washington.
- HIGHTOWER et al. (2001). Hightower J, Borriello G. *A Survey and Taxonomy of Location Systems for Ubiquitous Computing*. Technical Report UW-CSE 01-08-03.

- HOLGER et al. (2006). *Holger K., Willing A., "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks, Wiley.*
- HSIEH et al. (2002). *H.-Y. Hsieh et R. Sivakumar. « IEEE 802.11 over Multi-hop Wireless Networks Problems and New Perspectives ».*
- HUANG et al. (2009). *R. Huang and G. V. Zaruba. "Monte Carlo localization of wireless sensor networks with a single mobile beacon". Wireless Networks, 15(8):978-990.*
- HUB. (2013, Décembre 9). *Microphone Buying Guide.* Récupéré sur THE HUB: <http://thehub.musiciansfriend.com/audio-recording-buying-guides/buying-guide-microphones>
- IEEE-802.15. (2006). *IEEE 802.15, "Part 15.4 : Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs)," ANSI/IEEE, Standard 802.15.4 R2006.*
- INADA et al. (1992). *H. Inada, H. Horio, Y. Sekita, K. Isikawa; K. Yoshida "A study on a home care support information system". the 7th world congress on Medical Informatics, 349-353.*
- INGELREST et al. (2008). *Guillermo Barrenetxea, François Ingelrest, Yue M. Lu, and Martin Vetterli. Assessing the challenges of environmental signal processing through the sensorscope project. In Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Las Vegas, USA.*
- INGELREST et al. (2010). *François Ingelrest, Guillermo Barrenetxea, Gunnar Schaefer, Martin Vetterli, Olivier Couach, and Marc Parlange. Sensorscope : Application-specific sensor network for environmental monitoring. ACM Transactions On Sensor Networking.*
- IRBMS. (2017, Aout 17). *Evaluation de la vitesse de déplacement chez une personne sédentaire.* Récupéré sur irbms: <https://www.irbms.com/vitesse-de-marche-et-longevite/>
- ISO. (2013). [www.iso.org/iso/fr/](http://www.iso.org/iso/fr/)- *ISO (International Standardization Organization).*
- JACQUET. (2007). *Christophe Jacquet, "IRIS : identification d'utilisateurs par badges infrarouges", Proceedings of IHM 2007, pp. 287-290. ACM Press.*
- JEULAND. (2005). *François-Xavier JEULAND, "La maison communicante". Groupe Eyrolle.*

- JUBIN et al. (1987). *J. Jubin, J. Tornow. "The DARPA Packet Radio Network Protocols", in Proceedings of the IEEE volume 75.*
- KAFRAWY et al. (2010). K. El-Kafrawy, M. Youssef, A. El-Keyi, and A. Naguib, Propagation Modeling for Accurate Indoor WLAN RSS-Based Localization. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Fall)*, 1-5.
- KAMINSKY. (2007). *A. Kaminsky, Trilateration.* Lecture note, Rochester Institute of Technology.
- KAMMOUN et al. (2014). *Soufien Kammoun, Jean-Baptiste Pothin, Jean-Christophe Cousin, Amélioration des performances de localisation en intérieur par optimisation du placement des balises.* Télécom ParisTech,.
- KAPLAN. (1996). *Kaplan ED: Understanding GPS: Principles and Applications, Artech House Boston, London.*
- KARL et al. (2005). *Holger Karl and Andreas Willig, "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks", John Wiley & Sons .*
- KHAN. (2011). *Safdar Abbas KHAN, "Localisation et détection d'erreurs dans les réseaux de capteurs sans fil", Thèse de doctorat, Université Paris-EST, Ecole Doctorale « Mathématiques et les sciences et techniques de l'information et de la communication » .*
- KNAPP et al. (1976). C. Knapp and G. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay,". *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 24, no. 4, 320–327.*
- KNAPP, C. H. (1976). The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing ASSP-24, 4, 320-327.*
- KREDO et al. (2007). K.B. Kredo and B.P. Mohapatra, "Medium access control in wireless sensor networks". *Computer network* , 961-994.
- KRISHNAMACHARI. (2006). *Krishnamachari B., "Networking Wireless Sensors", Cambridge University Press.*
- KRISHNAMURTHY et al. (2005). *P. Krishnamurthy & S. V. Krishnamurthy. Ad hoc network technologies and protocols, Chapitre Use of smart antennas in adhoc networks, pages 197-228. Springer.*

- KRISHNAN. (2004). *P. Krishnan, A. S. Krishnakumar, Wen hua Ju, Colin Mallows, and Sachin Ganu. A system for lease : Location estimation assisted by stationery emitters for indoor rf wireless networks. In 23rd Conference of the IEEE Computer and Communications, Chine.*
- KUANG et al. (2007). *Xing-hong KUANG, Hui-he SHAO, "Distributed localization using mobile beacons in wireless sensor networks", The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, Volume 14, Issue 4.*
- KUSHWAHA et al. (2005). *M. Kushwaha, K. Molnar, J. Sallai, P. Volgyesi, M. Maroti, A. Ledeczki, "Sensor Node Localization Using Mobile Acoustic Beacons". In Proc. of IEEE MASS.*
- LAARAIEDH. (2010). *Mohamed Laaraiedh, "Contributions on Hybrid Localization Techniques For Heterogeneous Wireless Networks". Thèse à l'Université de Rennes 1, Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes.*
- LANGENDOEN et al. (2003). *Langendoen K and Reijers N, Distributed localization in wireless sensor networks : a quantitative comparison, Computer Networks.*
- LANGENDOEN et al. (2003). *LANGENDOEN K. et REIJERS N., « Distributed localization in wireless sensor networks : a quantitative comparison. », Computer Networks, vol. 43, no 4.*
- LEE. (1975). *H. B. Lee, A Novel Procedure for Assessing the Accuracy of Hyperbolic Multilateration Systems. IEEE Transaction on Aerospace and Electronis Systems vol. AES-11, no. 1, 2-15.*
- LEGG. (2004). *Gary Legg, "ZigBee: Wireless Technology for Low-Power Sensor Networks".*
- LEONARD. (1999). *Charlie Leonard, "Introduction to NAVSTAR GPS", présentation.*
- LEWIS. (2004). *F.L. Lewis, "Wireless Sensor Networks", Smart Environments:Technologies, Protocols, and Applications ed. D.J. Cook and S.K. Das, John Wiley, New York.*
- LI et al. (2011). *Xu Li, Nathalie Mitton, Isabelle Simplot-Ryl, and David Simplot-Ryl, "Mobile-Beacon Assisted Sensor Localization with Dynamic Beacon Mobility Scheduling", 8th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE MASS 2011).*

- LIU et al. (2007). C. Liu, T. Scott, K. Wu, et D. Hoffman, *Range-free sensor localisation with ring overlapping based on comparison of received signal strength indicator. International Journal of Sensor Networks 2007 - Vol. 2, No.5/6 pp. 399 - 413.*
- LIU et al. (2009). Shaoshuai Liu, Haiyong Luo, and Shihong Zou. *A low-cost and accurate indoor localization algorithm using label propagation based semi-supervised learning. In IEEE 5th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, MSN'09.*
- MA et al. (2005). J. Ma, Y. Zhu, Q. Chen, and L.M. Ni. *Quality-based anchor-free localization with refinement in sensor networks. In International Conference on Computer Networks and Mobile Computing.*
- MAHALANOBIS. (1936). P. C. Mahalanobis, « On the generalised distance in statistics ». *the National Institute of Sciences of India, vol. 2, no 1, 49–55 .*
- MAINETTI et al. (2014). Luca Mainetti, Luigi Patrono, Ilaria Sergi, "A Survey on Indoor Positioning Systems". Lecce, ITALY: Department of Innovation Engineering, University of Salento.
- MAKHLOUL. (2008). Abdallah Makhoul, "Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données", thèse de doctorat à l'Université de Franche-Comté, Laboratoire d'Informatique de l'Université de Franche-Comté (LIFC), l'École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et .
- MALAN et al. (2004). D. Malan, T. Fulford-jones, M. Welsh, and S. Moulton, "Codeblue : An ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care," in *In International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks.*
- MANDAL et al. (2005). Atri Mandal, Cristina V. Lopes, Tony Givargis, Amir Haghghat, Raja Jurdak and Pierre Baldi, "Beep: 3D Indoor Positioning Using Audible Sound". *IEEE consumer communication and network conference.*
- MATHIEU et al. (2004). Bernard Mathieu, Roland Barillet, Jean-François Bou, René Oosterlinck, Roger Pagny, "Localisation par satellite :GPS face à Galileo". *Rencontre du Café des techniques.*
- MAUES et al. (2010). Rodrigo de A. Maues, Javier J. M. Diaz, Eduardo F. Nakamura, Bluepass: An indoor Bluetooth-based localization system for mobile applications. *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) .*

- MICHOT. (2004). *MICHOT Julien, Les différents codages d'une information binaire en Informatique Industrielle*. Institut Universitaire de Technologie de Tours.
- MOHINDER et al. (2001). *Mohinder S.Gewal, Lawrence R.Weill and Angus P.Andrews. Global Positioning Systems*.New-York, USA: Inertial Navigation, and Integration. John Wiley and Sons Inc. Publisher.
- MONASSIER. (2009). *Patrick MONASSIER, "Les Couches ISO - Le modèle OSI - Le modèle à 7 couches", cours à l'Université Lyon 1 France*.
- NASRI et al. (2015). Sami Mnasri, Adel Thaljaoui, Nejah Nasri, Thierry Val. A genetic algorithm-based approach to optimize the coverage and the localization in the wireless audiosensors networks . *IEEE International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC 2015), Hammamet, Tunisie*.
- NICULESCU et al. (2003). *Niculescu D and Nath B, Ad Hoc Positioning System (APS) using AoA, IEEE INFOCOM '03*.
- NIMA. (1997). *NIMA Technical Report TR8350.2, "Department of Defense World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships With Local Geodetic Systems", Third Edition*.
- NOURY et al. (1992). N. Noury, P. Pilichowski, A telematic system tool for home health care. *14th Annual Intern. conference of the IEEE-EMBS, 1175-1177* .
- OBAYASHI. (1998). *Shuichi Obayashi, "A Body-Shadowing Model for Indoor Radio Communication Environments"*.
- OLIVEIRA et al. (2013). *Luís M. L. Oliveira , Joel J. P. C. Rodrigues , Amaro F. de Sousa and Jaime Lloret, "A Network Access Control Framework for 6LoWPAN Networks", sensors ISSN 1424-8220, www.mdpi.com/journal/sensors*.
- PARKINSON. (1996). *B. Parkinson et al, 1996. Global positioning system : Theory and application. Progress in Astronomics and Aeronotics volume I*.
- PATWARI et al. (2003). *Neal Patwari and Alfred O. Hero, III. Using proximity and quantized RSS for sensor localization in wireless networks. In 2nd ACM international conference on Wireless sensor networks and applications (WSNA), pages 20–29, San Diego, CA, USA*.



- PEIRCE. (1852). Benjamin Peirce, "Criterion for the Rejection of Doubtful Observations" .  
*Astronomical Journal II 45.*
- PRIYANTHA et al. (2000). Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan,  
"The Cricket Location-Support System", *6th ACM International Conference on Mobile  
Computing and Networking (ACM MOBICOM), Boston, MA.*
- PRIYANTHA et al. (2003). N. B. Priyantha, H. Balakrishnan, E. Demaine, and S. Teller Anchor-  
free distributed localization in sensor networks. *Technical Report TR-892, MIT LCS.*
- RAGHUNATHAN et al. (2002). Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park, and Mani B.  
Srivastava. *Energy-aware wireless microsensor networks. IEEE Signal Processing  
Magazine.*
- RAMADURAI et al. (2003). V. Ramadurai and M. L. Sichitiu. *Localization in wireless sensor  
networks: A probabilistic approach. In Proceedings of the 2003 International Conference  
on Wireless Networks (ICWN2003), Las Vegas, NV.*
- RAO and al. (1995). K. Deergha Rao and J. Lakshmi Narayana. An Approach for a Faster GPS  
Tracking Extended Kalman Filter. *Journal of the Institute of Navigation.*
- RAPPAPORT. (1996). T. S. Rappaport, "Wireless communications, principles and practice",  
*Prentice Hal.*
- REYERO et al. (2008). Reyero Lionel, G.Y. Delisle, "A Pervasive Indoor-Outdoor Positioning  
System". *Journal of Networks, vol. 3, 70-83.*
- RONG et al. (2006). P Rong and M.L. Sichitiu. *Angle of arrival localization for wireless sensor  
networks. In 3rd Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and  
Ad Hoc Communications and Networks (SECON), volume 1, pages 374–382, Reston,  
USA.*
- ROTH, P. (1971). Effective measurements using digital signal analysis. *IEEE Spectrum 8, 62-70.*
- SAIRAM et al. (2002). K. Sairam, N. Gunasekaran, S. Redd, "Bluetooth in wireless  
communication", *IEEE Communications Magazine, Vol. 40, pp. 90–96.*
- SALEM. (2014). Akram SALEM, *Contributions à des systèmes de positionnement combinés de  
précision sub-métrique pour des applications de réalité augmentée intérieures et  
extérieures.* Ecole Doctorale SPIM – Spécialité Informatique.

SAVARESE et al. (2002). C. Savarese et J. Rabaey, *Robust positioning algorithms for distributed ad-hoc sensors networks. in USENIX technical annual conference.*

SAVVIDES et al. (2001). SAVVIDES A, HAN C.-C. et SRIVASTAVA M., « *Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors* », In *7th ACM Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (Mobicom)*,.

SICHITIU et al. (2003). Mihail L. Sichitiu and Vaidyanathan Ramadurai, "*Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon*", Center for Advanced Computing and Communications (CACC), Raleigh, NC, Tech. Rep. TR-03/06.

SICHITIU et al. (2004). Mihail L. Sichitiu and Vaidyanathan Ramadurai, "*Localization of Wireless Sensor Networks with a Mobile Beacon*" in *Proceedings of the First IEEE Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2004)*, (Fort Lauderdale, FL).

SIMIC et al. (2002). S. Simic and S. Sastry, "*Distributed localization in wireless ad hoc networks*", Technical Report UCB/ERL M02/26, UC Berkeley.

SKOOG et al. (2004). Skoog, West, Holler et Crouch. *Fundamentals of Analytical Chemistry, USA, ed. Brooks/Cole.*

SRINIVASAN et al. (2006). K.Srinivan and P.Levis, "*RSSI is Under Appreciated*", in *Proceeding of the 3rd IEEE Workshop on Embedded Networks.*

STEENKESTE et al. (2001). F. Steenkeste, H. Bocquet, M. Chan, E. Campo, "La mise en place d'une technologie pour observer le comportement nocturne des personnes âgées en institution », *Innovation and Technology in Biology and Medicine . revue of Biomedical Engineering (ITBMRBM)*.

SUGANO et al. (2006). M. Sugano, T. Kawazoe, Y. Ohta, and M. Murata. *Indoor localization system using RSSI measurement of wireless sensor network based on zigbee standard. In Conference on Optical Communication Systems and Networks, Banff, Canada.*

SURESO et al. (2011). D. J. Suroso, P. Cherntanomwong, P. Sooraksa, and J. Takada, "*Fingerprint-based technique for indoor localization in wireless sensor networks using Fuzzy C-Means clustering algorithm*," *Processing and Commun International Symposium on Intelligent Signal.*

- TANIUCHI et al. (2015). Daisuke Taniuchi ; Xiaopeng Liu ; Daisuke Nakai ; Takuya Maekawa, "Spring Model Based Collaborative Indoor Position Estimation With Neighbor Mobile Devices". *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing* .
- TARRIO et al. (2011). P. Tarrío, M. Cesana, M. Tagliasacchi, A. Redondi, L. Borsani, and J. R. Casar, "An energy-efficient strategy for combined RSS-PDR indoor localization". *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), IEEE International Conference*, 619-624.
- TED. (s.d.). *www.ted.com*. Consulté le 10 12, 2016, sur Harald Haas veut transmettre des données sans fil depuis chaque ampoule électrique: [https://www.ted.com/talks/harald\\_haas\\_wireless\\_data\\_from\\_every\\_light\\_bulb/transcript?language=fr](https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb/transcript?language=fr)
- TERRANCE et al. (2009). *M. M. Terrance J. Dishongh, Wireless Sensor Networks for Healthcare Applications, 1st ed. Artech House.*
- THALJAOUI. (2015). Adel Thaljaoui, Thierry Val, Nejah Nasri, Damien Brulin. BLE Localization using RSSI Measurements and iRingLA . *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2015), Seville, 17/03/2015-19/03/2015.*
- THALJAOUI et al. (2014). Adel Thaljaoui, Damien Brulin, Thierry Val, Nejah Nasri. Localisation d'une source sonore par un réseau de microphones. *Journées Nationales des Communications Terrestres (JNCT 2014), Toulouse-Blagnac.*
- THALJAOUI et al.bis. (2014). Adel Thaljaoui, Thierry Val, Damien Brulin, Nejah Nasri. Real Time Acoustic Localization of Elderly Persons in a Smart Home. *Performance Evaluation and Modeling in Wireless Networks (PEMWN 2014), Sousse, Tunisie.*
- THOMPSON. (1985). R. Thompson, A note on restricted maximum likelihood estimation with an alternative outlier model. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, 53–55.
- TIANSHUANG, Q. H. (1996). An Eckart-weighted adaptive time delay estimation method . *IEEE Transactions on Signal Processing*, 44(9), 2332-2335.
- TSENG. (1998). Yu-Chee Tseng, "Active Bat: A 3D Location Device", presentation.
- TSUI. (2005). *James Bao-Yen Tsui: Fundamentals of Global Positioning System receivers - a software approach. Wiley.*

- ULLAH et al. (2010). *Sana Ullah, Henry Higgins, Bart Braem, Benoit Latre, Chris Blondia, Ingrid Moerman, Shahnaz Saleem, Ziaur Rahman and Kyung Sup Kwak, "A Comprehensive Survey of Wireless Body Area Networks: On PHY, MAC, and Network Layers Solutions", Springer.*
- USDI. (1997). *U.S. Department of the Interior, National Park Service, "How to Complete the National Register Registration Form bulletin", on ligne <http://www.cr.nps.gov/nr/publications/bulletins/nrb16a/index.htm>.*
- WADAA et al. (2004). *A. Wadaa, S. Olariu, L. Wilson, M. Eltoweissy, and K. Jones. On providing anonymity in wireless sensor networks. In In Proceedings of the 10th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS-2004).*
- WANT et al. (1992). *Roy Want, Andy Hopper, Veronica Falcão and Jonathan Gibbons, "The Active Badge Location System", ACM Transactions on Information Systems.*
- WATTS. (2009). *Watts, Geof "John Wild: Inventor of diagnostic ultrasound in medicine". BMJ 339.*
- WELLS. (2005). *P. McDermott-Wells, "What is Bluetooth? ", IEEE Potentials, Vol. 23, pp. 33–35.*
- WERNER-ALLEN et al. (2006). *G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Ruiz, O. Marcillo, J. Johnson, J. Lees, and M. Welsh, "Deploying a wireless sensor network on an active volcano," Internet Computing, IEEE, vol. 10.*
- WILD et al. (1952). *WILD, JJ.; REID, JM. "Application of echo-ranging techniques to the determination of structure of biological tissues.". Science 115 (2983): 226–30.*
- YAMAGUCHI et al. (1998). *A. Yamaguchi, M. Ogawa, T. Tamura, T. Togawa, "Monitoring behaviour in the home using positioning sensors". 20th IEEE conference on engineering in Medicine and Biology, 1977-1979.*
- YOST et al. (1991). *W. A. Yost and R. H. Dye, "Properties of Sound Localization by Humans", Neurobiology of Hearing: The Central Auditory System, Raven Press, Ltd, New York, 389-410.*
- YOUNIS et al. (2004). *M. Younis and T. Nadeem. "Energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks", Technical report, university of Mryland baltimre County, USA,.*

- YOUSSEF et al. (2005). *A. Youssef, A. Agrawala, and M. Younis. Accurate anchor-free node localization in wireless sensor networks. In 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC).*
- YUCE. (2010). *M. R. Yuce. "Implementation of wireless body area networks for healthcare systems". Sensors and Actuators A: Physical 162.*
- YUCE et al. (2008). *Mehmet R. Yuce, Peng Choong Ng, and Jamil Y. Khan. Monitoring of physiological parameters from multiple patients using wireless sensor network. J. Medical Systems.*
- ZHANG et al. (2006). *Minghua Zhang, Shengsheng Zhang, Jian Cao, and Haibin Mei. A novel indoor localization method based on received signal strength using discrete fourier transform. In First International Conference on Communications and Networking in China. ChinaCom.*
- ZHANG et al. (2012). *Ting Zhang, Jingsha He and Hong Yu, "Secure Localization in Wireless Sensor Networks with Mobile Beacons", International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2012 Article ID 732381.*
- ZIRARI et al. (2009). *Soumaya ZIRARI, Philippe CANALDA and François SPIES, Geometric and Signal Strength Dilution of Precision (DoP) WiFi. IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 3.*
- Zonith, 2016. (s.d.). Consulté le 10 12, 2016, sur IPS – INDOOR POSITIONING SYSTEM: <http://zonith.com/products/ips/>

## RESUME

Durant la dernière décennie, les personnes âgées vivant seules sont de plus en plus nombreuses. Ainsi, afin de leur assurer une assistance à domicile continue, la notion de "maison intelligente" est apparue. Notre travail consiste à combiner trois technologies (Bluetooth Low Energy, audio et LiFi) afin de proposer un système hybride de localisation d'une personne âgée dans une maison intelligente, qui soit efficace et précis. Le principe d'hybridation de ces trois sous-systèmes repose sur la fusion de leurs résultats respectifs via la proposition de trois nouvelles métriques « DOP-Like » permettant d'évaluer le taux de « précision » et « d'exactitude » du résultat de chaque sous-système. Cette évaluation sert à constituer une pondération des résultats intermédiaires afin de calculer la position finale de la cible à localiser. Grâce à l'introduction de ces indicateurs, l'erreur de localisation de notre système est passée de 0,5 m à 0,2 m en moyenne.

## ABSTRACT

Over the past decade, more and more elderly people are choosing to live alone. Therefore, in order to provide them with continuous home assistance, the notion of "intelligent home" has emerged. Our aim is to combine three technologies (Bluetooth Low Energy, Audio and LiFi) to provide an efficient and accurate hybrid indoor localization system that locates an elderly person inside a smart home. The principle of hybridization of these three subsystems is based on the combination of their respective results by proposing three new DOP-Like metrics to evaluate "precision" and "accuracy" of the result of each subsystem. This evaluation serves to constitute a weighting of the intermediate results in order to calculate the final position of the target to be localized. Thanks to the introduction of these indicators, the localization error of our system decreased from an average of 0.5 m to 0.2 m.