

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA
كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie



MEMOIRE DE MASTER

En Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications.

Présenté par

BOUCHEKOUK Samah

&

OUENNOUGHI Mohamed Imed eddine

RT24

Systeme de localisation intérieur

Encadré par : Pr BENSEBTI Messaoud

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Nos sincères remerciements vont à notre encadrant, Pr BENSEBTI Messaoud, pour ses conseils, son accompagnement et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département d'Electronique pour la qualité de l'enseignement reçu durant notre parcours.

Enfin, nous exprimons toute notre reconnaissance à nos familles et à nos amis pour leur soutien constant et leur encouragement.

Dédicaces

À la mémoire de mon père, mon modèle et mon guide.

Tu as toujours cru en moi, tu m'as appris à persévérer, et à rêver grand. C'est ton exemple de force, d'intégrité et de courage qui m'accompagne chaque jour.

A ma mère, qui s'est sacrifiée pour l'avenir de ses six enfants et qui nous a transmis les valeurs et les principes qui font de nous les personnes que nous sommes aujourd'hui.

A mes frères et sœurs, pour vos encouragements, vos conseils, et votre présence à chaque étape de ce parcours.

A mes amis.

Je vous dédie ce travail, symbole de la fin de mon cursus universitaire.

Samah.

Dédicaces

Ce mémoire est le fruit de nombreuses années d'efforts, de persévérance et surtout, d'un soutien inestimable.

Je dédie ce travail à mes parents et mon frère, piliers de ma vie. Vos sacrifices, votre encouragement constant et votre présence à mes côtés depuis mes premiers pas ont rendu ce voyage possible. Votre amour est ma plus grande force, votre exemple, ma source d'inspiration.

À toutes les personnes qui ont croisé ma route et m'ont apporté leur aide, leurs conseils et leur amitié, je vous exprime ma profonde reconnaissance, votre soutien a été précieux.

Imed.

Résumé

Ce mémoire présente la conception et l'évaluation d'un Système de Positionnement Intérieur (IPS) basé sur Wi-Fi. Le système utilise l'intensité du signal reçu (RSSI) pour estimer les distances et la trilatération pour déterminer la position. Les défis de la localisation en intérieur, notamment les variations du signal, sont abordés par l'application de filtres (Médian et Moyenne Mobile Pondérée). L'importance de la calibration du modèle de perte de trajet et de l'optimisation du positionnement des balises est démontrée expérimentalement. Les résultats montrent qu'une configuration et un traitement du signal approprié permettent d'obtenir une localisation intérieure précise avec du matériel Wi-Fi à faible coût.

Summary

This thesis presents the design and evaluation of a Wi-Fi-based Indoor Positioning System (IPS). The system uses Received Signal Strength Indicator (RSSI) to estimate distances and trilateration to determine position. Indoor localization challenges, particularly signal fluctuations, are addressed through the application of filtering techniques (Median and Weighted Moving Average). The importance of calibrating the path loss model and optimizing beacon placement is demonstrated experimentally. Results show that accurate indoor localization can be achieved using proper configuration and signal processing with low-cost Wi-Fi hardware.

ملخص

تقدم هذه الأطروحة تصميم وتقييم نظام تحديد المواقع الداخلي القائم على الواي فاي. يستخدم النظام مؤشر قوة الإشارة المستلمة (RSSI) لتقدير المسافات والتثليث لتحديد الموقع. يتم معالجة تحديات تحديد المواقع الداخلية، خاصة تذبذبات الإشارة، من خلال تطبيق تقنيات التصفية (المتوسط الوسيط والمتوسط المتحرك الموزون). يتم إثبات أهمية معايرة نموذج فقدان المسار وتحسين موضع الإشارة تجريبياً. تظهر النتائج أنه يمكن تحقيق تحديد مواقع داخلي دقيق باستخدام إعداد صحيح ومعالجة إشارة مع أجهزة واي فاي منخفضة التكلفة.

SOMMAIRE

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

Chapitre I : Généralités sur le système de positionnement intérieur

Introduction Générale	1
1. Introduction	2
2. Historique	3
3. Définition du Système de Positionnement Intérieur	5
3.1 Principes du Positionnement Intérieur	6
4. Domaines d'Application	7
5. Composants du Système de Positionnement Intérieur	9
5.1 Balises fixes (ancres) :	9
5.2 Tags mobiles :	10
5.3 Modules de communication :	11
5.4 Application mobile (ou système de visualisation) :	11
5.5 Serveur de localisation (facultatif mais souvent présent) :	12
6. Fonctionnement du Système	12
7. Avantages et Inconvénients	13
7.1 Avantages	13
7.2 Inconvénients	14
8. Conclusion	14
Chapitre II: État de l'Art sur le Positionnement Intérieur	
1. Introduction au Positionnement Intérieur	16
2. Fondamentaux et Défis du RSSI	16
2.1 Définition du RSSI	16
2.2 Défis Inhérents au RSSI	17
3. Rôle et Avantages des ESP32-C3	18
3.1 Présentation des ESP32-C3	18
3.2 Représentation des broches et interfaces de l'ESP32-C3	21
4. Stratégies d'Optimisation du RSSI pour le Positionnement	21

4.1 Calibration Environnementale : Adaptation au Contexte.....	21
4.2 Modèle de Perte de Chemin Logarithmique (LDPL) : Estimation de la Distance	21
4.3 Filtrage par Médiane (Median Filter)	22
4.4 Moyenne Pondérée (WMA) : Stabilisation Dynamique.....	22
4.5 Moindres Carrés (LSQ) : Optimisation de la Position.....	23
5. Aperçu des Méthodes Alternatives de Positionnement Intérieur	23
6. Positionnement Stratégique de Notre Solution	24
7. Conclusion	24
Chapitre III : Réalisation pratique du système	
1.Introduction.....	24
2. Architecture matérielle détaillée	24
3. Développement logiciel	27
4.Conclusion	31
Chapitre IV: Tests et Résultats	
1.Introduction.....	32
2. Étape 1: Test initial du RSSI à 1 mètre (LOS).....	32
2.2 Évaluation de la Réception RSSI à 1 mètre en LOS	33
2.2.1 Modification de la puissance de transmission (Tx Power)	34
2.2.2 Modification de la bande passante.....	36
2.3 comparaison des valeurs de RSSI mesurées.....	41
2.4 Test Vertical du RSSI à 1 mètre	42
3. Etape 2 : Détermination de l'Exposant d'Affaiblissement du Trajet (Path Loss Exponent)	44
3.1 Objectifs et Méthodologie Expérimentale	45
3.2 Résultats Obtenus dans Différents Environnements	46
3.2.1 Analyse des Résultats et Discussion	47
3.3 Importance de l'Exposant d'Affaiblissement pour la Localisation.....	52
3.4 Analyse du RSSI	55
4. Etape 3 : Optimisation de la Précision des Estimations de Distance avec Filtrage du Signal	56
4.1 Objectifs et Méthodologie Expérimentale	56
4.2 Effet du Filtre Médian	58
4.3 Effet de la Moyenne Mobile Pondérée (WMA)	59

4.4 Évaluation de l'Impact des Filtres sur l'Estimation de la Distance.....	62
4.4.1. Effet du Filtre Médian sur l'Estimation de la Distance.....	62
4.4.2. Comparaison avec la Moyenne Mobile Pondérée (WMA).....	62
4.4.3 Compromis entre les Deux Filtres	64
4.5 Conclusion de l'Application des Filtres sur une Seule Balise	64
5.Partie 4 : Trilatération et estimation de position à l'aide de trois balises Objectif :.....	65
5.1 Objectif et Méthodologie Expérimentale.....	65
5.2 Impact du positionnement initial des balises :	67
5.3 Amélioration de la précision avec un positionnement optimisé des balises et le filtre Médian	68
5.4 Amélioration supplémentaire avec l'ajout du filtre WMA	69
5.6 Conclusion de la phase de trilatération	70
6. Conclusion	71

Table des figures

Figure I.1: Système de positionnement intérieur.....	5
Figure I.2 : Balise BLE.....	10
Figure I.3 : Tag mobile.....	11
Figure II.1: ESP32-C3.....	18
Figure II.2 : Représentation des broches et interfaces de l'ESP32-C3.....	20
Figure II.3 : Interface de l'application mobile affichant la localisation du tag.....	31
Figure III.1 : Schéma de câblage des balises.....	25
Figure III.2 : Schéma de câblage du tag mobile.....	26
Figure IV.1: la variation du signal RSSI en fonction de l'angle de la première Balise.....	34
Figure IV.2: la variation du signal RSSI en fonction de l'angle de la première Balise.....	36
Figure IV.3: la variation du signal RSSI en fonction de l'angle de la première Balise.....	38
Figure IV.4 : Comparaison de la répartition angulaire du RSSI pour différentes configurations de la première balise.....	39
Figure IV.5: la variation du signal RSSI en fonction de l'angle de la deuxième Balise.....	40
Figure IV.6: la variation du signal RSSI en fonction de l'angle de la troisième Balise.....	40
Figure IV.7 : Répartition Angulaire du RSSI Autour De La Balise à 1 Mètre (Verticalement).....	43
Figure IV.8 : Comparaison de l'exposant d'affaiblissement du trajet moyen entre le bureau, la salle, le hall et le couloir.....	47

Figure IV.9 : Variation de l'exposant d'affaiblissement du trajet en fonction de la distance dans le bureau.....	48
Figure IV.10 : Variation de l'exposant d'affaiblissement du trajet en fonction de la distance dans la salle.....	49
Figure IV.11: Variation de l'exposant d'affaiblissement du trajet en fonction de la distance dans le hall.....	50
Figure IV.12: Variation de l'exposant d'affaiblissement du trajet en fonction de la distance dans le couloir.....	51
Figure IV.13: Comparaison de la variation de l'exposant d'affaiblissement du trajet en fonction de la distance.....	52
Figure IV.14: Effet de l'Exposant de Perte de Chemin sur la Zone de Prédiction des Distances RSSI.....	54
Figure IV.15: Comparaison du RSSI en fonction de la distance.....	55
Figure IV.16: Atténuation des fluctuations du RSSI brut par l'application du Filtre Médian.....	58
Figure IV.17: l'effet de la Moyenne Mobile Pondérée (WMA) sur les mesures brutes du RSSI au fil du temps.....	60
Figure IV.18: Comparaison de l'Effet des Filtres Médian et Moyenne Mobile Pondérée sur les Mesures RSSI.....	61
Figure IV.19: Comparaison entre les distances réelles et les distances estimées à l'aide du Filtre Médian et de la Moyenne Mobile Pondérée (WMA).....	63
Figure IV.20: Trajectoire de référence du tag mobile.....	66

Figure IV.21: Comparaison de la trajectoire réelle (bleue) et de la trajectoire estimée avec un positionnement initial des balises (rouge).....67

Figure IV.22 : Comparaison de la trajectoire réelle (bleue) et de la trajectoire estimée avec un positionnement optimisé des balises et le filtre Médian (vert).....68

Figure IV.23: Comparaison de la trajectoire réelle (bleue) et de la trajectoire estimée avec un positionnement optimisé des balises et les filtres Médian et WMA (rouge)..... 69

Liste des tableaux

Tableau III.1 : comparaison des valeurs de RSSI mesurées lors des différentes étapes de test et pour différents angles.....	41
Tableau III.2 : résultats des mesures du RSSI en fonction de l'angle vertical.....	43
Tableau III.3 : les valeurs de RSSI mesurées à différentes distances dans les quatre environnements étudiés.....	46
Tableau III.4 : Comparaison des valeurs de distances avant et après la calibration du n.....	53
Tableau III.5 : Comparaison des valeurs de RSSI brutes et filtrées.....	57
Tableau III.6 : Comparaison des distances réelles et mesurées après application du Filtre Médian et de la Moyenne Mobile Pondérée.....	62

Liste des acronymes

AoA	Angle of Arrival (Angle d'Arrivée)
BLE	Bluetooth Low Energy
GPS	Global Positioning System (Système de Positionnement Global)
IPS	Indoor Positioning System (Système de Positionnement Intérieur)
LOS	Line of Sight (Champ de vision direct)
LSQ	Least Squares (Moindres Carrés)
NLOS	Non-Line of Sight (Hors de portée de vue directe)
RSSI	Received Signal Strength Indication (Indication de la Force du Signal Reçu)
RTT	Round Trip Time (Temps d'Aller-Retour)
RFID	Radio-Frequency Identificaton
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Rapport Signal/Bruit)
TDoA	Time Difference of Arrival (Différence de Temps d'Arrivée)
ToA	Time of Arrival (Temps d'Arrivée)
TOF	Time of Flight
Tx Power	Transmission Power (Puissance de Transmission)
UWB	Ultra Wideband (Ultra Large Bande)
WMA	Weighted Moving Average (Moyenne Mobile Pondérée)

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans un monde de plus en plus connecté, la capacité à localiser précisément des objets et des personnes à l'intérieur des bâtiments est devenue une nécessité croissante dans de nombreux secteurs d'activité. Les Systèmes de Positionnement Intérieur (IPS) offrent une solution à ce défi, en fournissant des informations de localisation là où les systèmes de positionnement globaux (GPS) traditionnels se révèlent inefficaces en raison de l'atténuation des signaux par les structures.

Ce mémoire explore la conception et l'implémentation d'un système de positionnement intérieur basé sur l'analyse de l'intensité du signal reçu (RSSI) avec des dispositifs Wi-Fi. Il aborde les défis spécifiques liés à la localisation en intérieur, tels que les interférences et les réflexions du signal, et propose des techniques pour les atténuer. L'importance d'une calibration précise du modèle de perte de trajet et l'impact du positionnement des balises sont également étudiés.

Le mémoire est structuré de manière à présenter d'abord les concepts fondamentaux des IPS, puis à détailler la méthodologie de développement du système, les tests effectués pour optimiser ses performances, et enfin, les résultats obtenus et leur analyse.

Chapitre 1 : Généralités sur le Système de Positionnement Intérieur

1. INTRODUCTION

Au cours des dernières années, une prise de conscience significative de la nécessité d'un Système de Positionnement Intérieur précis et fiable a émergé, se manifestant par une demande croissante dans une multitude de secteurs d'activité. Qu'il s'agisse de rationaliser les opérations logistiques complexes, d'améliorer le confort et la sécurité au sein des environnements domotiques, d'optimiser l'efficacité des soins de santé, ou de renforcer les protocoles de sécurité, la capacité à localiser avec précision des personnes et des objets en intérieur est devenue un enjeu crucial.

Le GPS, qui a indéniablement révolutionné la navigation et le suivi en extérieur, se révèle intrinsèquement limité lorsqu'il s'agit d'environnements intérieurs. La raison principale de cette inefficacité réside dans la nature même de la propagation des signaux satellites, qui sont facilement obstrués et atténués par les structures physiques telles que les murs et les plafonds, rendant impossible une réception fiable et donc un positionnement précis.

Face à cette limitation, l'avènement et la maturation des technologies de communication sans fil ont ouvert un champ de possibilités considérable pour le développement d'alternatives performantes dédiées au positionnement en intérieur. Des technologies telles que le Wi-Fi, le Bluetooth, et l'Ultra Wideband offrent des caractéristiques uniques qui peuvent être exploitées pour déterminer la localisation avec une précision variable, répondant ainsi aux besoins spécifiques des différentes applications.

L'importance croissante du marché des IPS est éloquemment illustrée par les prévisions du rapport de MarketsandMarkets, qui anticipe une valeur globale de 23,6 milliards de dollars d'ici 2026, avec un taux de croissance annuel composé impressionnant de 28,3 %. Cette expansion dynamique est intrinsèquement liée à la prolifération de l'Internet des Objets, qui connecte un nombre croissant d'appareils et nécessite des informations de localisation pour de nombreuses applications. De même, l'essor de la réalité augmentée, qui superpose des informations numériques au monde réel, dépend souvent d'une localisation intérieure précise pour offrir des expériences utilisateur immersives et contextuelles. Enfin, le développement constant d'applications de

navigation indoor, visant à guider les utilisateurs à travers de grands espaces intérieurs tels que les centres commerciaux ou les aéroports, contribue également à cette croissance [1], [14].

Ce premier chapitre a pour objectif d'établir les fondations de notre étude en explorant les concepts fondamentaux qui sous-tendent le système de positionnement intérieur. Nous retracerons son évolution historique, examinerons la diversité de ses applications dans divers domaines, identifierons les composants essentiels qui constituent un tel système, et enfin, nous mettrons en lumière ses avantages distincts ainsi que ses limites inhérentes.

2. HISTORIQUE

L'idée de pouvoir déterminer la position à l'intérieur des bâtiments a émergé d'un besoin pratique et croissant de suivre et de gérer efficacement les personnes et les objets dans des environnements où la technologie GPS traditionnelle se heurtait à des obstacles physiques insurmontables. Les premières tentatives pour répondre à ce besoin ont exploré diverses technologies existantes, chacune avec ses propres compromis en termes de précision, de portée et de coût.

Initialement, des technologies bien établies comme le Bluetooth classique, le Wi-Fi, et l'identification par radiofréquence ont été adaptées pour des applications de localisation intérieure. Cependant, ces premières solutions présentaient des limitations significatives. Le Bluetooth classique offrait une portée limitée et une précision souvent insuffisante pour des applications de localisation fine. Le Wi-Fi, bien que plus répandu et offrant une portée plus étendue, souffrait également d'une précision variable en fonction de la configuration du réseau et des interférences environnementales. Quant à la RFID, si elle était efficace pour l'identification et le suivi à courte portée, elle ne fournissait pas intrinsèquement une information de position continue et précise dans un espace donné.

Le véritable tournant dans le domaine du positionnement intérieur s'est produit avec l'évolution rapide des communications radio et l'intégration de capteurs de plus en plus sophistiqués dans les appareils mobiles et les systèmes embarqués. Ces avancées ont permis

l'émergence de solutions plus performantes et adaptées aux exigences spécifiques de la localisation en intérieur.

Parmi ces innovations notables, on retrouve :

- **Bluetooth Low Energy (BLE) :** Cette version à faible consommation énergétique du Bluetooth a révolutionné le domaine des IPS grâce à sa capacité à communiquer efficacement tout en minimisant la consommation de batterie des appareils mobiles et des balises. Sa large adoption dans les smartphones et sa faible complexité d'implémentation en ont fait une technologie de choix pour de nombreuses applications de proximité et de localisation.
- **Ultra-Wideband (UWB) :** L'UWB se distingue par sa capacité à émettre et à recevoir des impulsions radio de très courte durée sur une large bande de fréquences. Cette caractéristique unique lui confère une précision de localisation remarquable, souvent de l'ordre de quelques centimètres, ainsi qu'une robustesse face aux interférences et aux effets de trajets multiples. Bien que potentiellement plus coûteuse et nécessitant une infrastructure spécifique, sa précision en fait un choix privilégié pour les applications exigeantes.
- **Modules ESP-WiFi :** Ces modules Wi-Fi à faible coût et basse consommation, basés sur la puce ESP32 ou ESP8266, ont démocratisé l'accès aux technologies de localisation intérieure. Ils offrent un équilibre intéressant entre coût, précision et simplicité d'implémentation, permettant aux développeurs de prototyper et de déployer des solutions IPS pour une variété d'applications avec une relative facilité.

Ces innovations technologiques ont non seulement rendu les systèmes de positionnement intérieur plus accessibles et efficaces, mais elles ont également permis de transformer radicalement divers secteurs industriels en offrant des solutions sur mesure pour des défis spécifiques de localisation en intérieur [1], [14].

3. DEFINITION DU SYSTEME DE POSITIONNEMENT INTERIEUR

Fondamentalement, un Système de Positionnement Intérieur peut être défini comme un ensemble intégré de composants matériels et d'algorithmes sophistiqués, conçu dans le but de déterminer et de suivre la position d'un objet ou d'une personne à l'intérieur d'un environnement physique clos. Contrairement aux systèmes de positionnement extérieur qui s'appuient sur les signaux satellites, les IPS exploitent une variété de technologies et de techniques pour atteindre leur objectif.

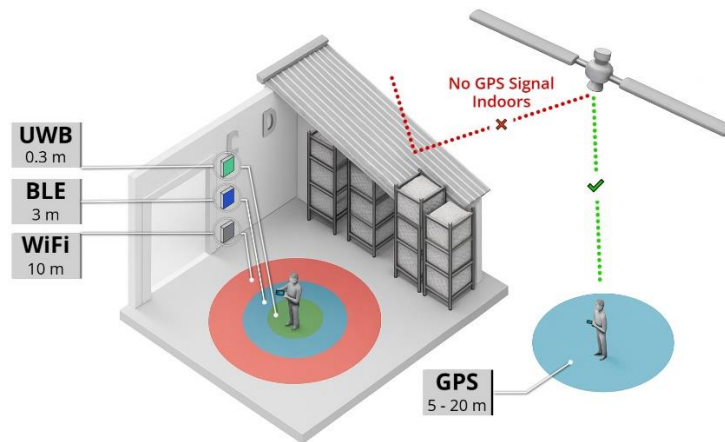


Figure I.1: Système de positionnement intérieur.

Les principes fondamentaux sur lesquels repose un système IPS typique incluent :

- **Dépendance aux mesures radio :** La majorité des IPS s'appuient sur l'analyse des signaux radiofréquences émis et reçus par des dispositifs sans fil tels que les balises Wi-Fi, les émetteurs Bluetooth Low Energy, ou les transmetteurs Ultra-Wideband. Les caractéristiques de ces signaux, telles que leur intensité, leur temps de propagation (ToF), ou leur angle d'arrivée (AoA), sont mesurées et utilisées pour estimer la distance ou la direction de l'objet à localiser par rapport à des points de référence connus.

- **Utilisation de modèles mathématiques :** Une fois les mesures radio brutes collectées, elles sont traitées à l'aide de modèles mathématiques et d'algorithmes de localisation. Ces modèles permettent de convertir les données brutes en estimations de distance, d'angle, et finalement, de position spatiale de l'objet cible. La complexité de ces modèles varie en fonction de la précision souhaitée et des caractéristiques de l'environnement intérieur.
- **Nécessité d'une infrastructure minimale :** Un IPS typique requiert une infrastructure composée d'éléments fixes et mobiles. Les balises fixes (également appelées ancres) sont des dispositifs positionnés à des endroits connus dans l'environnement intérieur et qui émettent des signaux de référence. Les tags mobiles sont les dispositifs attachés aux objets ou portés par les personnes dont on souhaite connaître la position. Enfin, des modules de communication sont nécessaires pour assurer l'échange de données entre les balises, les tags, et un système de traitement centralisé ou une application utilisateur.

3.1 PRINCIPES DU POSITIONNEMENT INTERIEUR

Le positionnement intérieur vise à localiser des objets ou des personnes dans des environnements fermés, où les signaux GPS sont souvent inefficaces ou indisponibles. Contrairement à la géolocalisation en extérieur, le positionnement intérieur repose sur des technologies alternatives capables de fonctionner dans des espaces clos, souvent complexes sur le plan radioélectrique.

Les techniques de positionnement intérieur peuvent être regroupées en plusieurs catégories selon la nature des données utilisées et les algorithmes de traitement mis en œuvre. Parmi les approches les plus courantes, on distingue :

- **Le positionnement basé sur la puissance du signal reçu (RSSI) :** Cette méthode exploite l'intensité du signal reçu par un dispositif mobile en provenance de plusieurs points d'accès ou balises fixes. La relation entre RSSI et distance est modélisée mathématiquement, bien que sensible aux interférences, à l'environnement et aux obstacles.
- **Le positionnement basé sur le temps :** Ces techniques incluent le Time of Arrival (ToA), Time Difference of Arrival (TDoA) et Round Trip Time (RTT). Elles mesurent le temps que met un signal à parcourir la distance entre un émetteur et un récepteur. Ces méthodes

offrent une grande précision, mais nécessitent une synchronisation temporelle très rigoureuse entre les dispositifs.

- **Le positionnement angulaire** : Des techniques comme l'Angle of Arrival déterminent la position en calculant l'angle sous lequel un signal est reçu.

Ces approches requièrent des antennes directionnelles ou des matrices d'antennes, et sont souvent utilisées dans des systèmes de haute précision.

- **Le positionnement par empreinte radio (Fingerprinting)** : Cette méthode repose sur la comparaison entre les signaux captés en temps réel et une base de données préalablement établie contenant des "empreintes" des signaux mesurés à différents emplacements. Bien qu'exigeante en phase de calibration, cette technique peut donner d'excellents résultats dans des environnements complexes.
- **Le positionnement par fusion de capteurs** : Il s'agit de combiner plusieurs sources d'information (signaux radio, capteurs inertiels, caméras, etc.) pour améliorer la précision, la robustesse et la continuité du positionnement. Des algorithmes comme le filtre de Kalman, le median filter, les filtres particulaires ou l'apprentissage automatique sont souvent utilisés dans ce contexte.

Chacune de ces méthodes présente des avantages et des limites en termes de précision, de coût, de consommation énergétique, de complexité d'implémentation, et de sensibilité à l'environnement. Le choix d'une ou plusieurs techniques dépend donc fortement des exigences spécifiques de l'application ciblée [3], [5].

4. DOMAINES D'APPLICATION

La polyvalence des Systèmes de Positionnement Intérieur se traduit par une vaste étendue d'applications concrètes, impactant de manière significative l'efficacité, la sécurité et l'expérience utilisateur dans de nombreux secteurs :

- **Logistique et gestion d'entrepôts :** Les IPS permettent une optimisation poussée du stockage en localisant précisément les marchandises, réduisant ainsi le temps nécessaire à la recherche d'objets. Ils facilitent également une meilleure gestion des flux logistiques en assurant un suivi en temps réel des mouvements des chariots élévateurs, des employés et des produits, améliorant ainsi l'efficacité globale des opérations.
- **Hôpitaux et soins de santé :** Dans les environnements hospitaliers, les IPS jouent un rôle crucial dans le suivi du personnel médical, permettant une localisation rapide en cas d'urgence. Ils facilitent également la gestion des équipements médicaux critiques tels que les défibrillateurs ou les pompes à perfusion, assurant leur disponibilité immédiate. De plus, la localisation des patients peut améliorer la sécurité et l'efficacité des soins, notamment pour les personnes nécessitant une surveillance constante.
- **Sécurité et surveillance :** Les IPS renforcent les dispositifs de sécurité en permettant l'identification rapide des mouvements suspects au sein de bâtiments sensibles tels que les bâtiments gouvernementaux, les banques ou les grands centres commerciaux. Ils peuvent également être utilisés pour contrôler l'accès à certaines zones et pour assurer le suivi du personnel de sécurité.
- **Industrie et maintenance :** Dans les environnements industriels, les IPS contribuent à une gestion plus efficace des outils et équipements, réduisant les pertes de temps liées à leur recherche. Ils peuvent également être utilisés pour surveiller les déplacements des machines et anticiper les pannes en détectant des comportements anormaux, contribuant ainsi à la maintenance prédictive.
- **Smart Buildings :** L'intégration des IPS dans les bâtiments intelligents permet une automatisation plus poussée des systèmes tels que l'éclairage, le chauffage et la climatisation. En détectant la présence humaine dans différentes zones, ces systèmes peuvent ajuster automatiquement les paramètres environnementaux, optimisant ainsi la consommation d'énergie et améliorant le confort des occupants.
- **Tourisme et musées :** Dans le secteur du tourisme et de la culture, les IPS offrent la possibilité de fournir des informations interactives et personnalisées aux visiteurs en fonction de leur position au sein d'un établissement. Par exemple, un visiteur de musée pourrait recevoir des informations détaillées sur une œuvre d'art à proximité via une application mobile.

- **Navigation en intérieur** : Les IPS ouvrent la voie à des applications de navigation intérieure similaires au GPS, mais adaptées aux environnements clos. Ceci est particulièrement utile dans de grands espaces complexes tels que les aéroports, les gares, les centres commerciaux ou les campus universitaires, où les utilisateurs peuvent être guidés efficacement vers leur destination via des applications mobiles.

5. COMPOSANTS DU SYSTEME DE POSITIONNEMENT INTERIEUR

Un Système de Positionnement Intérieur fonctionnel repose sur l'interaction coordonnée de plusieurs composants essentiels :

5.1 BALISES FIXES (ANCRES)

Une balise est un dispositif de signalisation sans fil qui émet périodiquement des signaux radios. Ces signaux contiennent généralement des informations spécifiques, telles qu'un identifiant unique, et peuvent être capté par des récepteurs compatibles situés à proximité.

5.1.1 Caractéristiques principales d'une balise

Parmi les plus importantes caractéristiques d'une balise, on peut citer :

- Émission périodique : Elle envoie des signaux à intervalles réguliers.
- Consommation d'énergie réduite : La plupart des balises fonctionnent sur batterie et sont optimisées pour une faible consommation.
- Portée variable : La distance de transmission dépend de la puissance d'émission et des obstacles dans l'environnement.
- Technologie utilisée : Différents protocoles sans fil peuvent être utilisés, tels que BLE, Wi-Fi, UWB ou RFID.



Figure I.2 : Balise fixe.

5.2 TAGS MOBILES :

Ces dispositifs sont attachés aux objets ou portés par les personnes dont on souhaite connaître la position. Ils sont équipés de récepteurs radio capables de détecter les signaux émis par les balises fixes et de mesurer les caractéristiques de ces signaux (par exemple, l'intensité du signal reçu - RSSI).



Figure I.3 : Tag mobile.

5.3 MODULES DE COMMUNICATION :

Ces modules assurent la transmission des données entre les différents composants du système. Ils peuvent utiliser diverses technologies sans fil telles que le Wi-Fi, le Bluetooth ou l'UWB, en fonction des exigences de l'application en termes de portée, de débit de données et de consommation d'énergie.

5.4 APPLICATION MOBILE (OU SYSTEME DE VISUALISATION) :

Une application mobile ou une interface logicielle est généralement utilisée pour visualiser en temps réel la position calculée des tags mobiles sur une carte de l'environnement intérieur. Cette interface peut également fournir des informations supplémentaires et permettre aux utilisateurs d'interagir avec le système.

5.5 SERVEUR DE LOCALISATION (FACULTATIF MAIS SOUVENT PRESENT) :

Dans les systèmes plus complexes, un serveur centralisé peut être responsable de la collecte et du traitement des données provenant des balises et des tags, de l'exécution des algorithmes de localisation, et de la diffusion des informations de position aux applications clientes.

6. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME

Le fonctionnement typique d'un Système de Positionnement Intérieur basé sur les techniques que nous explorons dans ce projet suit une séquence d'étapes logiques :

1. Émission du signal par les balises fixes :

Les balises fixes, positionnées à des endroits stratégiques dans l'environnement intérieur, émettent en continu des signaux radiofréquences selon le protocole de communication choisi (par exemple, des paquets Bluetooth Low Energy).

2. Réception du signal par le tag mobile et mesure du RSSI brut :

Le tag mobile, attaché à l'objet ou porté par la personne à localiser, est équipé d'un récepteur radio qui détecte les signaux émis par les balises à portée. Pour chaque signal reçu, le tag mesure l'intensité du signal reçu (RSSI brut).

3. Traitement local sur le tag mobile :

- **Filtrage des mesures RSSI :** Afin de réduire l'influence du bruit et des fluctuations rapides du signal, le tag applique des techniques de filtrage telles que le filtre médian et la moyenne pondérée pour obtenir des valeurs RSSI plus stables.
- **Estimation de la distance :** En utilisant un modèle simplifié basé sur l'exposant de perte de parcours (path loss exponent) calibré pour l'environnement intérieur, la distance entre le tag mobile et chaque balise est estimée à partir des RSSI filtrés.

4. Calcul de la position par Méthode des Moindres Carrés (LSQ) :

Une fois les distances estimées par rapport à plusieurs balises fixes (au moins trois pour un positionnement 2D), la méthode des moindres carrés (LSQ) est appliquée. Cet

algorithme combine les informations de distance pour estimer la position la plus probable du tag dans l'espace.

5. Transmission vers une application mobile (ou un système de visualisation) :

La position calculée du tag mobile est ensuite transmise via un réseau de communication (par exemple, Wi-Fi ou Bluetooth) vers une application mobile ou un système de visualisation. Cette application affiche en temps réel la position du tag sur une carte numérique de l'environnement intérieur, permettant aux utilisateurs de suivre le mouvement des objets ou des personnes

7. AVANTAGES ET INCONVENIENTS

La mise en œuvre d'un Système de Positionnement Intérieur basé sur l'analyse du RSSI présente un ensemble d'avantages et d'inconvénients qu'il est crucial de considérer :

7.1 AVANTAGES

- **Faible coût d'infrastructure comparé à d'autres solutions :** L'utilisation de technologies sans fil courantes comme le Wi-Fi ou le Bluetooth Low Energy peut réduire considérablement les coûts d'investissement initiaux en comparaison avec des technologies plus spécifiques comme l'Ultra-Wideband qui nécessitent souvent un matériel dédié plus onéreux.
- **Flexibilité d'installation dans des environnements variés :** Les balises peuvent être déployées relativement facilement dans une grande diversité d'environnements intérieurs sans nécessiter de modifications structurelles importantes. La nature sans fil de la communication simplifie également l'ajout ou le déplacement de balises si nécessaire.
- **Bonne précision dans les scénarios correctement calibrés :** Lorsqu'un étalonnage précis du modèle de perte de trajet est effectué pour l'environnement spécifique et que le nombre de balises est suffisant, une précision de localisation satisfaisante peut être obtenue pour de nombreuses applications.
- **Simplicité de maintenance et d'exploitation :** Les systèmes basés sur le RSSI ont tendance à être relativement simples à maintenir et à exploiter. Les balises ont généralement une faible consommation d'énergie et peuvent fonctionner pendant de longues périodes avec un minimum d'intervention.

7.2 INCONVÉNIENTS

- **Sensibilité aux interférences radio et aux multipaths (réflexions du signal) :**
L'intensité du signal radio peut être fortement affectée par les interférences provenant d'autres appareils sans fil opérant sur les mêmes fréquences. De plus, les réflexions du signal sur les surfaces métalliques ou autres obstacles (phénomène de multipath) peuvent entraîner des mesures RSSI inexactes et, par conséquent, des erreurs de positionnement.
- **Variabilité du RSSI : dépend de nombreux facteurs (murs, obstacles, humidité) :** La relation entre la distance et l'intensité du signal n'est pas toujours linéaire et peut être influencée par une variété de facteurs environnementaux tels que la présence de murs, d'obstacles, de personnes en mouvement, et même le niveau d'humidité. Cette variabilité rend l'estimation précise de la distance plus complexe.
- **Nécessité de calibrage initial pour obtenir de bonnes performances :** Pour que le modèle de perte de trajet (Path Loss exponent) fournisse des estimations de distance précises, il est essentiel de réaliser un calibrage initial rigoureux de l'environnement. Cela implique de mesurer l'intensité du signal à différentes distances connues et de déterminer l'exposant de perte de trajet spécifique au lieu d'application. Un mauvais calibrage peut entraîner des erreurs de positionnement significatives.

8. CONCLUSION

Ce premier chapitre a jeté les bases essentielles à la compréhension de notre projet de recherche. Nous avons défini les enjeux cruciaux du positionnement intérieur, exploré les différentes méthodes existantes, et mis en lumière les principes fondamentaux qui sous-tendent notre approche spécifique basée sur l'analyse du RSSI, le modèle de perte de trajet, les filtrages median et le WMA et la méthode des moindres carrés. Nous avons également souligné la vaste gamme d'applications potentielles pour les systèmes IPS et présenté les avantages et les inconvénients inhérents à notre choix technologique.

La suite de ce mémoire se consacrera à une exploration approfondie des aspects expérimentaux de notre projet. Nous détaillerons l'architecture de notre système, les modèles

mathématiques employés avec plus de précision, la méthodologie de collecte et de traitement des données, et enfin, nous présenterons et analyserons les résultats obtenus à partir de notre implémentation, en évaluant la performance et l'efficacité de notre approche innovante.

Chapitre 2 : État de l'Art sur le Positionnement Intérieur

1. INTRODUCTION AU POSITIONNEMENT INTERIEUR

Le positionnement intérieur est un domaine de recherche dynamique, répondant au besoin crucial de localisation précise dans les environnements où le GPS s'avère inefficace. Ce chapitre explore les diverses approches existantes, en se concentrant particulièrement sur l'utilisation de l'Indicateur de Force du Signal Reçu, une métrique clé au cœur de notre projet. Nous examinerons les principes fondamentaux du RSSI, ses défis inhérents, ainsi que les stratégies employées pour optimiser sa précision. De plus, nous présenterons d'autres méthodes de positionnement intérieur, en soulignant le positionnement unique et les avantages de notre solution. Enfin, nous mettrons en lumière le rôle essentiel des microcontrôleurs ESP32-C3 et leur contribution technologique à notre système.

2. FONDAMENTAUX ET DEFIS DU RSSI

2.1 DEFINITION DU RSSI

L'Indicateur de Force du Signal Reçu est une mesure numérique, généralement exprimée en décibels-milliwatts (dBm), qui quantifie la puissance du signal radiofréquence capté par un récepteur sans fil à un instant donné. Il s'agit d'une indication de l'amplitude de l'onde radioélectrique au point de réception. Dans le contexte des réseaux sans fil tels que le Wi-Fi et le Bluetooth, le RSSI est une métrique standardisée qui permet d'évaluer la qualité de la liaison radio entre deux dispositifs. Une valeur de RSSI plus élevée (c'est-à-dire moins négative) indique un signal plus fort et, par conséquent, une meilleure qualité de connexion et potentiellement une plus grande proximité entre l'émetteur et le récepteur. Inversement, une valeur de RSSI plus faible (plus négative) suggère un signal plus faible, une connexion potentiellement moins stable et une plus grande distance entre les dispositifs.

Le RSSI est une information de couche physique qui est généralement accessible via les interfaces de programmation des contrôleurs sans fil. Il est important de noter que l'échelle et la résolution des valeurs RSSI peuvent varier légèrement en fonction du fabricant du chipset sans fil

et du protocole de communication utilisé. Par exemple, dans certains systèmes Wi-Fi, le RSSI peut varier de 0 à -100 dBm, tandis que dans d'autres, la plage peut être différente. Malgré ces variations, le principe fondamental demeure : le RSSI est un indicateur inversement proportionnel à la perte de puissance du signal lors de sa propagation à travers l'espace et les obstacles. C'est cette relation intrinsèque entre le RSSI et la distance qui est exploitée dans les systèmes de positionnement intérieur basés sur cette métrique [3], [5].

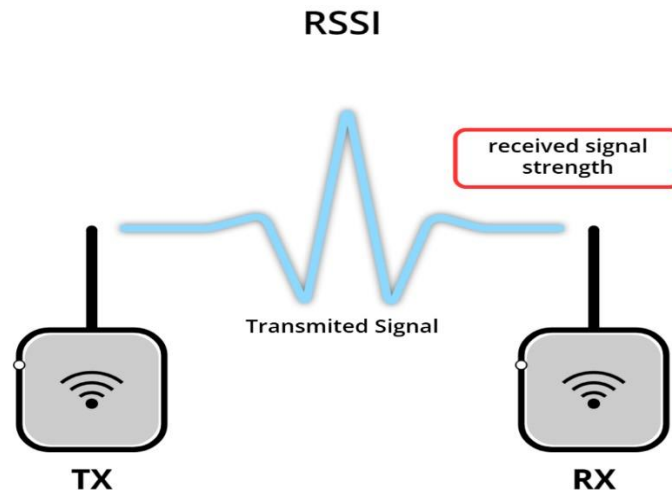


Figure II.1: Représentation graphique du RSSI.

2.2 DEFIS INHERENTS AU RSSI

Bien que largement adopté, l'utilisation du RSSI pour le positionnement intérieur est confrontée à plusieurs défis significatifs :

- **Variabilité du Signal** : Les obstacles physiques, les interférences d'autres dispositifs sans fil et les effets de trajets multiples (réflexions du signal) introduisent une variabilité importante dans les mesures RSSI.
- **Précision Limitée** : Les valeurs RSSI peuvent fluctuer considérablement même à une distance constante, ce qui limite la précision d'une estimation de distance basée sur une seule mesure.

- **Sensibilité Environnementale** : La nature des matériaux présents (murs, métaux), ainsi que la présence et le mouvement de personnes, peuvent affecter l'atténuation du signal et donc les valeurs RSSI.
- **Influence des Interférences** : Les interférences provenant de réseaux Wi-Fi ou d'autres sources sans fil peuvent introduire du bruit et des fluctuations parasites dans les mesures RSSI [2], [4].

3. ROLE ET AVANTAGES DES ESP32-C3

3.1 PRESENTATION DES ESP32-C3 SUPER MINI

Les ESP32-C3 super mini représentent une série de microcontrôleurs System-on-Chip (SoC) de pointe développés par Espressif Systems, spécialement conçus pour les applications nécessitant une connectivité sans fil fiable et une faible consommation d'énergie. Ces puces intègrent un cœur de processeur RISC-V 32 bits performant, une mémoire vive statique (SRAM) substantielle, ainsi qu'un ensemble complet de périphériques et d'interfaces, le tout sur une seule puce compacte. L'une des caractéristiques les plus remarquables des ESP32-C3 super mini est l'intégration native des technologies de communication sans fil les plus répandues : le Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) opérant sur la bande des 2.4 GHz, et le Bluetooth Low Energy (BLE 5.0), qui permet des communications à faible puissance pour les applications de proximité et l'Internet des Objets (IoT) [6].



Figure II.2: ESP32-C3.

Pour notre projet de positionnement intérieur, plusieurs aspects techniques des ESP32-C3 super mini sont particulièrement pertinents :

- **Lecture Précise et Accessible des Valeurs RSSI** : Les contrôleurs Wi-Fi et Bluetooth intégrés aux ESP32-C3 fournissent une interface fiable pour la lecture des valeurs RSSI associées à chaque paquet de données reçu. Cette capacité est fondamentale pour notre approche, car elle nous permet de collecter un flux continu de mesures de la force du signal en provenance des balises fixes et du tag mobile. La précision et la résolution des mesures RSSI fournies par l'ESP32-C3 super mini sont généralement bien adaptées aux algorithmes de traitement statistique que nous employons.
- **Optimisation de la Consommation Énergétique** : La faible consommation d'énergie des ESP32-C3 super mini, en particulier en mode veille profonde et lors de l'utilisation du Wi-Fi, est un avantage crucial pour le déploiement à grande échelle de notre système. Que ce soit pour alimenter les balises fixes pendant de longues périodes sans remplacement fréquent de batterie ou pour assurer une autonomie raisonnable des tags mobiles portés par les utilisateurs ou attachés aux objets, l'efficacité énergétique de la connectivité Wi-Fi sur ESP32-C3 super mini contribue à la viabilité et à la praticité de notre solution.
- **Puissance de Traitement Embarqué Adaptée aux Calculs en Temps Réel** : Le processeur RISC-V intégré aux ESP32-C3 super mini offre une puissance de calcul suffisante pour exécuter localement les algorithmes de traitement du RSSI développés dans le cadre de ce projet. Cela inclut :
 - L'application de filtres de stabilisation tels que le filtre médian, qui élimine les valeurs aberrantes en prenant la médiane d'un ensemble de mesures, et le filtre WMA (Weighted Moving Average), qui accorde plus de poids aux mesures récentes pour lisser les fluctuations du signal [9].
 - L'estimation des distances à partir des valeurs RSSI filtrées en utilisant un modèle basé sur l'exposant de perte de parcours (path loss exponent), qui permet d'établir une relation mathématique entre la puissance du signal reçu et la distance, spécifiquement calibrée pour l'environnement étudié.

- La résolution d'un système d'équations par la méthode des moindres carrés (LSQ), afin de déterminer avec précision la position du tag mobile en combinant les distances estimées depuis plusieurs balises fixes.

Cette capacité de traitement embarqué permet d'exécuter l'ensemble du processus en temps réel, sans dépendre d'une communication constante avec un serveur externe, ce qui réduit considérablement la latence et améliore la réactivité du système.

- **Flexibilité et Facilité d'Intégration avec d'Autres Composants :** Les ESP32-C3 super mini sont dotés d'un riche ensemble de périphériques et d'interfaces de communication, tels que les broches d'entrée/sortie à usage général (GPIOs), les interfaces série UART, SPI et I2C, ainsi que des convertisseurs analogique-numérique (ADC). Cette polyvalence facilite l'intégration de l'ESP32-C3 super mini avec d'autres capteurs (par exemple, des accéléromètres, des gyroscopes, des magnétomètres) qui pourraient être utilisés dans des versions futures de notre système pour améliorer la précision du positionnement ou pour ajouter des fonctionnalités supplémentaires, telles que le suivi de l'orientation ou la détection de mouvements spécifiques.

3.2 REPRESENTATION DES BROCHES ET INTERFACES DE L'ESP32-C3

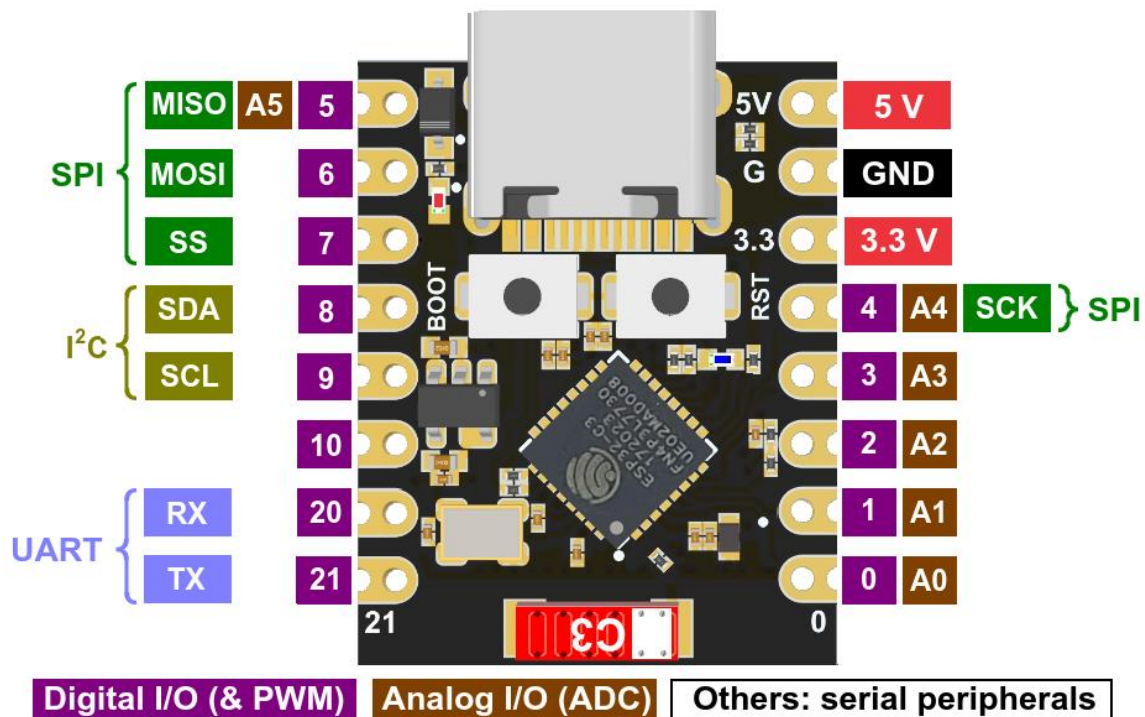


Figure II.3 : Représentation des broches et interfaces de l'ESP32-C3.

4. STRATEGIES D'OPTIMISATION DU RSSI POUR LE POSITIONNEMENT

4.1 CALIBRATION ENVIRONNEMENTALE : ADAPTATION AU CONTEXTE

La calibration environnementale est une étape essentielle pour adapter le modèle de perte de chemin logarithmique (LDPL) aux spécificités de l'environnement de déploiement. En mesurant le RSSI à des distances connues, nous pouvons ajuster les paramètres du modèle pour compenser les effets des matériaux et de la configuration spatiale.

4.2 MODELE DE PERTE DE CHEMIN LOGARITHMIQUE (LDPL) : ESTIMATION DE LA DISTANCE

Le modèle LDPL établit une relation mathématique entre le RSSI et la distance, tenant compte de l'atténuation du signal en fonction de la distance et des caractéristiques de l'environnement

(exposant de perte). Son application permet de convertir les mesures RSSI en estimations de distance.

$$\text{RSSI} = \text{RSSI}_0 - 10.n.\log_{10}(d) \dots\dots (1)$$

Où :

- RSSI est le RSSI mesuré à une distance d.
- RSSI_0 est le RSSI à 1 mètre.
- n est l'exposant de perte, spécifique à l'environnement.

4.3 FILTRAGE PAR MEDIANE (MEDIAN FILTER)

Le filtre médian est une méthode robuste pour éliminer les valeurs aberrantes (outliers) dans les mesures RSSI. Il consiste à trier un ensemble de valeurs consécutives et à sélectionner la médiane comme valeur représentative.

Ce filtre est particulièrement efficace dans les environnements soumis à des interférences aléatoires ou à des fluctuations rapides du signal. Il permet d'améliorer la stabilité des données sans introduire de délai important, ce qui est crucial pour les systèmes temps réel [9].

4.4 MOYENNE PONDEREE (WMA) : STABILISATION DYNAMIQUE

La Weighted Moving Average (WMA) est une technique de filtrage qui attribue un poids plus élevé aux mesures les plus récentes, tout en conservant l'historique des valeurs précédentes. Contrairement à une moyenne simple, la WMA réagit plus rapidement aux changements réels de position tout en lissant les variations dues au bruit.

Ce filtre permet donc un compromis entre réactivité et stabilité, en conservant une bonne sensibilité aux déplacements tout en réduisant les fluctuations erratiques du RSSI [9].

4.5 MOINDRES CARRÉS (LSQ) : OPTIMISATION DE LA POSITION

La méthode des moindres carrés est appliquée pour calculer la position la plus probable du tag mobile en minimisant la somme des carrés des erreurs entre les distances estimées (à partir du RSSI et du LDPL) et les distances théoriques basées sur la position calculée. Cette technique permet d'obtenir une estimation de position précise en exploitant les informations de distance provenant de plusieurs balises [7].

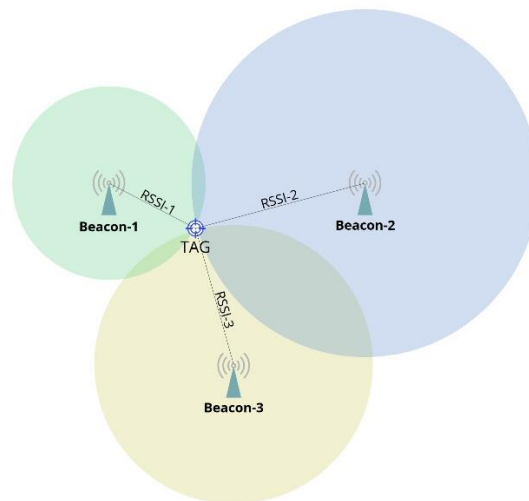


Figure II.4 : méthode des moindres carrés.

5. APERÇU DES METHODES ALTERNATIVES DE POSITIONNEMENT INTERIEUR

Bien que notre projet se concentre sur une approche optimisée du RSSI, il est pertinent de mentionner d'autres méthodes de positionnement intérieur :

- **Angle d'arrivée (AoA)** : Utilise l'angle d'arrivée des signaux pour la localisation.
- **Capteurs inertiels (IMU)** : Estime la position par l'intégration des mouvements.
- **Ultra Wideband (UWB)** : Emploie des signaux à large bande pour des mesures de temps de vol précises.

Ces méthodes représentent des alternatives intéressantes, chacune avec ses propres compromis en termes de précision, de coût et de complexité de mise en œuvre [11].

6. POSITIONNEMENT STRATEGIQUE DE NOTRE SOLUTION

Notre approche de positionnement intérieur offre une combinaison unique d'avantages :

- **Rentabilité** : L'utilisation de modules ESP32-C3 super mini permet une solution économique.
- **Simplicité de Déploiement** : L'intégration avec des infrastructures Wi-Fi standard facilite l'installation.
- **Traitement Embarqué** : L'exécution des algorithmes sur les dispositifs réduit la dépendance à des ressources externes.
- **Potentiel d'Extension** : La flexibilité de la plateforme ESP32-C3 super mini permet l'intégration future de capteurs et de technologies supplémentaires.

Notre solution représente ainsi une option robuste et pertinente pour de nombreuses applications de positionnement intérieur, offrant un équilibre optimal entre performance, coût et facilité d'utilisation.

7. CONCLUSION

Ce chapitre a établi les fondements théoriques du positionnement intérieur en mettant l'accent sur l'approche basée sur le RSSI que nous avons développée. En détaillant les principes du RSSI, ses limitations et les techniques d'amélioration que nous employons, nous avons souligné le potentiel d'une solution innovante et efficace. L'intégration stratégique des microcontrôleurs ESP32-C3 et l'application d'une chaîne de traitements mathématiques avancés positionnent notre projet comme une contribution solide et pertinente dans le domaine du positionnement intérieur, offrant un compromis avantageux pour de nombreuses applications.

Le chapitre suivant détaillera l'architecture et la mise en œuvre de notre système, préparant l'analyse des résultats expérimentaux qui valideront l'efficacité de notre approche.

Chapitre 3 : Réalisation pratique du système

1.INTRODUCTION

Ce chapitre détaille la mise en œuvre concrète du système de positionnement intérieur développé. Nous y exposerons les choix technologiques qui ont guidé la réalisation. Nous décrirons ensuite l'architecture matérielle et logicielle du système, en mettant l'accent sur les aspects pratiques de sa construction et de sa programmation. Nous aborderons également les techniques de traitement du signal mises en œuvre pour améliorer la précision du positionnement, ainsi que les tests expérimentaux réalisés pour évaluer les performances du système. Enfin, nous discuterons des difficultés rencontrées au cours de la réalisation et des solutions apportées pour les surmonter, et nous proposerons des perspectives d'amélioration pour le système.

2. ARCHITECTURE MATERIELLE DETAILLEE

Le système de positionnement intérieur développé repose sur une architecture matérielle soigneusement conçue, mettant en œuvre les modules ESP32-C3 super mini pour leur performance et leur polyvalence.

- **Modules ESP32-C3 Super Mini :**

- Ces microcontrôleurs constituent le cœur du système, agissant à la fois comme balises fixes et comme tag mobile.
- Leur architecture RISC-V 32 bits offre une puissance de calcul adéquate pour le traitement en temps réel des signaux RSSI et l'exécution des algorithmes de localisation.
- Le module WiFi intégré est utilisé pour la communication entre les balises et le tag, permettant la mesure précise du RSSI.
- Le module Bluetooth Low Energy est utilisé pour la communication avec le terminal de visualisation.
- Les antennes Wi-Fi externes ont été utilisées afin d'améliorer la portée du signal des ESP32-C3 super mini.

- **Balises fixes :**

- Trois balises fixes sont stratégiquement positionnées dans l'environnement intérieur, servant de points de référence pour le tag mobile.
- Positionnement stratégique des balises : Le positionnement des balises a été effectué en tenant compte de plusieurs facteurs. Premièrement, une distance maximale entre les balises a été respectée afin d'assurer une couverture optimale de l'espace. Deuxièmement, les balises ont été placées à des hauteurs différentes pour minimiser les effets des obstacles et des réflexions multipaths. Enfin, les balises ont été positionnées de manière à former un triangle, ce qui permet d'améliorer la précision de la trilatération.
- Chaque balise émet périodiquement des paquets WiFi, permettant au tag de mesurer le RSSI des signaux reçus.
- Les balises sont alimentées par des batteries Li-ion 3.7V – 2800 mAh, montées en série pour obtenir une tension de 7.4V. Un régulateur de tension linéaire LM7805 est utilisé pour stabiliser la tension à 5V.

Le schéma de câblage du circuit des balises est présenté ci-dessous :

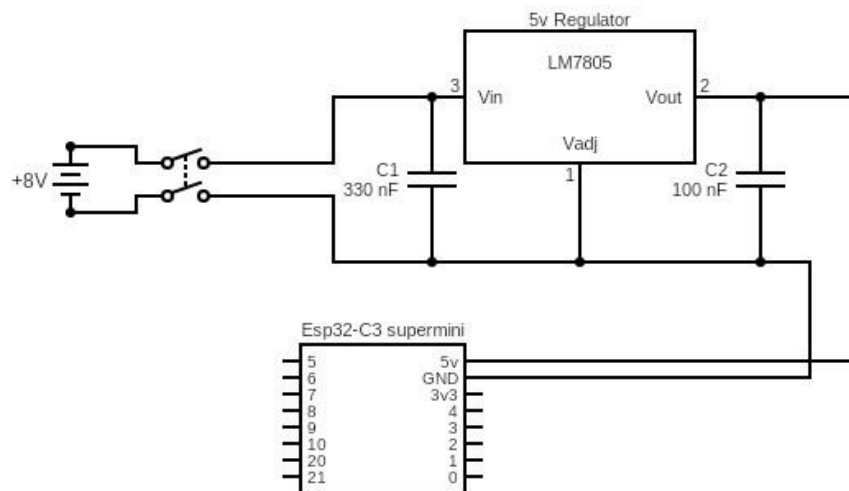


Figure III.1 : Schéma de câblage des balises.

- **Tag mobile :**

- Le tag mobile, également basé sur un ESP32-C3 Super Mini, est chargé de mesurer le RSSI des signaux émis par les balises.
- Il exécute les algorithmes de localisation pour estimer sa position en temps réel.
- Le tag mobile est alimenté par une batterie Li-ion 3.7V – 650 mAh. Un convertisseur boost MT3608 est utilisé pour augmenter la tension à 5V.

Le schéma de câblage du circuit d'alimentation du tag mobile est présenté ci-dessous :

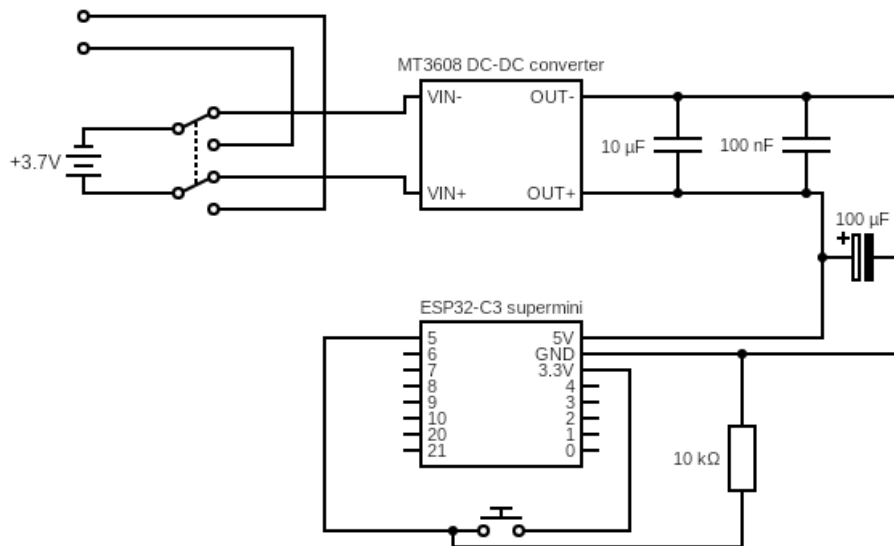


Figure III.2 : Schéma de câblage du tag mobile.

- **Alimentation :**

- L'alimentation des balises et du tag mobile est assurée par des batteries Li-ion, régulées à 5V pour un fonctionnement stable des ESP32-C3.

- **Composants complémentaires :**

- Des plaques d'essai, des câbles Dupont et des connecteurs JST sont utilisés pour le prototypage et l'assemblage du système.
- LM7805 : Régulateur de tension linéaire 8V → 5V, utilisé pour les balises afin de fournir une tension stable à partir des batteries.

- MT3608 : Convertisseur boost 3.7V → 5V, utilisé pour le tag mobile afin d'augmenter la tension de la batterie.

3. DEVELOPPEMENT LOGICIEL

Le développement logiciel a été réalisé dans l'environnement de développement intégré (IDE) Arduino, en utilisant des bibliothèques spécifiques pour la gestion WiFi, le traitement du signal et le filtrage.

3.1 Fonctionnement des balises :

- Les balises émettent en continu des paquets WiFi.
- Elles utilisent le mode WiFi Access Point, ce qui leur permet de diffuser des signaux WiFi identifiables par le tag.
- Chaque balise a un identifiant qui lui est propre.
- Le code logiciel utilisé pour la transmission périodique des paquets WiFi est disponible dans l'annexe.

3.2 Fonctionnement du tag:

- Le tag effectue un scan actif des réseaux WiFi à intervalles réguliers.
- Il mesure le RSSI de chaque balise détectée et stocke ces valeurs.
- Le code logiciel utilisé pour le scan actif des réseaux WiFi et la mesure du RSSI est disponible dans l'annexe.

3.3 Application des filtres :

- **Moyenne pondérée glissante (WMA) :** La moyenne pondérée glissante est une variante améliorée de la moyenne glissante classique. Elle consiste à appliquer un poids plus important aux valeurs récentes, afin de donner plus d'importance aux mesures les plus représentatives du moment actuel tout en conservant un effet de lissage.

Formule :

$$RSSI_{WMA} = \frac{w_1 \cdot RSSI_1 + w_2 \cdot RSSI_2 + \dots + w_n \cdot RSSI_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} \dots\dots(2)$$

- $RSSI_1, \dots, RSSI_n$ sont les dernières n mesures RSSI,
- w_1, \dots, w_n sont les poids associés, avec $w_n > w_{\{n-1\}} > \dots > w_1$
(ex. : $w = [1, 2, 3, 4, 5]$ pour $n = 5$).

Objectif :

- Lissage des petites variations dues au bruit.
- Réactivité aux changements réels (déplacement du tag).

Avantages :

- Réduction efficace des fluctuations sans éliminer l'information de mouvement.
 - Ajustable selon le niveau de bruit de l'environnement.
 - Implémentation simple, adaptée aux microcontrôleurs type ESP32-C3 super mini.
- **Filtre median :** Le filtre médian est une technique de traitement du signal non linéaire utilisée pour éliminer les valeurs aberrantes (outliers) dans une série de données. Contrairement à une moyenne classique qui peut être fortement influencée par des valeurs extrêmes, le filtre médian agit en remplaçant chaque valeur par la médiane d'un ensemble de valeurs voisines.

Fonctionnement :

- On collecte une fenêtre de n valeurs RSSI successives (par exemple : 5 ou 7 mesures).
- On trie ces valeurs par ordre croissant.
- La valeur centrale (médiane) est choisie comme valeur finale filtrée.

Exemple :

Soit la séquence : [-68, -67, -90, -66, -65]

→ Après tri : [-90, -68, -67, -66, -65]

→ Médiane = -67 (valeur centrale)

→ Le pic aberrant -90 est ignoré.

Avantages :

- Très efficace contre les interférences soudaines.
 - Facile à implémenter sur microcontrôleur.
 - Conserve les transitions réelles de déplacement tout en supprimant le bruit.
- **Affinage de la position par optimisation des moindres carrés (LSQ) :** Le LSQ est un algorithme d'optimisation qui permet de trouver la solution optimale à un problème de régression linéaire. Dans notre cas, le LSQ est utilisé pour affiner la position estimée du tag mobile en minimisant l'erreur entre les distances estimées et les distances réelles [7].
 - **Transmission de la position estimée via Wi-Fi :** La position finale est transmise au terminal via Wi-Fi toutes les 500 ms.

- Des exemples de code pour les algorithmes de filtrage sont disponibles dans l'annexe.

3.3 Réalisation de l'application mobile :

Une application a été créée afin d'afficher les coordonnées X, Y du tag en temps réel. Cette application permet également de suivre le tag à distance et de pointer sa position sur un plan inséré et donné par l'utilisateur.

- **Suivi à distance :** L'application permet de suivre le tag en temps réel, même lorsque l'utilisateur se trouve à distance du système. Les données de position sont transmises via Bluetooth LE et affichées sur l'écran de l'application.
- **Plan inséré :** L'utilisateur peut insérer un plan de l'environnement intérieur dans l'application. La position du tag est alors affichée sur ce plan, ce qui facilite la visualisation de sa localisation.
- **Affichage des valeurs RSSI et des filtres :** L'application permet également d'afficher les valeurs du RSSI reçu par le tag, ainsi que les valeurs des filtres utilisés pour estimer la position. Ces informations peuvent être utiles pour analyser les performances du système et identifier d'éventuels problèmes.
- **Développement :** L'application a été développée en langage Java sous Android Studio.
- **Défis liés au développement logiciel :**
 - **Optimisation mémoire :** L'exécution des algorithmes de filtrage et de localisation en temps réel sur les ESP32-C3 super mini nécessite une gestion efficace de la mémoire. Des techniques d'optimisation telles que l'allocation dynamique de mémoire et l'utilisation de tableaux préalloués ont été mises en œuvre pour minimiser la consommation de mémoire.
 - **Gestion des interférences :** Les environnements intérieurs sont souvent sujets à des interférences WiFi, ce qui peut affecter la précision des mesures RSSI. Des techniques de filtrage et de traitement du signal ont été mises en œuvre pour atténuer les effets des interférences.

La Figure ci-dessous montre un aperçu de l'interface de l'application mobile, affichant la position du tag sur un plan inséré.

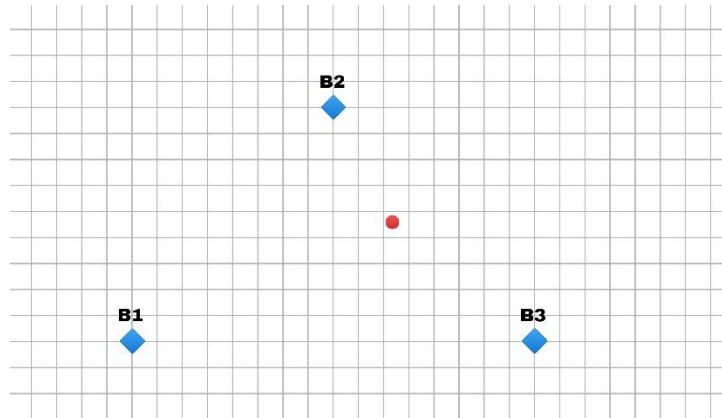


Figure II.3 : Interface de l'application mobile affichant la localisation du tag sur un plan.

4.CONCLUSION

Ce chapitre a détaillé la réalisation pratique du système de positionnement intérieur, en mettant l'accent sur les choix technologiques, l'architecture matérielle et logicielle, ainsi que les techniques de traitement du signal mises en œuvre.

Les résultats obtenus démontrent la pertinence des choix technologiques effectués, notamment l'utilisation des modules ESP32-C3 super mini pour leur capacité à fournir des mesures RSSI précises et leur puissance de calcul adéquate. Les algorithmes de filtrage et de localisation implémentés ont permis d'améliorer significativement la précision et la stabilité du système, en atténuant les effets du bruit et des interférences.

Les aspects liés aux tests expérimentaux, aux difficultés rencontrées et aux perspectives futures seront abordés en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 : Tests et Résultats

1.INTRODUCTION

La phase de tests représente une étape fondamentale dans le processus de développement et d'évaluation de notre système de localisation intérieure. Elle permet de mesurer la performance du système dans des conditions contrôlées et d'identifier les axes d'amélioration potentiels. Ce chapitre documente les différentes séries de tests menées, les méthodologies employées, les problèmes rencontrés et les ajustements apportés afin d'optimiser le fonctionnement du système.

2. ÉTAPE 1: TEST INITIAL DU RSSI A 1 METRE (LOS)

2.2 ÉVALUATION DE LA RECEPTION RSSI A 1 METRE EN LOS

L'objectif principal de cette première série de tests était de déterminer une valeur de référence du RSSI à une distance d'un mètre, dans des conditions idéales de champ libre (*Line of Sight* – LOS). Cette valeur de référence est essentielle pour le calibrage des algorithmes de localisation et pour l'interprétation des mesures RSSI dans des environnements plus complexes et perturbés.

Pour cela, les tests ont été réalisés dans un espace intérieur dégagé, avec un minimum d'obstacles et de réflexions, afin de se rapprocher au maximum des conditions idéales de propagation. Une balise Wi-Fi a été placée à une position fixe, émettant un signal en continu. Un module récepteur (tag) a été déplacé selon une trajectoire circulaire autour de la balise, en maintenant une distance constante d'un mètre. Des mesures de RSSI ont été collectées à des intervalles angulaires de 45°, couvrant ainsi l'ensemble des 360° autour de la balise.

Ce test circulaire avait pour but d'évaluer la stabilité et l'uniformité du signal émis, mais aussi de révéler d'éventuelles anisotropies dans l'émission. Les résultats obtenus montrent une variabilité significative du RSSI selon l'angle. À titre d'exemple, une valeur minimale de -67,25 dB a été relevée à 135°, indiquant une réception plus faible dans cette direction, tandis qu'une valeur maximale de -52,78 dB a été enregistrée à 315°, traduisant une meilleure réception. La valeur observée à 0°, égale à -59,74 dB, représente une intensité de signal modérée dans la direction de référence.

Cette différence de plus de 14 dB entre les mesures extrêmes met en évidence une anisotropie du signal, probablement liée à l'orientation physique de la balise ou à la répartition de son antenne. Même en conditions sans obstacle, l'orientation relative entre la balise et le tag influence donc fortement la réception du signal. Ces premières observations soulignent l'importance de bien comprendre la distribution spatiale du signal avant de l'exploiter pour des calculs de distance.

Enfin, la faiblesse relative des valeurs RSSI obtenues dans certaines directions nous a amenés à envisager d'optimiser les paramètres de transmission, notamment la puissance d'émission et la bande passante, pour améliorer la qualité globale du signal et sa cohérence

angulaire. Ces hypothèses ont conduit à la mise en place d'une série de tests complémentaires décrits dans les sections suivantes.

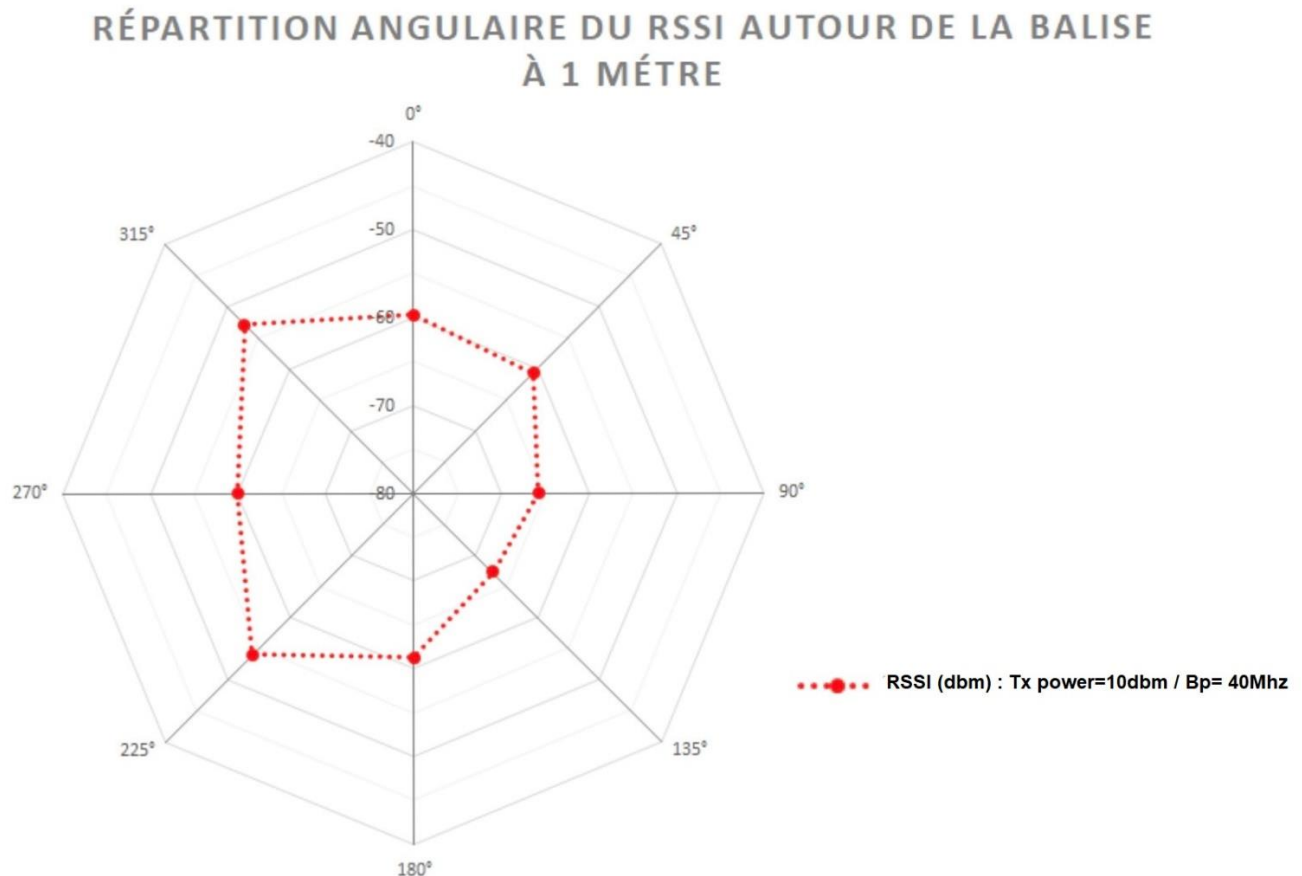


Figure IV.1: la variation du signal RSSI en fonction de l'angle de la première Balise.

2.2.1 MODIFICATION DE LA PUISSANCE DE TRANSMISSION (TX POWER)

Confrontés aux valeurs de RSSI relativement basses et à la variation angulaire observées lors de la première étape, nous avons émis l'hypothèse qu'une augmentation de la puissance d'émission de la balise pourrait améliorer la force du signal reçu par le tag, et potentiellement rendre la réception moins dépendante de l'orientation. La puissance de transmission (Tx Power) est un paramètre fondamental qui détermine l'énergie rayonnée par l'antenne de la balise. En la

doublant, passant de 10 dBm à 20 dBm, tout en conservant une bande passante de 40 MHz, nous nous attendions à une augmentation substantielle des valeurs de RSSI sur l'ensemble des angles testés. Une puissance d'émission plus élevée permet au signal de parcourir une plus grande distance et d'être moins sensible aux pertes de trajet initiales.

Les résultats de ce deuxième test ont confirmé notre attente d'une amélioration globale de l'intensité du signal. À l'angle de 0°, le RSSI a progressé de **-59,74 dB à -49,6 dB**, ce qui représente un gain significatif de 10,14 dB. Cependant, bien que les valeurs de RSSI aient généralement augmenté (la plage s'étendant désormais de **-58,88 dB à 135° à -49,26 dB à 225°**), la variation angulaire persistait. Cela suggère que l'augmentation de la puissance seule ne suffisait pas à uniformiser la couverture du signal autour de la balise. La persistance de cette variation angulaire a orienté nos investigations vers un autre paramètre potentiellement influent : la bande passante du signal.

Effet de la puissance d'émission

Lorsque nous avons augmenté la puissance d'émission de la balise de 10 dBm à 20 dBm, nous avons multiplié par 10 la puissance du signal transmis (car une augmentation de 10 dB correspond à un facteur de 10 en puissance linéaire : 10 dBm = 10 mW et 20 dBm = 100 mW). Cette augmentation de la puissance d'émission a eu plusieurs conséquences notables :

- **Le RSSI est plus élevé :** Comme attendu, une plus grande puissance d'émission se traduit par une plus grande intensité du signal reçu par le tag à une distance donnée.
- **Le signal est plus robuste contre les petites pertes dues à la distance, aux réflexions et aux interférences :** Un signal plus puissant est moins susceptible d'être affaibli au point de devenir inutilisable en raison de la propagation dans l'espace ou de perturbations mineures dans l'environnement.
- **La portée effective du signal est augmentée :** Une plus grande puissance d'émission permet au signal d'atteindre des distances plus importantes tout en restant au-dessus du seuil de sensibilité du récepteur.

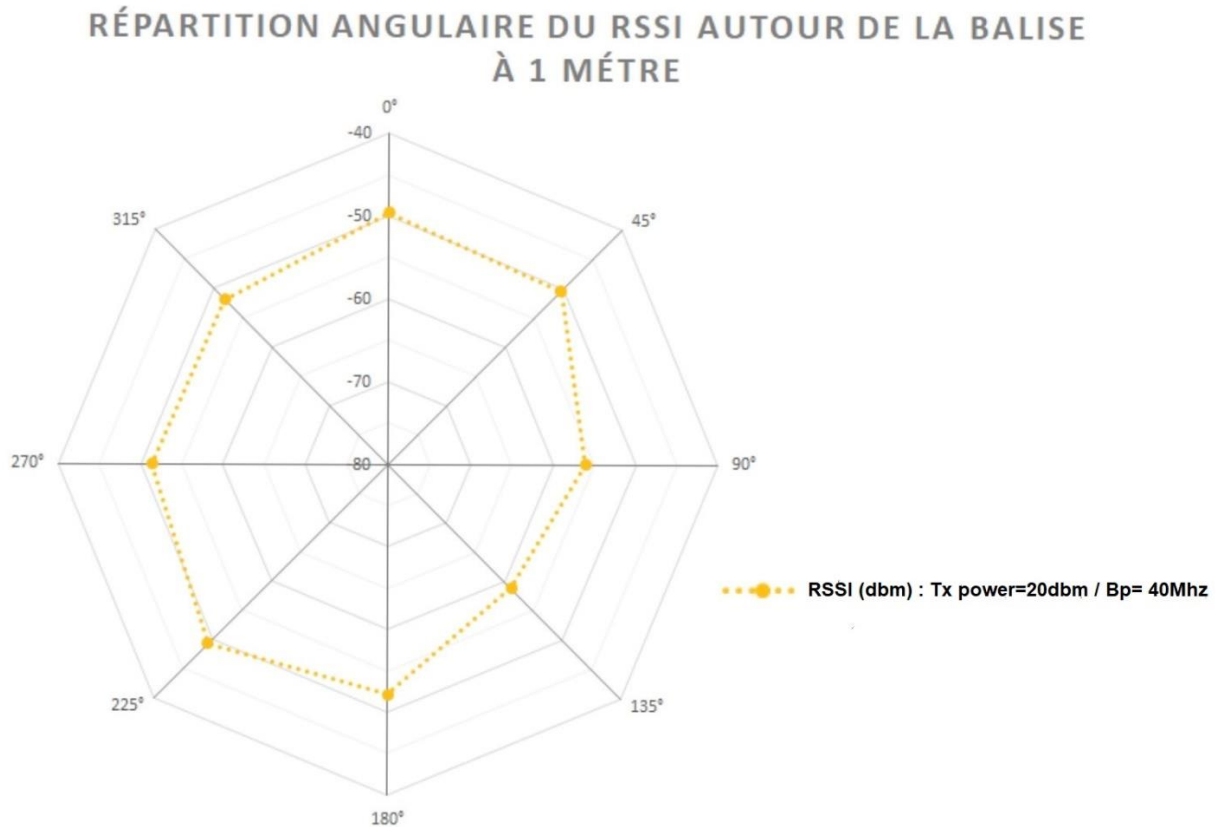


Figure IV.2: la variation du signal RSSI en fonction de l'angle de la première Balise.

2.2.2 MODIFICATION DE LA BANDE PASSANTE

L'étape suivante de notre investigation s'est concentrée sur l'impact de la bande passante (Bandwidth) du signal émis par la balise. La bande passante est inversement proportionnelle à la sensibilité du récepteur pour une puissance d'émission donnée ; une bande passante plus étroite concentre l'énergie dans une plage de fréquences plus réduite, ce qui peut améliorer la réception des signaux faibles. En réduisant la bande passante de 40 MHz à 20 MHz, tout en maintenant la puissance de transmission à 20 dBm, notre objectif était d'améliorer la sensibilité du tag et potentiellement d'accroître la portée effective du signal, tout en favorisant une réception plus stable et moins sujette aux variations angulaires.

Les mesures effectuées avec cette configuration optimisée ont révélé des résultats prometteurs. Non seulement les valeurs de RSSI étaient généralement plus élevées, mais la plage de variation angulaire s'est considérablement réduite. À 0° , nous avons enregistré une valeur de **-48,15 dB**. Les valeurs extrêmes se situaient désormais entre **-48,25 dB à 180°** et **-43,75 dB à 270°** , indiquant une distribution du signal plus homogène autour de la balise. L'amélioration du RSSI et la réduction de la variabilité angulaire suggèrent que la combinaison d'une puissance de transmission de 20 dBm et d'une bande passante de 20 MHz constitue une configuration plus robuste pour notre système de localisation. La cohérence des résultats obtenus avec les balises 2 et 3, configurées directement avec ces paramètres optimaux (par exemple, **-48,6 dB et -46,16 dB à 0°**), renforce la validité de cette configuration comme point de départ pour les phases ultérieures de développement et de déploiement du système.

Effet de la bande passante

La modification de la bande passante de 40 MHz à 20 MHz a également contribué aux différences observées. Une bande passante plus étroite concentre l'énergie du signal dans une plage de fréquences plus restreinte. Bien que cela ne change pas la puissance totale émise, cela peut avoir plusieurs effets bénéfiques pour la réception :

- **Réduction du bruit** : Un récepteur avec une bande passante plus étroite est moins susceptible de capter le bruit et les interférences qui se trouvent en dehors de cette bande. Cela peut améliorer le rapport signal/bruit (SNR) et donc la qualité du signal reçu, se traduisant par un RSSI apparent plus élevé ou plus stable.
- **Amélioration de la sensibilité** : Dans certains cas, une bande passante plus étroite peut améliorer la sensibilité du récepteur aux signaux faibles.

Dans nos tests, la réduction de la bande passante, combinée à une puissance d'émission plus élevée, semble avoir optimisé la réception du signal en réduisant la variabilité angulaire et en fournissant des valeurs de RSSI plus uniformes autour de la balise

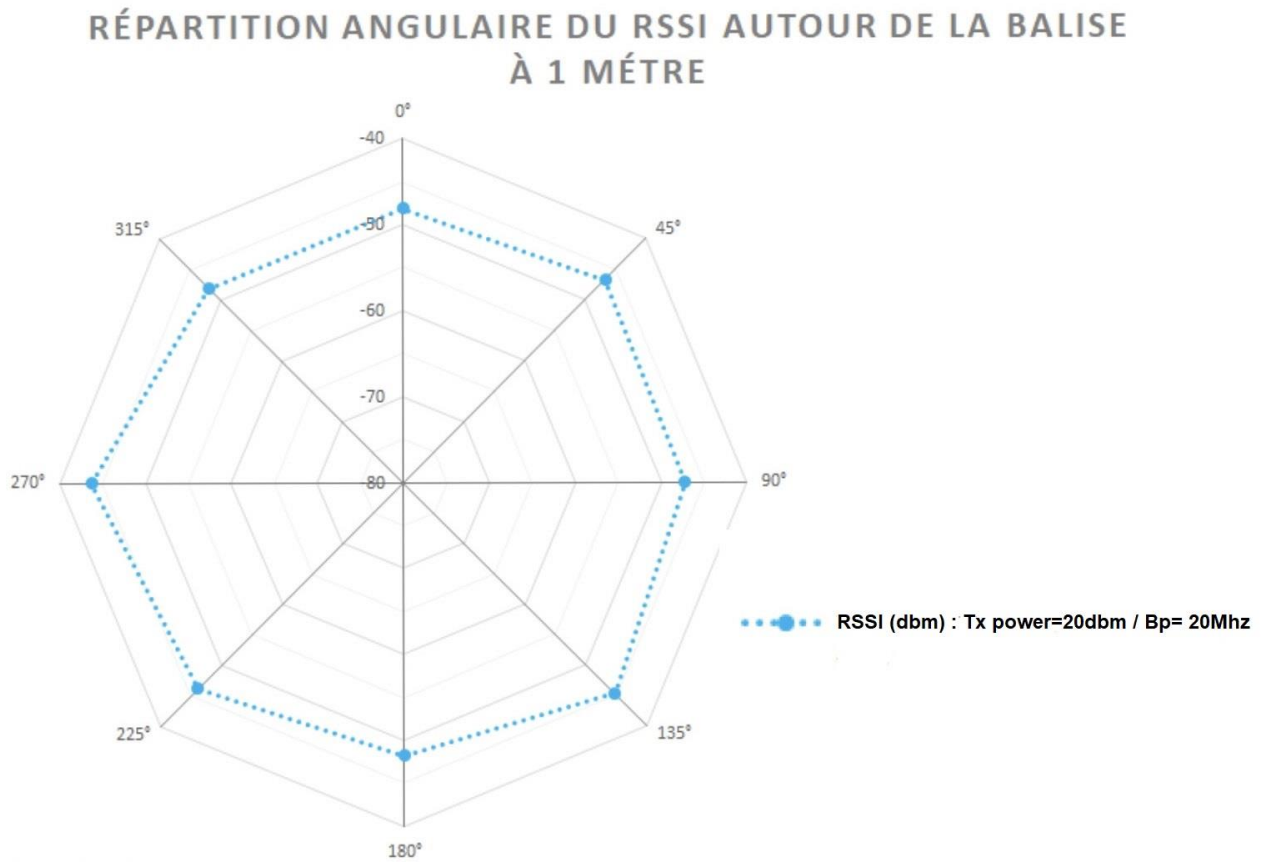


Figure IV.3: la variation du signal RSSI en fonction de l'angle de la première Balise.

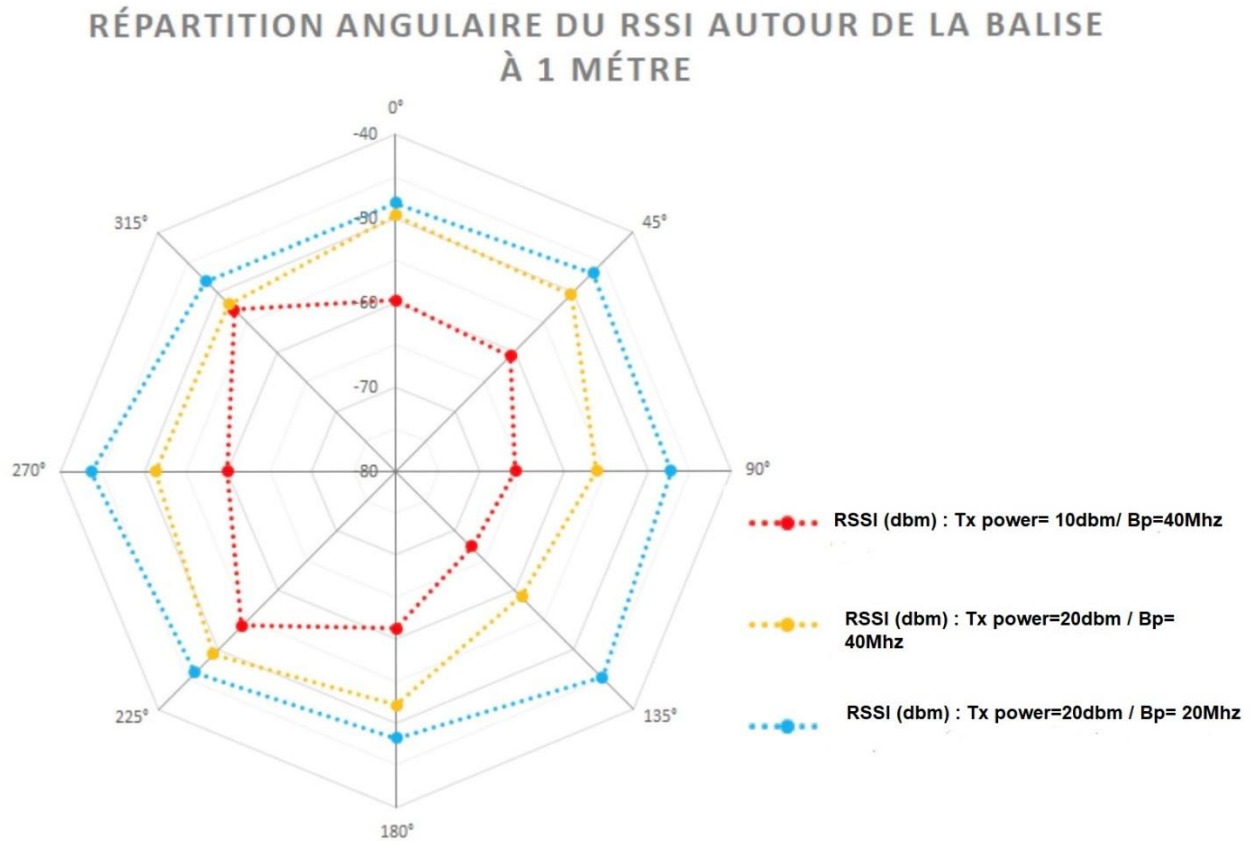


Figure IV.4 : Comparaison de la répartition angulaire du RSSI pour différentes configurations de la première balise.

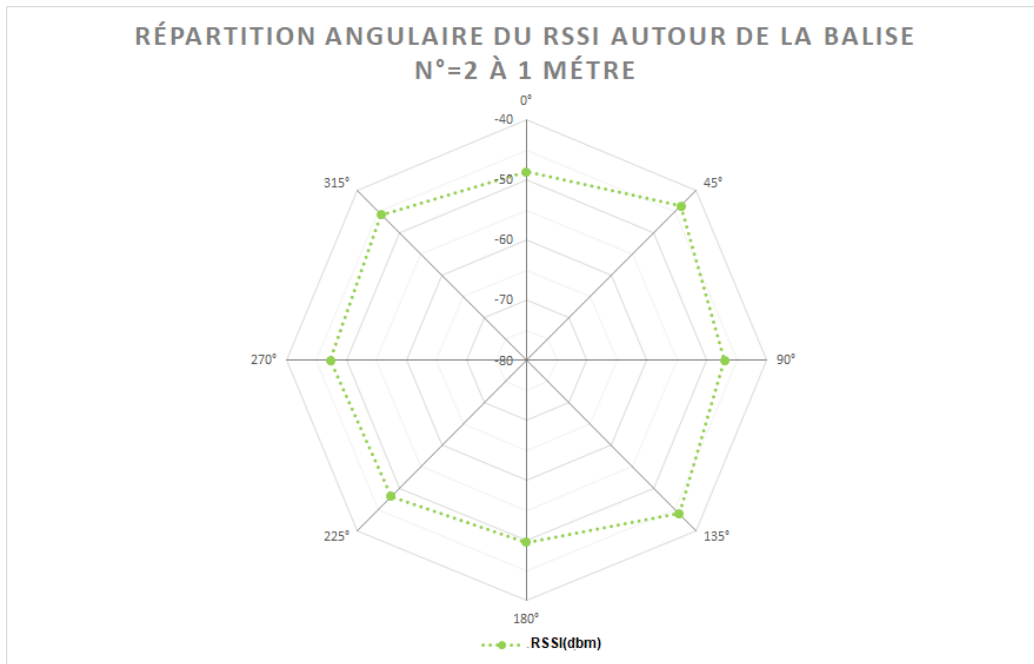


Figure IV.5: la variation du signal RSSI en fonction de l'angle de la deuxième Balise.

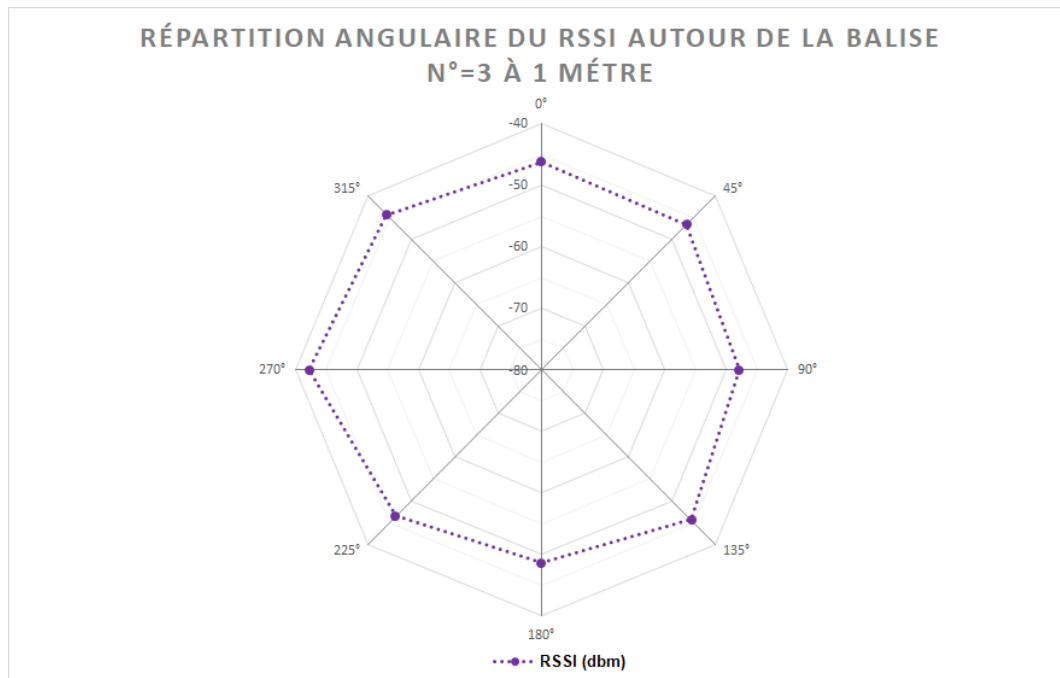


Figure IV.6: la variation du signal RSSI en fonction de l'angle de la troisième Balise.

2.3 COMPARAISON DES VALEURS DE RSSI MESUREES

Le tableau ci-dessous présente une comparaison des valeurs de RSSI mesurées lors des différentes étapes de test et pour différents angles. Les trois premières colonnes de données (après la colonne des angles) correspondent aux tests effectués sur la balise 1, illustrant l'impact des modifications successives des paramètres de puissance de transmission et de bande passante. Les deux dernières colonnes présentent les résultats obtenus directement avec les balises 2 et 3, sur lesquelles les paramètres optimaux (puissance de transmission de 20 dBm et bande passante de 20 MHz) ont été appliqués dès le départ.

Angle	B1-RSSI (dbm): Tx=10dbm, Bp=40Mhz	B1-RSSI (dbm): Tx=20dbm, Bp=40Mhz	B1-RSSI (dbm): Tx=20dbm, Bp=20Mhz	B2-RSSI (dbm): Tx=20dbm, Bp=20Mhz	B3-RSSI (dbm): Tx=20dbm, Bp=20Mhz
0°	-59.74	-49.6	-48.15	-48.6	-46.16
45°	-60.68	-50.42	-46.75	-43.66	-46.6
90°	-65.71	-56.05	-47.25	-46.98	-47.86
135°	-67.25	-58.88	-45.3	-44.02	-45.62
180°	-61.23	-52.12	-48.25	-49.77	-48.63
225°	-53.98	-49.26	-46.16	-48.05	-46.44
270°	-60	-51.37	-43.75	-47.31	-42.21
315°	-52.78	-51.94	-48.03	-45.76	-44.38

Tableau IV.1 : comparaison des valeurs de RSSI mesurées lors des différentes étapes de test et pour différents angles.

L'analyse du tableau met en évidence l'impact significatif des modifications apportées aux paramètres de la balise 1. L'augmentation de la puissance de transmission de 10 dBm à 20 dBm a permis d'améliorer globalement les valeurs de RSSI. De plus, la réduction de la bande passante de 40 MHz à 20 MHz a conduit à une nouvelle amélioration, se traduisant par des valeurs de RSSI plus élevées et potentiellement une plus grande stabilité du signal. Les résultats obtenus directement avec les balises 2 et 3, configurées avec les paramètres optimaux dès le départ, confirment l'efficacité de ces réglages.

Cette première phase de tests a été essentielle pour comprendre le comportement du signal RSSI en fonction des paramètres de la balise et de l'angle relatif entre la balise et le tag. Les ajustements effectués concernant la puissance de transmission et la bande passante ont permis d'identifier une configuration optimale pour notre système de localisation intérieure. Les valeurs de RSSI obtenues à un mètre en champ libre avec cette configuration serviront de base pour la calibration et le développement ultérieur du programme de localisation.

2.4 TEST VERTICAL DU RSSI A 1 METRE

Afin de compléter notre caractérisation de la propagation du signal autour de la balise, nous avons également mené une série de mesures du RSSI dans le plan vertical. L'objectif de ce test était d'évaluer si l'intensité du signal variait significativement en fonction de l'angle vertical par rapport à la balise, en conservant une distance horizontale constante d'un mètre. Cette information est importante pour comprendre la couverture tridimensionnelle du signal et pour identifier d'éventuelles zones de faiblesse ou de forte intensité dans le plan vertical.

La procédure expérimentale pour ce test vertical était similaire à celle utilisée pour le test angulaire horizontal. La balise Wi-Fi (Balise 1) était fixée à une hauteur donnée, et le tag mobile était positionné à un mètre de distance horizontale. Des mesures de RSSI ont été collectées à différents angles verticaux autour de la balise. Les angles testés étaient les suivants : 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° et 315° , où 0° correspond à un alignement horizontal entre la balise et le tag. La puissance de transmission de la balise était réglée sur 20 dBm et la bande passante sur 20 MHz, conformément aux paramètres optimaux identifiés lors des tests angulaires horizontaux.

Les résultats des mesures du RSSI en fonction de l'angle vertical sont présentés dans le tableau ci-dessous et visualisés sur la Figure 7 :

Angle	B1-RSSI (dbm):Tx=20dbm, Bp=20Mhz
0°	-48.56
45°	-45.98
90°	-47.45
135°	-44.81
180°	-55.23
225°	-55.41
270°	-43.75
315°	-48.32

Tableau IV.2 : résultats des mesures du RSSI en fonction de l'angle vertical.

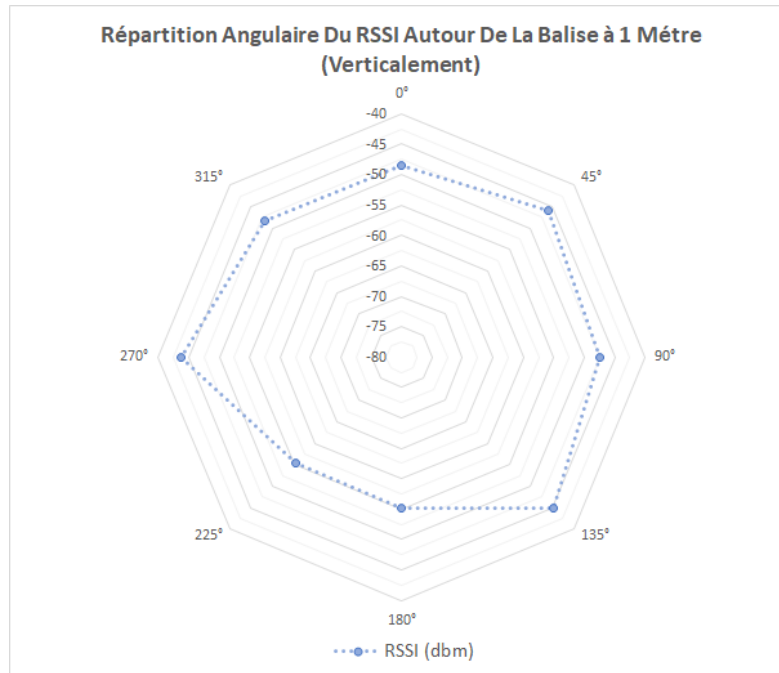


Figure IV.7 : Répartition Angulaire du RSSI Autour De La Balise à 1 Mètre (Verticalement).

L'analyse de ces résultats révèle une variation du RSSI en fonction de l'angle vertical, bien que la plage de variation (-43.75 dBm à -55.41 dBm) soit légèrement différente de celle observée dans le plan horizontal. On note une intensité de signal relativement forte autour des angles de 45°, 135° et 270°, tandis que le signal semble plus faible autour des angles de 180° et 225°

(principalement sous la balise). La valeur de RSSI à 0° (-48.56 dBm) est cohérente avec les mesures horizontales.

Ces observations soulignent que la propagation du signal n'est pas isotrope et que la force du signal reçu par le tag peut varier en fonction de son orientation tridimensionnelle par rapport à la balise. Ces informations seront prises en compte lors de la conception et de l'étalonnage des algorithmes de localisation pour minimiser les erreurs potentielles dues à cette anisotropie du signal.

3. ETAPE 2 : DETERMINATION DE L'EXPOSANT D'AFFAIBLISSEMENT DU TRAJET (PATH LOSS EXPONENT)

Pour estimer l'exposant d'affaiblissement du trajet (path loss exponent, noté n), nous avons utilisé la relation fondamentale qui décrit la décroissance du RSSI avec la distance. Cette relation peut être exprimée par la formule suivante :

$$n = \frac{\text{RSSI}(d_1) - \text{RSSI}(d_2)}{10 \cdot \log_{10} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} \dots\dots\dots(3)$$

où $\text{RSSI}(d_1)$ et $\text{RSSI}(d_2)$ sont les valeurs du RSSI mesurées aux distances d_1 et d_2 respectivement. L'exposant n quantifie le taux auquel la puissance du signal diminue avec l'augmentation de la distance. Une valeur de $n=2$ correspond à une propagation en espace libre, tandis que des valeurs supérieures indiquent un affaiblissement plus rapide dû aux obstacles et aux réflexions.

3.1 OBJECTIFS ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Une étape cruciale pour affiner la précision de notre système de localisation consiste à caractériser l'affaiblissement du signal radio en fonction de la distance dans les environnements spécifiques où le système sera déployé. Cet affaiblissement, modélisé par l'exposant d'affaiblissement du trajet (path loss exponent, noté n), dépend fortement des caractéristiques de l'environnement telles que la présence d'obstacles, les matériaux de construction et les réflexions.

Pour cette étude, des tests ont été réalisés dans plusieurs types d'espaces intérieurs pertinents pour notre application : un bureau, une salle, un hall et un couloir. L'objectif est de déterminer la valeur de n propre à chacun de ces environnements, afin de calibrer le modèle de perte de signal de manière plus précise et adaptée au contexte réel d'utilisation du système.

Pour estimer l'exposant de perte de trajet dans chaque zone, une balise Wi-Fi a été placée à un emplacement fixe. Le module mobile a ensuite enregistré des mesures de RSSI à différentes distances de la balise : 3 mètres, 5 mètres, 7 mètres et 9 mètres. Cela a permis d'observer l'évolution de la puissance du signal en fonction de la distance, et ainsi de déduire la valeur de n correspondant à chaque environnement.

Il est important de noter que dans les environnements intérieurs complexes, le comportement du signal n'est pas toujours parfaitement prévisible. Le RSSI ne décroît pas de manière régulière avec la distance, car des phénomènes tels que les réflexions sur les murs, les diffractions autour des objets ou encore l'absorption par certains matériaux peuvent provoquer des variations irrégulières, voire localement une augmentation du signal. Ces effets ont été pris en compte dans l'analyse pour garantir une modélisation plus fidèle à la réalité.

3.2 RESULTATS OBTENUS DANS DIFFERENTS ENVIRONNEMENTS

Le tableau ci-dessous résume les valeurs de RSSI mesurées à différentes distances dans les quatre environnements étudiés, ainsi que l'exposant d'affaiblissement du trajet (n) calculé pour chaque intervalle de distance et la valeur moyenne de n pour chaque zone :

Zone	à 3 mètre		à 5 mètre		à 7 mètre		à 9 mètre		η moyen
	RSSI (dbm)	η	RSSI (dbm)	η	RSSI (dbm)	η	RSSI (dbm)	η	
Bureau	-64.1	3.64	-74.3	3.94	-79	3.8	-81.4	3.6	3.75
Salle	-62.4	3.29	-67.9	3.03	-71.4	2.92	-75.2	2.98	3.06
Hall	-59.3	2.64	-64.4	2.53	-67.7	2.48	-74.6	2.92	2.64
Couloir	-57.3	2.22	-61.7	2.14	-64.5	2.01	-67.2	2.14	2.13

Tableau IV.3 : les valeurs de RSSI mesurées à différentes distances dans les quatre environnements étudiés

Pour visualiser la comparaison des exposants d'affaiblissement moyens obtenus dans chaque zone, le graphique suivant présente les valeurs moyennes de n pour le bureau, la salle, le hall et le couloir :

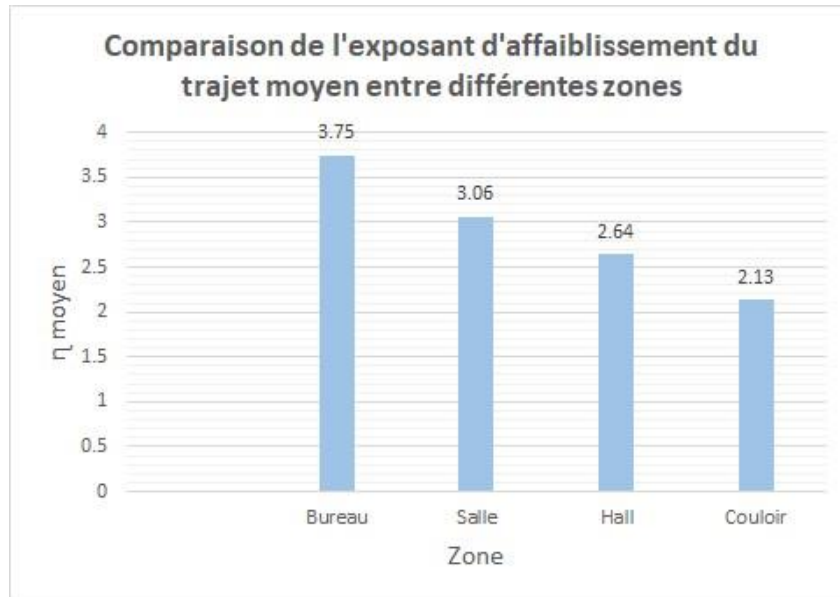


Figure IV.8 : Comparaison de l'exposant d'affaiblissement du trajet moyen entre le bureau, la salle, le hall et le couloir.

Ce graphique met clairement en évidence que l'affaiblissement du signal est en moyenne plus important dans le bureau, suivi par la salle, puis le hall, et qu'il est le plus faible dans le couloir. Ces différences soulignent l'influence significative de l'environnement sur la propagation des ondes radio.

3.2.1 ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats présentés dans le tableau mettent en évidence que l'exposant d'affaiblissement du trajet (n) varie considérablement d'un environnement à l'autre. Pour visualiser plus clairement la variation de l'exposant d'affaiblissement en fonction de la distance dans chaque zone, des graphiques ont été générés :

- Bureau :

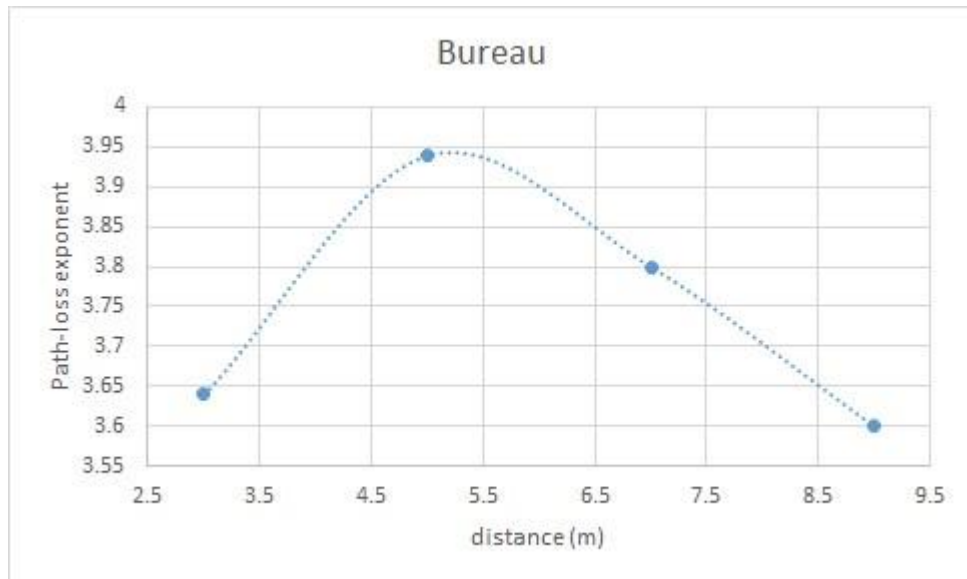


Figure IV.9 : Variation de l'exposant d'affaiblissement du trajet en fonction de la distance dans le bureau.

D'après le graphique Figure IV.9, on observe une variation significative de l'exposant d'affaiblissement du signal (n) en fonction de la distance, avec un pic notable autour de 5 mètres. Cette observation suggère que l'affaiblissement du signal n'est pas uniforme et pourrait être influencé par des éléments spécifiques tels que le mobilier ou la disposition du bureau. L'exposant d'affaiblissement moyen est de 3.75, ce qui indique un affaiblissement du signal plus rapide avec la distance comparativement à un espace en champ libre (où $n \approx 2$). La présence de mobilier, de murs et potentiellement d'autres équipements électroniques dans l'environnement contribue probablement à une absorption et une réflexion accrues du signal, expliquant ainsi cet affaiblissement plus rapide.

- Salle :

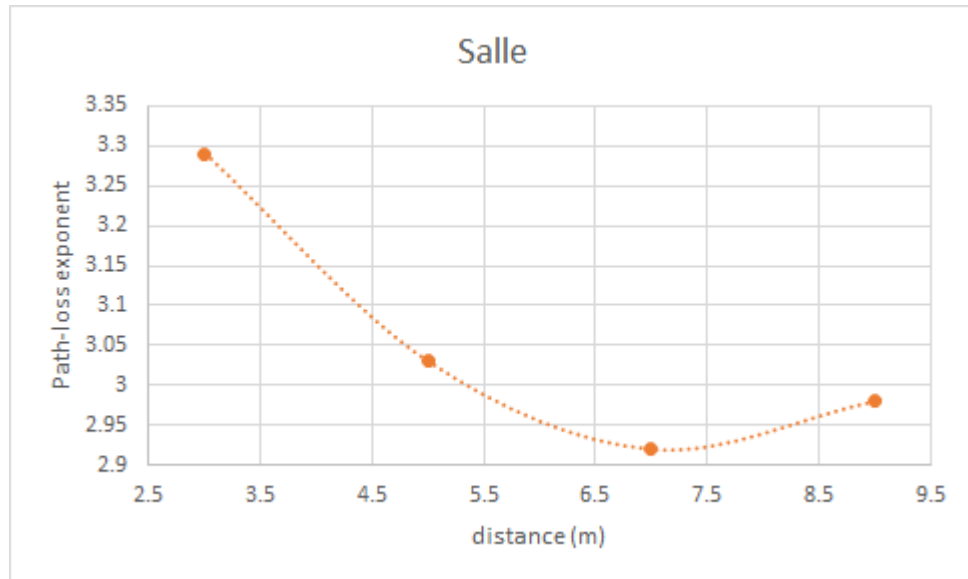


Figure IV.10 : Variation de l'exposant d'affaiblissement du trajet en fonction de la distance dans la salle.

Selon la Figure IV.10, l'exposant d'affaiblissement du signal (n) présente initialement une diminution suivie d'une légère remontée. Ce comportement pourrait s'expliquer par la présence de zones où les réflexions du signal contribuent de manière plus importante à sa réception, ce qui modifie le taux d'affaiblissement apparent. Avec une valeur moyenne de n de 3.06, l'affaiblissement du signal dans la salle est également significatif, bien que légèrement inférieur à celui observé dans le bureau. La taille et la configuration spécifiques de la salle, ainsi que les matériaux qui la composent, jouent un rôle dans la détermination de cette valeur d'affaiblissement.

- **Hall :**

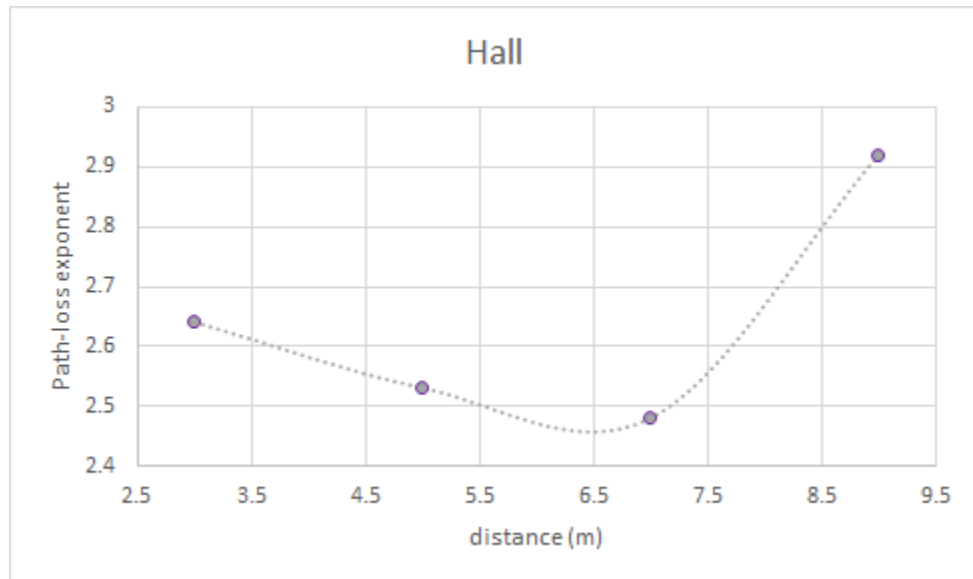


Figure IV.11: Variation de l'exposant d'affaiblissement du trajet en fonction de la distance dans le hall.

Le graphique IV.11 montre une fluctuation de l'exposant d'affaiblissement du signal (n) avec une tendance générale à la baisse suivie d'une remontée dans le hall. L'exposant d'affaiblissement moyen dans cet espace est de 2.64, ce qui indique un affaiblissement moins prononcé que celui observé dans le bureau ou la salle. Cette différence peut s'expliquer par la configuration souvent plus ouverte d'un hall, qui présente moins d'obstacles directs entre l'émetteur et le récepteur. Cependant, cette configuration ouverte pourrait également entraîner des interactions complexes du signal avec les murs et les ouvertures, contribuant ainsi aux fluctuations observées.

- Couloir :

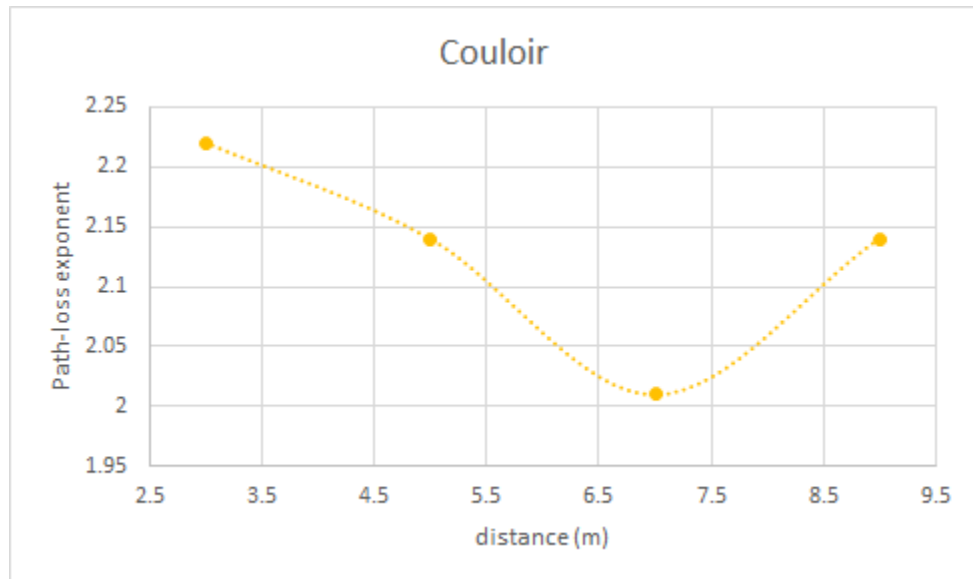


Figure IV.12: Variation de l'exposant d'affaiblissement du trajet en fonction de la distance dans le couloir.

La Figure IV.12 révèle une relative stabilité de l'exposant d'affaiblissement du signal (n) dans le couloir, avec une légère augmentation observée à la distance maximale. L'exposant d'affaiblissement moyen dans le couloir est le plus faible des environnements étudiés, avec une valeur de 2.13. Cette faible valeur suggère que les couloirs, en agissant dans une certaine mesure comme des guides d'ondes, peuvent permettre au signal de se propager plus efficacement sur de plus longues distances avec moins de perte. Cependant, comme mentionné précédemment, des réflexions du signal aux extrémités du couloir pourraient influencer et potentiellement modifier l'affaiblissement à des distances plus importantes, expliquant ainsi la légère augmentation observée à la distance maximale.

- Afin de comparer directement la variation de l'exposant d'affaiblissement du trajet en fonction de la distance dans les différents environnements étudiés, le graphique

suivant présente une superposition des courbes pour le bureau, la salle, le hall et le couloir :

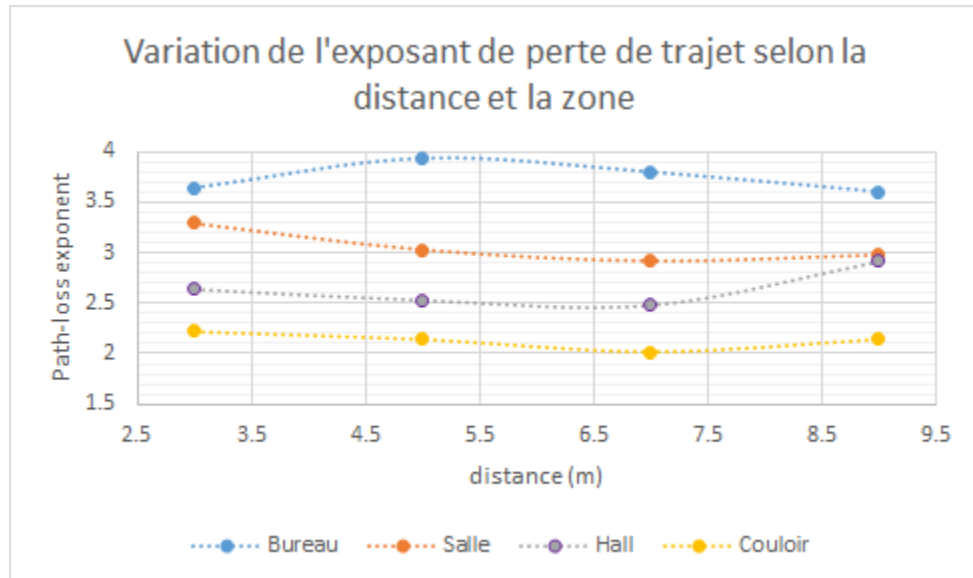


Figure IV.13: Comparaison de la variation de l'exposant d'affaiblissement du trajet en fonction de la distance.

L'examen de ce graphique comparatif révèle des différences notables dans le comportement de l'exposant d'affaiblissement selon la zone. On observe que l'affaiblissement dans le bureau tend à être plus élevé sur les distances considérées, tandis que le couloir présente un affaiblissement généralement plus faible. La salle et le hall montrent des comportements intermédiaires avec des variations spécifiques en fonction de la distance. Ces différences soulignent l'importance de caractériser l'environnement de propagation pour une modélisation précise du signal.

3.3 IMPORTANCE DE L'EXPOSANT D'AFFAIBLISSEMENT POUR LA LOCALISATION

La connaissance précise de l'exposant d'affaiblissement du trajet pour chaque environnement est essentielle pour améliorer la précision de la localisation basée sur le

RSSI. En utilisant un modèle d'affaiblissement du trajet adapté à chaque zone (par exemple, en utilisant la formule :

$$RSSI = RSSI_{ref} - 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d/d_{ref}) \dots\dots(4)$$

où $RSSI_{ref}$ est le RSSI à une distance de référence d_{ref} , nous pouvons convertir les mesures de RSSI en estimations de distance plus fiables. L'utilisation d'une valeur d' n incorrecte, en particulier si l'on suppose un affaiblissement en espace libre ($n \approx 2$) dans des environnements intérieurs denses, conduirait à des erreurs significatives dans l'estimation des distances et, par conséquent, dans la précision de la localisation.

Pour illustrer concrètement l'impact crucial d'une calibration adéquate de l'exposant de perte de trajet (n) en fonction de l'environnement, considérons les résultats présentés dans le tableau suivant :

distance réelle (m)	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
distance mesurée avec $n=3$	0.18	1.16	2.15	2.71	6.81	8.25	11.65	15.84	23.26	28.18	29.28
distance mesurée avec $n=3.75$	0.25	1.13	1.8	2.22	4.64	5.41	7.13	9.12	12.39	14.45	14.9

Tableau IV.4 : Comparaison des valeurs de distances avant et après la calibration du n .

Dans la première ligne, où l'exposant de perte de trajet est fixé à une valeur de 3, qui ne correspond manifestement pas aux caractéristiques de l'environnement de test, on observe une dégradation rapide de la précision de l'estimation de la distance à mesure que la distance réelle augmente. La zone prédictible, où l'erreur reste raisonnable, est très limitée. Au-delà de 4 mètres, l'erreur devient excessivement importante, rendant les estimations inutilisables pour une localisation précise.

En revanche, la deuxième ligne montre une amélioration significative de la précision lorsque l'exposant de perte de trajet est ajusté à une valeur de 3.75, qui semble mieux correspondre aux propriétés de propagation du signal dans l'environnement de test spécifique (un bureau dans notre

cas, comme déterminé précédemment). La zone prédictible s'étend désormais de 1 mètre jusqu'à environ 7 mètres, offrant une plage beaucoup plus large où les estimations de distance restent relativement fiables.

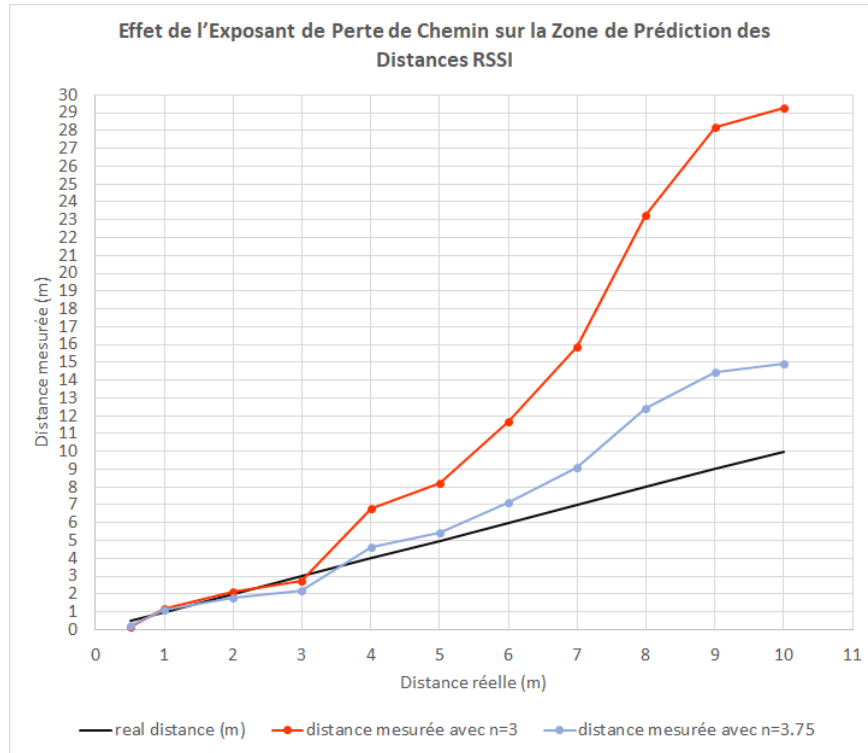


Figure IV.14: Effet de l'Exposant de Perte de Chemin sur la Zone de Prédiction des Distances RSSI.

Ce graphique illustre clairement l'impact de la calibration de l'exposant de perte de trajet sur la précision de l'estimation de la distance en fonction de la distance réelle. La courbe rouge, représentant les distances mesurées avec un exposant de $n=3$ (non calibré pour l'environnement), s'éloigne rapidement de la ligne noire représentant la distance réelle, indiquant une erreur croissante et une zone de prédiction limitée à de courtes distances.

En revanche, la courbe bleue, correspondant aux distances mesurées avec un exposant de $n=3.75$ (mieux calibré pour l'environnement de bureau), suit de manière beaucoup plus fidèle la ligne de la distance réelle sur une plage de distances plus étendue, s'étendant jusqu'à environ 7

mètres. Au-delà de cette distance, une surestimation commence à apparaître, mais elle reste significativement inférieure à l'erreur observée avec l'exposant non calibré.

Ce comparatif met en évidence que l'utilisation d'un modèle de perte de trajet avec un exposant mal calibré peut entraîner des erreurs considérables dans l'estimation de la distance, limitant sévèrement la portée et la fiabilité du système de localisation. Une calibration soignée de l'exposant de perte de trajet en fonction des spécificités de l'environnement est donc une étape indispensable pour obtenir des performances de localisation acceptables.

3.4 ANALYSE DU RSSI

Afin de visualiser l'évolution du RSSI en fonction de la distance dans les différents environnements étudiés, le graphique suivant présente les valeurs mesurées pour le bureau, la salle, le hall et le couloir :

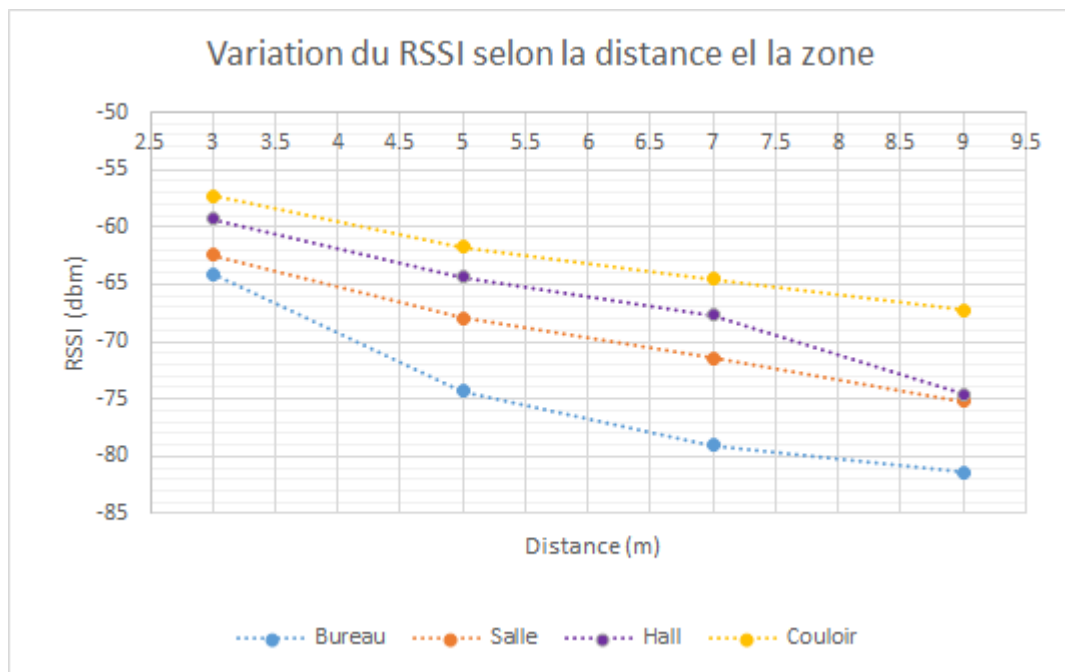


Figure IV.15: Comparaison du RSSI en fonction de la distance.

L'observation de ce graphique révèle que le niveau de RSSI initial (à 3 mètres) varie selon la pièce, et que la vitesse de décroissance du signal avec la distance est également différente, ce qui se traduit par les valeurs d'exposant d'affaiblissement variables que nous avons analysées précédemment. Par exemple, on peut noter que le RSSI dans le couloir tend à rester plus élevé sur les distances considérées par rapport au bureau, indiquant un meilleur maintien de la force du signal.

Il est crucial de souligner la non-linéarité du RSSI observée lors des mesures. L'exposant d'affaiblissement n a été calculé entre chaque paire de points de distance, et l'on constate de légères variations de sa valeur au sein d'un même environnement. Ces fluctuations peuvent être attribuées aux interférences constructives et destructives des ondes radio réfléchies, ainsi qu'à l'absorption et à la diffraction causées par des éléments spécifiques présents dans chaque zone.

4. ETAPE 3 : OPTIMISATION DE LA PRECISION DES ESTIMATIONS DE DISTANCE AVEC FILTRAGE DU SIGNAL

4.1 OBJECTIFS ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

L'objectif de cette expérimentation était d'améliorer la stabilité et la précision des estimations de distance basées sur le RSSI en utilisant une seule balise, grâce à l'application de techniques de filtrage numérique. En environnement réel, les mesures de l'Indicateur de Force du Signal Reçu (RSSI) sont fortement sujettes à des variations causées par le bruit, les interférences électromagnétiques, et les limites matérielles des composants radio. Ces fluctuations dégradent la fiabilité du système de localisation basé sur ces données.

Afin d'atténuer ces effets indésirables, deux filtres simples mais performants ont été testés : le filtre médian, qui supprime les valeurs aberrantes en sélectionnant la valeur centrale d'un ensemble trié, et la moyenne mobile pondérée (WMA), qui accorde un poids plus élevé aux mesures récentes tout en conservant une mémoire des valeurs précédentes. Ces filtres ont été appliqués aux données RSSI brutes pour en lisser la courbe et améliorer la cohérence des distances estimées.

Il convient de souligner que le module utilisé comme tag dans cette expérimentation présentait une sensibilité inférieure à celle mesurée par un analyseur de spectre. Lors d'un test de comparaison à 1 mètre de distance, le RSSI mesuré avec l'analyseur était de -46 dBm, tandis que le tag indiquait -64 dBm, soit une différence notable de 18 dBm. Cette faiblesse du récepteur a été prise en compte lors de l'interprétation des résultats.

Le test a été réalisé dans un bureau, avec une balise Wi-Fi émettrice fixée à un point et un tag positionné à 2 mètres. Les mesures de RSSI ont été collectées à des intervalles de deux secondes. Pour introduire des perturbations contrôlées, une feuille d'aluminium a été déplacée devant puis derrière le tag entre $t = 8$ s et $t = 30$ s. Lorsque la feuille était placée devant le tag, une atténuation du signal a été observée, tandis que lorsqu'elle était placée derrière, une légère réflexion a entraîné une augmentation temporaire de l'intensité du signal.

Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des valeurs de RSSI mesurées, ainsi que les résultats obtenus après l'application des deux filtres, afin de permettre une comparaison visuelle de leur efficacité sur la stabilisation du signal.

Temps (s)	RSSI Brut (dBm)	Sortie du Filtre Médian (dBm)	Sortie du Filtre Moyenne Mobile Pondérée (dBm)
2	-55.98		
4	-53.56		
6	-51.79		
8	-62.25		
10	-53.6	-53.6	-55.7
12	-50.48	-53.56	-54.05
14	-61.32	-53.6	-56.37
16	-57.68	-57.68	-56.97
18	-60.44	-57.68	-58.1
20	-59.35	-59.35	-58.98
22	-52.94	-59.35	-57.34
24	-51.56	-57.68	-55.08
26	-64.1	-59.35	-57.65
28	-56.45	-56.45	-57.24
30	-51	-52.94	-55.28
32	-54.32	-54.32	-54.98
34	-57.13	-56.45	-55.53
36	-60.2	-56.45	-56.73
38	-58.41	-57.13	-57.59
40	-58.81	-58.41	-58.46
42	-74.01	-58.81	-63.87
44	-58.5	-58.81	-62.8
46	-59.56	-58.81	-61.99
48	-58.61	-58.81	-60.91
50	-56.32	-58.61	-59.05
52	-56.98	-58.5	-57.58
54	-54.31	-56.98	-56.35
56	-57.35	-56.98	-56.41
58	-58.05	-56.98	-56.86
60	-58.03	-57.35	-57.33

Tableau IV.5 : Comparaison des valeurs de RSSI brutes et filtrées.

Il est à noter que les résultats des filtres ne sont disponibles qu'à partir de la 10^{ème} seconde. Ceci est dû à une configuration dans notre code où le tag attend de collecter cinq valeurs initiales de RSSI avant de commencer l'application des filtres et le calcul de la sortie.

4.2 EFFET DU FILTRE MEDIAN

L'application du Filtre Médian permet d'atténuer efficacement l'impact des pics soudains dans les mesures de RSSI brutes. Par exemple, on observe qu'à la 42^{ème} seconde, après l'introduction d'une éponge absorbant le signal, une valeur de RSSI brut de -74.01 dBm, qui représente une chute abrupte du signal, est significativement réduite dans la sortie du Filtre Médian (-58.81 dBm). Cette capacité à ne pas prendre en considération les pics isolés rend le Filtre Médian particulièrement utile dans les configurations statiques ou semi-statiques où la stabilité du signal est attendue, et où des valeurs aberrantes occasionnelles ou des obstructions temporaires pourraient induire des erreurs dans les estimations de distance.

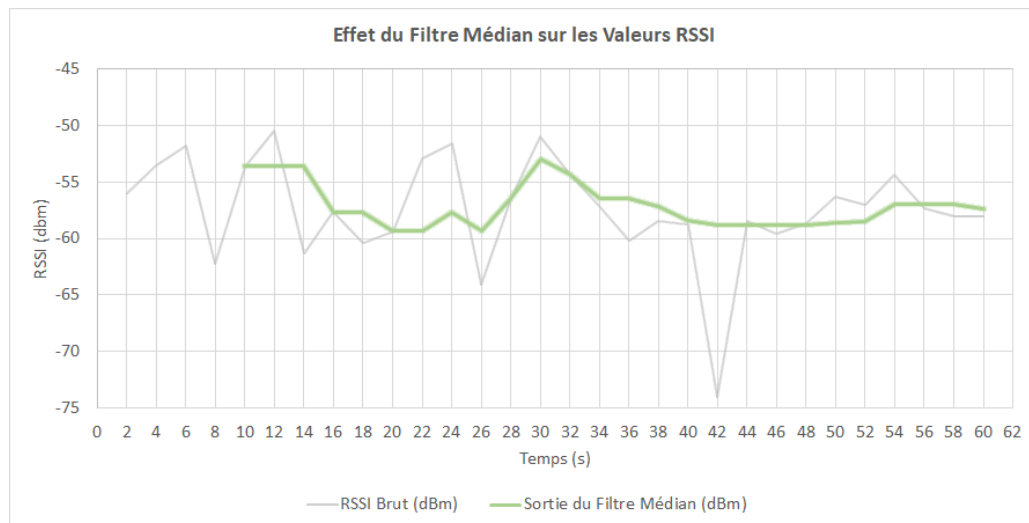


Figure IV.16: Atténuation des fluctuations du RSSI brut par l'application du Filtre Médian.

Ce graphique illustre l'effet du Filtre Médian sur les mesures brutes du RSSI au fil du temps. La ligne grise représente les valeurs de RSSI non filtrées, qui présentent des

fluctuations importantes et des pics soudains, caractéristiques du bruit environnemental et des interférences. La ligne verte représente la sortie du Filtre Médian. On observe que le filtre parvient à lisser considérablement le signal brut en atténuant les pics abrupts (comme celui visible autour de la 42ème seconde) et les variations rapides. La sortie du filtre suit la tendance générale du signal sous-jacent de manière plus stable et cohérente. Cela démontre l'efficacité du Filtre Médian pour améliorer la qualité des données de RSSI en supprimant les valeurs aberrantes qui pourraient induire des erreurs dans les estimations de distance. Le lissage obtenu facilite une interprétation plus fiable de la force du signal et contribue à une meilleure précision du système de localisation.

Lors de nos tests avec le Filtre Médian, nous avons cependant constaté qu'il présentait une certaine lenteur de réaction aux changements rapides du signal, introduisant un léger délai. C'est pourquoi nous avons décidé d'explorer l'utilisation de la Moyenne Mobile Pondérée (WMA).

4.3 EFFET DE LA MOYENNE MOBILE PONDÉREE (WMA)

La Moyenne Mobile Pondérée (WMA) se distingue par sa rapidité de calcul et sa capacité à suivre les nouvelles valeurs de RSSI. Lors de nos tests, bien que le tag soit resté statique, cette caractéristique serait particulièrement avantageuse dans des scénarios de déplacement. Contrairement au Filtre Médian qui peut introduire un léger délai en raison de la nécessité de trier les valeurs dans la fenêtre, la WMA réagit plus promptement aux changements du signal. On peut observer dans le tableau que la WMA produit une sortie lissée qui suit la tendance générale du RSSI brut tout en atténuant les fluctuations rapides.

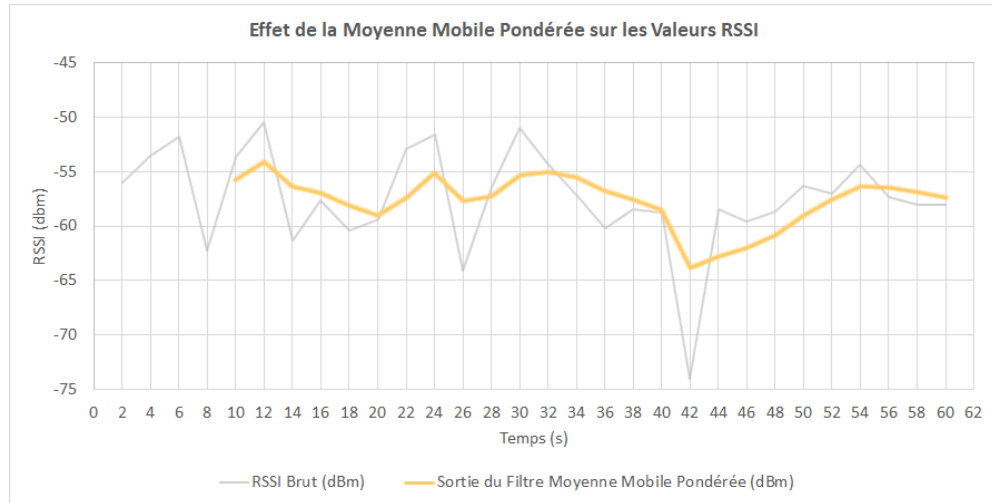


Figure IV.17: l'effet de la Moyenne Mobile Pondérée (WMA) sur les mesures brutes du RSSI au fil du temps.

Ce graphique illustre l'effet de la Moyenne Mobile Pondérée (WMA) sur les mesures brutes du RSSI au fil du temps. La ligne grise représente le signal RSSI brut, caractérisé par sa volatilité et ses variations rapides. La ligne jaune représente la sortie du filtre WMA. On observe que la WMA produit un signal lissé qui suit la tendance générale du RSSI brut tout en atténuant les fluctuations à haute fréquence. Contrairement au Filtre Médian qui se concentre sur la suppression des valeurs extrêmes, la WMA effectue une moyenne pondérée des valeurs récentes, ce qui permet une réaction plus prompte aux changements du signal, même si le lissage peut être moins prononcé en cas de pics isolés. Ce type de filtrage est particulièrement utile dans les scénarios où l'objet à localiser est en mouvement, car il réduit le bruit tout en conservant une certaine réactivité aux variations de la force du signal dues au déplacement.

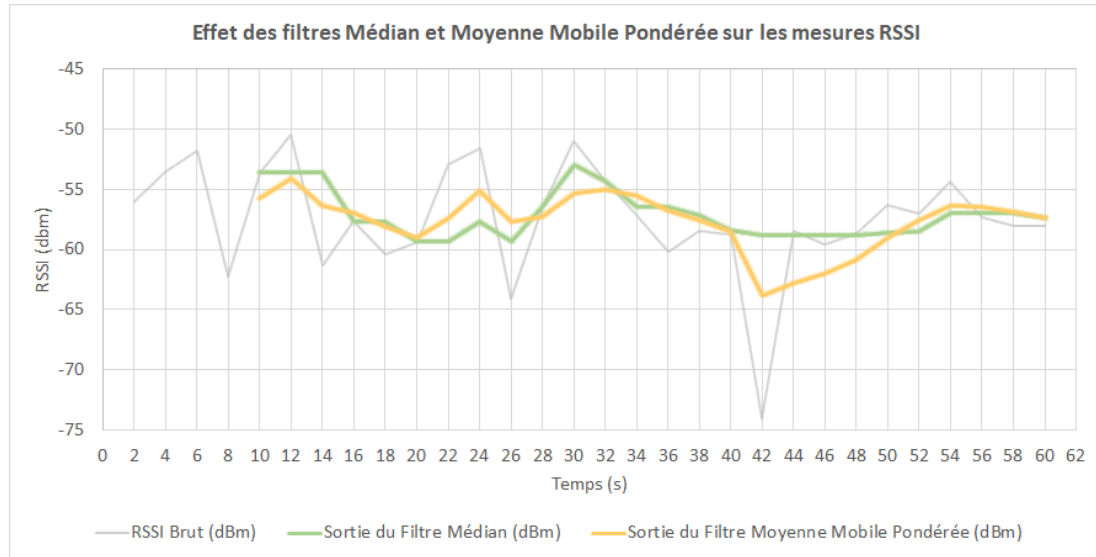


Figure IV.18: Comparaison de l'Effet des Filtres Médian et Moyenne Mobile Pondérée sur les Mesures RSSI.

Ce graphique superpose l'effet du Filtre Médian (ligne verte) et de la Moyenne Mobile Pondérée (WMA, ligne jaune) sur le signal RSSI brut (ligne grise) au fil du temps. On peut observer visuellement comment chaque filtre contribue à la réduction du bruit et à la stabilisation du signal. Le Filtre Médian se montre particulièrement efficace pour éliminer les pics soudains et les valeurs aberrantes, produisant une ligne plus "étagée" qui ignore les fluctuations extrêmes. La Moyenne Mobile Pondérée (WMA), quant à elle, offre un lissage plus continu du signal brut. Elle réagit plus rapidement aux changements de tendance que le Filtre Médian, mais peut laisser passer certaines fluctuations plus douces. On remarque que la ligne jaune suit de plus près les variations générales du signal brut, tout en réduisant son amplitude. La comparaison directe des sorties des deux filtres révèle leurs caractéristiques distinctes : le Filtre Médian pour la robustesse face aux pics isolés, et la WMA pour un lissage plus général et une meilleure réactivité aux changements progressifs du signal. Le choix du filtre le plus approprié dépendra des spécificités du bruit présent dans l'environnement et des exigences de l'application en termes de réactivité et de stabilité.

4.4 ÉVALUATION DE L'IMPACT DES FILTRES SUR L'ESTIMATION DE LA DISTANCE

Afin de quantifier l'effet des filtres sur la précision de l'estimation de la distance, nous avons effectué une série de tests en utilisant une seule balise et en comparant les distances mesurées avec et sans l'application des filtres. Le tableau ci-dessous présente les distances réelles par rapport à la balise et les distances estimées par le système après l'application du Filtre Médian et de la Moyenne Mobile Pondérée (WMA) :

distance réelle (m)	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
distance mesurée avec filtre médian (m)	0.21	1.06	2.22	2.82	3.86	5.42	5.96	8.64	9.89	12.63	13.8
distance mesurée avec moyenne mobile pondérée (m)	0.29	1.08	2.44	3.42	4.33	4.76	6.53	8.89	10.25	12.48	14.65

Tableau IV.6 : Comparaison des distances réelles et mesurées après application du Filtre Médian et de la Moyenne Mobile Pondérée.

4.4.1. EFFET DU FILTRE MEDIAN SUR L'ESTIMATION DE LA DISTANCE

La ligne verte du tableau illustre l'impact de l'application du Filtre Médian sur l'estimation de la distance. Sans l'utilisation de filtre, notre système était susceptible de produire des estimations erronées en présence de pics de bruit dans les mesures de RSSI. L'application du Filtre Médian permet d'ignorer ces valeurs aberrantes lors du calcul de la distance, conduisant ainsi à une estimation finale plus précise et stable en l'absence de mouvements rapides.

4.4.2. COMPARAISON AVEC LA MOYENNE MOBILE PONDEREE (WMA)

La ligne jaune du tableau présente les résultats obtenus en appliquant la Moyenne Mobile Pondérée (WMA) pour l'estimation de la distance. Bien que donnant des résultats

globalement similaires dans ce test principalement statique, la WMA est conçue pour être plus réactive aux changements de signal, ce qui serait avantageux dans des scénarios dynamiques.

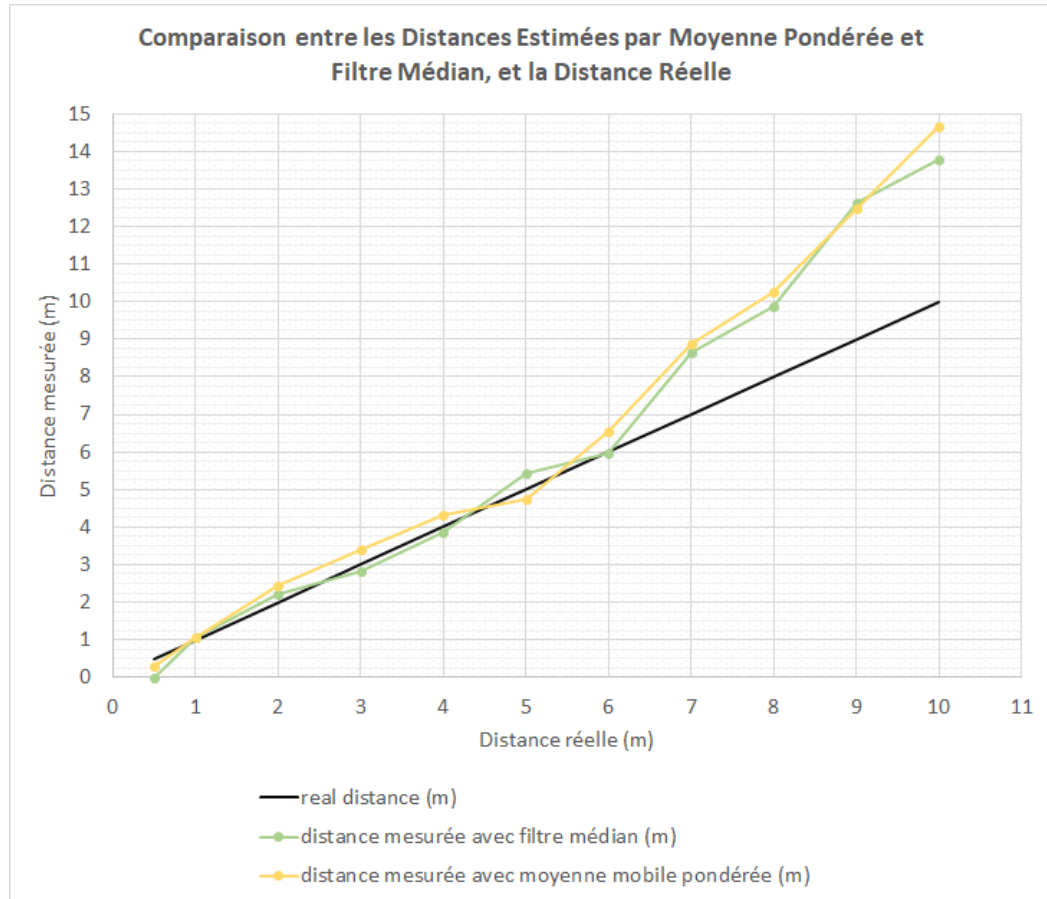


Figure IV.19: Comparaison entre les distances réelles et les distances estimées à l'aide du Filtre Médian et de la Moyenne Mobile Pondérée (WMA).

La Figure IV.19 illustre la déviation des distances estimées par rapport à la distance réelle pour chaque filtre. On observe que l'application des deux filtres améliore la cohérence des estimations de distance en réduisant l'influence des fluctuations du RSSI. Le Filtre Médian s'est avéré particulièrement efficace pour atténuer l'impact des valeurs aberrantes, conduisant à une meilleure précision en l'absence de mouvements rapides. La Moyenne Mobile Pondérée, bien que donnant des résultats globalement similaires dans ce

test principalement statique, serait plus avantageuse dans des scénarios dynamiques en assurant une meilleure réactivité aux changements de signal.

4.4.3 COMPROMIS ENTRE LES DEUX FILTRES

Nos observations suggèrent que le Filtre Médian est particulièrement efficace pour améliorer la précision de l'estimation de distance en l'absence de mouvement rapide ou en présence de mouvements lents grâce à son élimination des valeurs aberrantes. En revanche, la Moyenne Mobile Pondérée (WMA) est mieux adaptée aux scénarios impliquant des mouvements, car elle permet de suivre les changements du signal plus rapidement et de réduire la latence dans l'estimation de la distance, bien qu'elle puisse être légèrement moins précise en l'absence de mouvement brusque.

4.5 CONCLUSION DE L'APPLICATION DES FILTRES SUR UNE SEULE BALISE

Ces tests approfondis avec une seule balise ont clairement démontré l'efficacité significative du Filtre Médian et de la Moyenne Mobile Pondérée pour améliorer la qualité des données de RSSI et la stabilité des estimations de distance. Forts de ces résultats probants, notre choix s'est finalement porté sur ces deux filtres pour leur complémentarité et leur capacité à répondre aux différents défis posés par les fluctuations du signal. Le Filtre Médian excelle dans la suppression des valeurs aberrantes et la stabilisation du signal en l'absence de mouvements rapides, tandis que la Moyenne Mobile Pondérée offre une réactivité précieuse pour le suivi des objets en déplacement. Les connaissances et les observations recueillies lors de cette phase de tests sur une seule balise constituent une base solide et essentielle pour l'intégration et l'optimisation des techniques de filtrage au sein de notre système de localisation multi-balises, dans le but d'atteindre une précision accrue et une robustesse optimale.

5.PARTIE 4 : TRILATERATION ET ESTIMATION DE POSITION A L'AIDE DE TROIS BALISES OBJECTIF :

5.1 OBJECTIF ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

L'objectif de cette expérimentation était d'estimer les coordonnées (x,y) d'un tag mobile à partir des distances filtrées issues de trois balises fixes, en appliquant une méthode d'optimisation par moindres carrés (*Least Squares* - LSQ). Cette méthode permet de minimiser les erreurs d'estimation et d'obtenir une position la plus proche possible de la réalité, en s'appuyant sur les distances calculées à partir des mesures RSSI.

Les tests ont été réalisés dans une pièce de 5 mètres sur 3 mètres, spécialement aménagée pour limiter les effets de réflexion au sol et les obstacles susceptibles de perturber le signal. Les trois balises ESP32-C3 Super Mini ont été placées à une hauteur de 2 mètres afin de maximiser la visibilité directe entre les balises et le tag, et de réduire les interférences proches du sol.

Pour évaluer la précision du système de positionnement, une trajectoire de référence a été tracée au sol à l'aide d'un niveau laser. Cette trajectoire reliait quatre points de coordonnées connues :

- Point 1: (4.6 ; 2)
- Point 2: (1 ; 2)
- Point 3: (3 ; 0.5)
- Point 4: (4 ; 1)

Le tag mobile a été déplacé manuellement en suivant précisément ce tracé, et les positions estimées par le système ont été enregistrées tout au long du déplacement. Ces données ont ensuite été comparées à la trajectoire idéale afin de mesurer les écarts et d'évaluer la performance de la localisation par trilatération optimisée via la méthode LSQ.

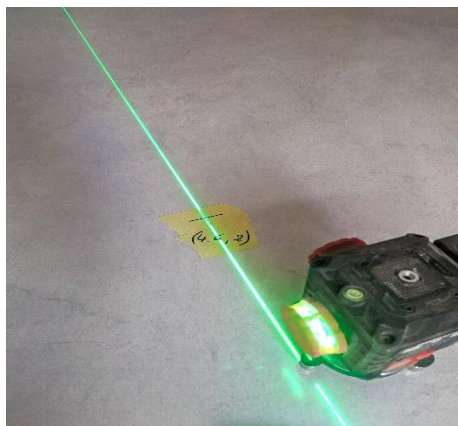


Figure IV.20 : Photo réelle de la trajectoire de référence et points de coordonnées tracés au sol.



Figure IV.21 : Installation d'une balise ESP32-C3.

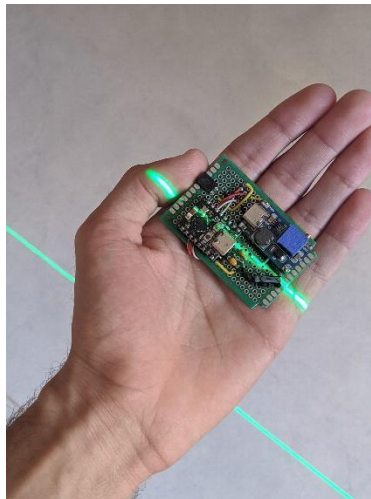


Figure IV.22 : Déplacement manuel du tag mobile le long de la trajectoire de référence.

La Figure IV.20 illustre le tracé de cette trajectoire de référence, servant de base pour l'analyse comparative entre la trajectoire réelle et celle estimée.

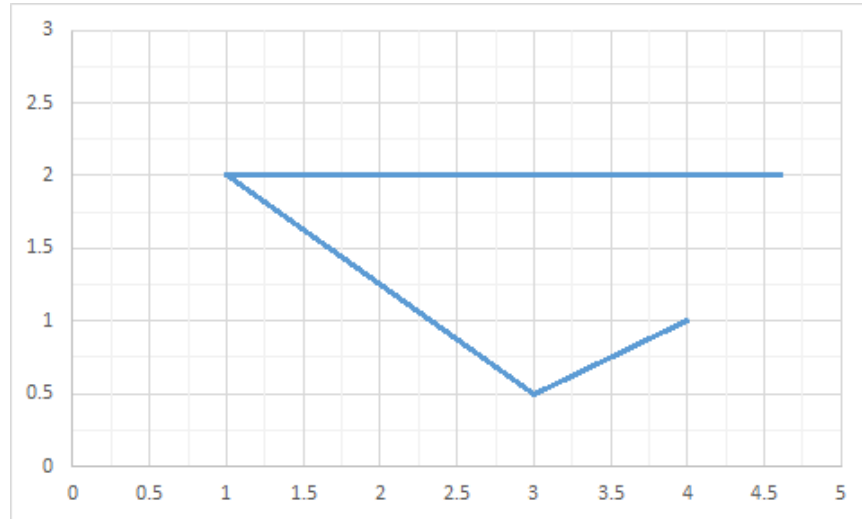


Figure IV.23: Trajectoire de référence du tag mobile.

5.2 IMPACT DU POSITIONNEMENT INITIAL DES BALISES :

Dans une première tentative, les trois balises ont été positionnées aux coordonnées suivantes : Balise 1 (B1) : (0, 3), Balise 2 (B2) : (5, 3) et Balise 3 (B3) : (0, 0). La Figure III.21 compare la trajectoire réelle suivie par le tag (tracée manuellement le long du laser) avec la trajectoire estimée par le système (en rouge). On observe une déviation significative entre les deux tracés, indiquant une précision de localisation insatisfaisante avec cette configuration initiale des balises. Cette imprécision suggère que le positionnement des balises joue un rôle crucial dans les performances de la trilatération.

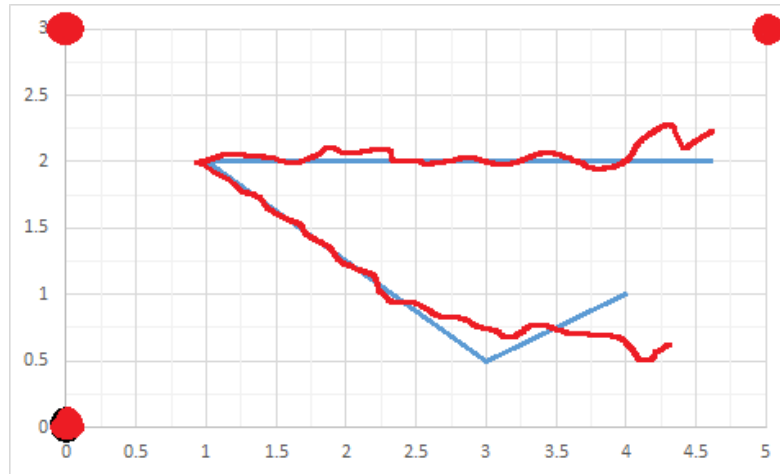


Figure IV.24: Comparaison de la trajectoire réelle (bleue) et de la trajectoire estimée avec un positionnement initial des balises (rouge).

5.3 AMELIORATION DE LA PRECISION AVEC UN POSITIONNEMENT OPTIMISE DES BALISES ET LE FILTRE MEDIAN

Afin d'améliorer la précision de la localisation, les balises ont été repositionnées stratégiquement pour former un triangle, une configuration reconnue pour optimiser les performances de la trilatération. Les nouvelles coordonnées des balises étaient : Balise 1 (B1) : (0, 3), Balise 2 (B2) : (5, 3) et Balise 3 (B3) : (2.5, 0). La Figure III.22 présente les résultats obtenus en utilisant uniquement le filtre Médian pour le traitement du RSSI. On constate une nette amélioration du suivi de la trajectoire réelle (en bleu) par la trajectoire estimée (en vert), indiquant une localisation plus précise grâce à un positionnement plus favorable des balises. La formation d'un triangle par les balises permet une meilleure intersection des cercles de distance et réduit l'ambiguïté dans le calcul de la position.

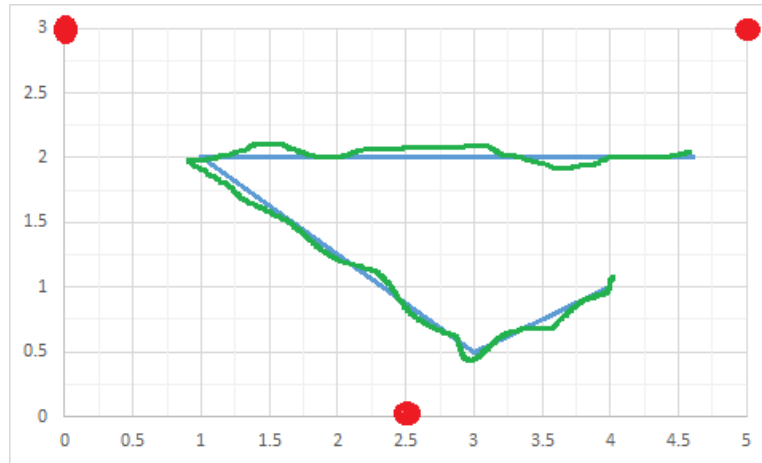


Figure IV.25 : Comparaison de la trajectoire réelle (bleue) et de la trajectoire estimée avec un positionnement optimisé des balises et le filtre Médian (vert).

5.4 AMELIORATION SUPPLEMENTAIRE AVEC L'AJOUT DU FILTRE WMA

Enfin, la Figure IV.23 illustre les résultats obtenus en combinant le positionnement optimisé des balises avec l'application conjointe du filtre Médian et de la Moyenne Mobile Pondérée (WMA). La trajectoire estimée (en rouge) suit la trajectoire réelle (en bleu) avec encore plus de fidélité et de fluidité, en particulier lors des changements de direction. Le filtre WMA contribue à lisser la trajectoire estimée en réduisant le bruit temporel et en assurant une meilleure continuité dans les estimations de position, ce qui est particulièrement bénéfique pour le suivi d'un tag en mouvement.

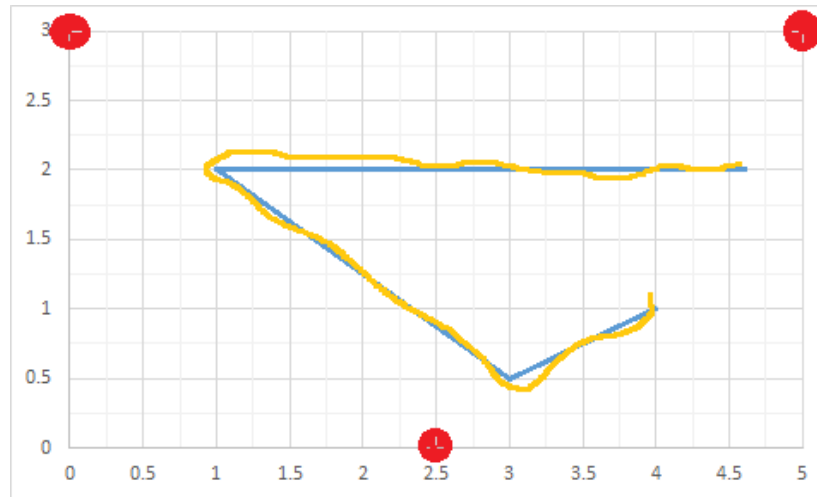


Figure IV.26: Comparaison de la trajectoire réelle (bleue) et de la trajectoire estimée avec un positionnement optimisé des balises et les filtres Médian et WMA (rouge).

5.6 CONCLUSION DE LA PHASE DE TRILATERATION

Cette phase de tests a validé l'ensemble de la chaîne du système de positionnement intérieur (IPS) dans des conditions réalistes. En combinant des modèles de perte de signal calibrés et spécifiques à la zone (bien que non explicitement détaillés ici, ils sont essentiels pour l'estimation précise des distances), un filtrage rigoureux des signaux (avec le Filtre Médian pour la suppression du bruit impulsionnel et le WMA pour le lissage temporel) et la trilatération mathématique (implémentée via l'algorithme des Moindres Carrés), le système a démontré une localisation intérieure de plus en plus précise et stable. L'importance d'un positionnement stratégique des balises, formant une configuration géométrique favorable comme un triangle, a également été mise en évidence. Ces résultats prometteurs ont été obtenus en s'appuyant uniquement sur du matériel ESP32 à faible coût, soulignant le potentiel de cette approche pour des applications de localisation intérieure économiques et performantes.

6. CONCLUSION

Ce chapitre a évalué notre système de positionnement intérieur à travers des tests progressifs. Les mesures initiales de RSSI ont souligné l'importance des paramètres de la balise et de l'anisotropie du signal. L'application des filtres Médian et WMA a prouvé leur efficacité pour améliorer la qualité des données RSSI brutes.

Enfin, les tests de trilatération ont démontré que le positionnement optimisé des balises et l'utilisation conjointe des filtres permettent une estimation de position plus précise et stable, validant l'approche globale du système basé sur le RSSI, le filtrage et la trilatération LSQ avec du matériel ESP32 à faible coût. Ces résultats prometteurs ouvrent la voie à des applications pratiques en intérieur, en soulignant la nécessité d'une configuration soignée pour des performances optimales.

Conclusion Générale

Ce mémoire a exploré en profondeur les aspects théoriques et pratiques de la conception et de l'implémentation d'un Système de Positionnement Intérieur basé sur la technologie Wi-Fi. Il a mis en lumière les défis spécifiques posés par la localisation en intérieur, notamment la complexité de la propagation des signaux radiofréquences dans les environnements clos.

L'étude a démontré l'importance cruciale de la calibration du modèle de perte de trajet pour obtenir des estimations de distance précises à partir des mesures de RSSI. Les résultats expérimentaux ont clairement illustré que l'utilisation d'un exposant de perte de trajet adapté à l'environnement spécifique est indispensable pour minimiser les erreurs de localisation.

De plus, l'efficacité des filtres Médian et Moyenne Mobile Pondérée pour améliorer la qualité des données RSSI et la stabilité des estimations de position a été mise en évidence. Le filtrage s'est avéré être un outil essentiel pour atténuer le bruit et les fluctuations du signal, permettant ainsi d'obtenir une localisation plus robuste.

Enfin, l'impact significatif du positionnement des balises sur la précision de la trilatération a été démontré. Les tests ont montré qu'une configuration géométrique optimisée, telle qu'un triangle, permet de maximiser la précision de la localisation en réduisant l'ambiguïté dans le calcul de la position.

Bien que ce travail ait permis d'atteindre des résultats prometteurs en utilisant du matériel Wi-Fi à faible coût, certaines limitations doivent être reconnues. Les tests ont été réalisés dans des environnements relativement contrôlés, et les performances du système pourraient être affectées par des environnements plus complexes ou dynamiques. De plus, la précision de la localisation reste limitée par la nature intrinsèquement variable du signal RSSI.

Pour les travaux futurs, plusieurs pistes peuvent être explorées. L'intégration de capteurs inertiels (accéléromètres, gyroscopes) pourrait améliorer la précision et la robustesse du système, en particulier dans les environnements dynamiques. L'utilisation de techniques d'apprentissage automatique pourrait permettre d'adapter le modèle de perte de trajet en temps réel et d'améliorer la gestion des interférences. Enfin, l'extension du système à la localisation 3D et à la prise en

charge d'un plus grand nombre d'utilisateurs simultanément pourrait ouvrir de nouvelles perspectives d'application.

En conclusion, ce mémoire a apporté une contribution significative à la compréhension et à l'amélioration des systèmes de positionnement intérieur basés sur Wi-Fi. Les résultats obtenus démontrent le potentiel de cette technologie pour fournir des solutions de localisation précises et économiques dans une variété d'environnements intérieurs.

Bibliographie

- [1] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, Nov. 2007.
- [2] S. Mazuelas et al., "Robust indoor positioning provided by real-time RSSI values in unmodified WLAN networks," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 3, no. 5, pp. 821–831, Oct. 2009.
- [3] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [4] M. Youssef and A. Agrawala, "The Horus WLAN location determination system," in *Proc. 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*, Seattle, WA, USA, 2005, pp. 205–218.
- [5] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [6] Espressif Systems, "ESP32-C3 Technical Reference Manual," Version 1.3, Espressif, 2023. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_technical_reference_manual_en.pdf
- [7] J. Gubner, *Probability and Random Processes for Electrical and Computer Engineers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [8] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2013.
- [9] H. A. Toliyat and S. G. Campbell, *DSP-Based Electromechanical Motion Control*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003.
- [10] D. Simon, *Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches*. Hoboken, NJ: Wiley, 2006.

- [11] M. B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, "The Cricket location-support system," in Proc. 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Boston, MA, 2000, pp. 32–43.
- [12] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," University of North Carolina at Chapel Hill, 2006. [Online]. Available: https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf
- [13] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, GPS: Theory and Practice, 5th ed. New York: Springer, 2001.
- [14] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 11, no. 1, pp. 13–32, First Quarter 2009.
- [15] C. Gentile et al., "Indoor Positioning Using Time Difference of Arrival in UWB Systems," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 2, pp. 456–467, Feb. 2019.