UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi

CONCEPTION ET MISE EN ŒUVRE D'UN SYSTEME DE NAVIGATION INTERIEURE ECONOMIQUE UTILISANT DES TECHNOLOGIES OPEN-SOURCE DANS LES BATIMENTS UNIVERSITAIRES.

par Hafashimana Eric

MEMOIRE PRESENTE A L'UNIVERSITE DU QUEBEC A CHICOUTIMI EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE MAITRE ES SCIENCES (M. SC) EN INFORMATIQUE

Québec, Canada

© Hafashimana Eric, 2024

RÉSUMÉ

De nos jours, l'évolution technologique a révolutionné le monde de la navigation. Naviguer d'un endroit à un autre n'est plus un problème comme autrefois, lorsque les gens utilisaient les cartes ou les symboles de référence tels que de belles maisons ou les arbres pour se localiser. Grâce à l'intégration des systèmes de navigation dans nos téléphones portables, les utilisateurs peuvent facilement se localiser et mieux naviguer. Les systèmes de localisation et de navigation peuvent utiliser des technologies telles que les systèmes GNSS (GPS), le Bluetooth, le Wi-Fi, la RFID, les capteurs à ultrasons, et l'UWB, entre autres. Bien que le GPS soit largement utilisé dans le monde entier, il présente un défi de localisation dans des environnements complexes, comme par exemple les bâtiments universitaires, où son signal est très faible, ce qui entraîne des erreurs de localisation.

Ce mémoire a pour objectif de proposer des solutions aux défis posés par les systèmes GNSS lors de la navigation à l'intérieur des bâtiments. Nous avons d'abord réalisé une analyse approfondie de la littérature afin d'identifier les meilleures méthodes et technologies disponibles à ce jour. Ensuite, nous avons développé une application Android permettant aux utilisateurs des locaux de l'UQAC de se localiser et de naviguer efficacement à l'intérieur du bâtiment. Son interface intuitive offre aux utilisateurs la possibilité de sélectionner leurs points de départ et d'arrivée en utilisant les numéros de salle. De plus, l'application permet de tracer un itinéraire, facilitant ainsi le suivi du chemin jusqu'à la destination. Enfin, cette application vise à aider les visiteurs et les nouveaux étudiants à se déplacer plus facilement à l'intérieur du bâtiment de l'UQAC. Les résultats de notre recherche ont démontré que le système est à la fois robuste et performant.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ ii
TABLE DES MATIERES iii
LISTES DES TABLEAUX vi
LISTES DES ABREVIATIONS viii
DÉDICACE ix
REMERCIEMENTS x
AVANT-PROPOS xi
INTRODUCTION 1
1.1 CONTEXTE 3
1.2 PROBLEMATIQUES 4
1.3 PROPOSITION 6
1.4 METHODOLOGIE DE RECHERCHE 7
1.5 ORGANISATION DE MEMOIRE 8
CHAPITRE 2 - ÉTUDES TECHNOLOGIQUES POUR LA NAVIGATION EN INTERIEUR. 10
2.1 LES TECHNOLOGIES DE LOCALISATION ET DE NAVIGATION 10
2.1.1 GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM) 11
2.1.2 RFID (RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION) 14
2.1.3 BLUETOOTH 15
2.1.4 WI-FI (WIRELESS FIDELITY) 16
2.1.5 ULTRA WIDEBAND (UWB) 17
2.2 INTEGRATION DES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE LOCALISATION EN INTERIEUR DANS DU MATERIEL 19
2.2.1 ARDUINO 20
2.2.2 RASPBERRY PI 22
2.3 LES SERVICES CARTOGRAPHIQUES DE NAVIGATION 23

2.3.1 OPENSTREETMAP 23
2.3.2 GOOGLE MAPS 25
2.4 LES CRITERES DE LOCALISATION ET DE NAVIGATION INTERIEURE 26
CHAPITRE 3 - LA LOCALISATION ET LA NAVIGATION AVEC L'UWB 30
3.1 LE FONCTIONNEMENT DE L'UWB 30
3.2 CARACTERISTIQUES DE L'UWB 31
3.3 METHODES DE MESURE POUR LOCALISATION A L'AIDE DE L'UWB 32
3.3.1 ANGLE OF ARRIVAL (AOA) 33
3.3.2 RECEIVED SIGNAL STRENGTH (RSS) 33
3.3.3 TIME OF ARRIVAL (TOA) 34
3.3.4 TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA) 38
3.3.5 PHASE DIFFERENCE OF ARRIVAL (PDOA) 38
3.4 APPROCHES GEOMETRIQUES POUR LA LOCALISATION AVEC UWB 39
3.4.1 TRIANGULATION 40
3.4.2 TRILATERATION 42
3.4.3 LES CONTRAINTES DE LA TRILATERATION DANS LE POSITIONNEMENT INTERIEUR 45
3.4.4 LE FILTRE DE KALMAN 46
CHAPITRE 4 - IMPLEMENTATION DU SYSTEME PROPOSE 49
4.1 SCHEMA DU SYSTEME AVEC LES DIFFERENTS COMPOSANTS 49
4.2 LOGICIELS ET LES MATERIELS UTILISES 50
4.3 LES FONCTIONNALITES ET LES MODULES DE L'APPLICATION « INDOOR NAVIGATION » 57
4.4 LE FONCTIONNEMENT DE NOTRE SYSTEME DE NAVIGATION INTERIEURE 59
4.5 ANALYSE DES COUTS 60

4.6 TESTS ET OPTIMISATION 61
4.6.1 RESULTAT DE L'APPLICATION « INDOOR NAVIGATION » 65
4.6.2 ANALYSE GRAPHIQUE DES RESULTATS 73
CHAPITRE 5 - ÉVALUATION ET TRAVAUX FUTURS 77
CONCLUSION 79
LISTE DE RÉFÉRENCES 81

LISTES DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : CLASSIFICATION DES TECHNOLOGIES SELON LEUR UTILISATION POUR LA NAVIGATION INTERIEURE ET EXTERIEURE..... 19
TABLEAU 2 : COMPARAISON DES MODULES ESP32 UWB. 56
TABLEAU 3 : COMPARAISON DES COUTS AU METRE CARRE ENTRE LES TECHNOLOGIES UWB ET WI-FI. 61

LISTES DES FIGURES

FIGURE 1 : POSITIONNEMENT AVEC GPS 13
FIGURE 2 : CALCUL DU POSITIONNEMENT AVEC GPS 13
FIGURE 3 : FONCTIONNEMENT DE SS-TWR 36
FIGURE 4 : FONCTIONNEMENT DE SD-TWR 37
FIGURE 5 : METHODE DE TRIANGULATION 41
FIGURE 6 : FONCTIONNEMENT DE LA TRILATERATION 44
FIGURE 7 : PARTIE MATERIELLE ET LOGICIELLE DU SYSTEME 50
FIGURE 8 : INTERFACE DE L'ANDROID STUDIO 52
FIGURE 9 : INTERFACE D'ARDUINO IDE 53
FIGURE 10 : ESP32 UWB BASIQUE ET ESP32 UWB PRO 57
FIGURE 11 : ESP32 UWB PRO AVEC ECRAN 57
FIGURE 12 : EMPLACEMENT DES ANCRES 1781 ET 1785 63
FIGURE 13 : EMPLACEMENT DES ANCRES 1782 ET 1783 63
FIGURE 14 : EMPLACEMENT DES ANCRES 1784 ET 1785 64
FIGURE 15 : ON RETROUVE ICI UN PLAN 2D DE L'ESPACE OU LE SYSTEME A ETE DEPLOYE. LES EMPLACEMENTS DES ANCRES SONT MARQUES PAR UN POINT ROUGE. 65
FIGURE 16 : MODULE DE CONNEXION 66
FIGURE 17 : MODULE ABONNEMENT 67
FIGURE 18 : DISTANCES ENTRE LE TAG ET LES ANCRES 1781, 1782 ET 1783 68
FIGURE 19 : DISTANCES DU TAG ET LES ANCRES 1782, 1784 ET 1785 69
FIGURE 20 : PAGE DES DONNEES 71
FIGURE 21 : PAGE DE NAVIGATION 72
FIGURE 22 : PRECISION DES MESURES 73
FIGURE 23 : ÉVOLUTION DU MODULE 1781 74
FIGURE 24 : ÉVOLUTION DU MODULE 1782 74
FIGURE 25 : ÉVOLUTION DU MODULE 1783 75
FIGURE 26 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DES MODULES 1781, 1782 ET 1783 75

LISTES DES ABREVIATIONS

AoA	Angle of Arrival
API	Application Programming Interface
BLE	Bluetooth Low Energy
CLI	command-line interpreter
DS-TWR	Double-sided Two-way Ranging
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IoT	Internet of Things
JOSM	Java OpenStreetMap Editor
LOS	Line-of-Sight
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NLOS	Non-Line of Sight
OSM	OpenStreetMap
PDoA	Phase Difference of Arrival
PostGIS	PostgreSQL Geographic Information System
QoS	Quality of Service
RFID	Radio Frequency Identification Device
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SDS-TWR	Symmetrical Double Sided Two-Way Ranging
SS-TWR	Single-sided Two-way Ranging
TDoA	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
ToF	Time of Flight
TWR	Two-Way Ranging
UWB	Ultra-Wideband
Wi-Fi	Wireless Fidelity

DÉDICACE

Je dédie ce travail

- À ma très chère mère pour tout l'amour que tu m'as donné, pour tout ce que tu as fait pour moi, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai jamais comment te remercier comme il se doit. Ton amour et ta présence ont toujours été ma source de force pour surmonter toutes les difficultés.
- À mes grands frères et à mes sœurs qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager tout au long de mon parcours. Que ce mémoire traduit ma gratitude.
- À mes oncles, mes tantes, mes cousins.
- À mon directeur de recherche.
- À mes deux belles-sœurs, à mes amis ainsi que tous ceux qui m'ont soutenu durant ma formation.

Que Dieu le Tout-Puissant vous bénisse.
Longue vie et en bonne santé à tous.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à rendre grâce à Dieu, le Créateur omnipuissant, omniprésent et omniscient, le Dieu bon et miséricordieux qui m'a gardé en vie tout au long de ce parcours.

Je tiens à remercier du fond de mon cœur ma mère ainsi que mon grand frère Ndikumana Fidèle qui m'ont toujours été à mon côté de tout moment, à me consoler et à me soutenir.

Je tiens à remercier toute ma famille et mes amis du fond de mon cœur qui m'ont toujours encouragé pendant le moment de découragement.

Je remercie du fond de mon cœur mon directeur de recherche Dr. Bob-Antoine J. Ménélas pour ses conseils, son soutien, de m'avoir proposé ce sujet et d'avoir accepté à me guider durant tout ce parcours.

Je remercie encore la secrétaire du DIM Andréanne Riverin et Mathieu qui est chargé de projet informatique et technologie pour ses soutiens.

Enfin, je tiens à remercier tout le corps professoral de l'Université du Québec à Chicoutimi. Je tiens à exprimer mes remerciements, mon respect et ma sincère gratitude à tous pour leur contribution.

Longue vie à vous tous et que Dieu vous bénisse.

AVANT-PROPOS

Ce travail de recherche rentre dans le cadre d'un projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de maitrise en informatique. Dans le but de renforcer mes connaissances par la pratique, mon directeur de recherche Dr. Bob-Antoine J. Ménélas m'a proposé de travailler sur un sujet qui consiste à la conception et mise en œuvre d'un système de navigation intérieure économique utilisant des technologies open-source dans les bâtiments universitaires. Ce mémoire résume les différentes étapes et aspects de ce projet.

INTRODUCTION

Dans le monde actuel, l'évolution de la technologie joue un rôle crucial dans la vie humaine, avant l'avènement des smartphones (téléphones intelligents) et le développement du GPS, il était plus difficile de trouver l'endroit de destination rapidement. Les gens utilisaient les boussoles, les cartes dessinées sur papier, les repères spécifiques tels que les maisons et les arbres ou en demandant une orientation aux personnes qu'ils croisent. Grâce à l'évolution technologique et la mise en place des systèmes GPS (Global Positioning System), trouver la localisation est devenu facile. L'intégration des systèmes de navigation dans les smartphones nous permet désormais de naviguer de manière fluide.

Les statistiques montrent une augmentation des ventes de smartphones au niveau mondial. Selon Statista1 en 2023, le nombre de smartphones vendus est estimé à 1,33 milliard d'unités par an. Les smartphones ont changé notre façon d'interagir avec le monde. Ces appareils intelligents sont passés d'être de simples outils de communication à devenir des objets essentiels de notre quotidien. Leur développement a été marqué par des innovations technologiques constantes, notamment l'intégration de fonctionnalités comme les assistants vocaux, les caméras, les capteurs de localisation, la réalité augmentée, la réalité virtuelle, etc.

Dans les systèmes de navigation, les applications utilisent des données provenant de capteurs pour offrir une localisation précise. Par exemple, certaines applications utilisent des capteurs externes tels que la RFID, les capteurs à ultrasons, les modules UWB, [1, 2] tandis que d'autres exploitent des capteurs intégrés aux téléphones, tels que l'accéléromètre, le récepteur GPS et le gyroscope [2, 3]. Ces capteurs jouent un rôle essentiel, car ils permettent à l'application de collecter des informations sur le mouvement, la position et l'orientation du téléphone. Ces données sont cruciales pour fournir une localisation et des indications de navigation précises en temps réel.

Les environnements universitaires sont souvent vastes et complexes, comprenant divers bâtiments, salles de classe, laboratoires et installations. Dans ces espaces, il est souvent difficile pour les nouveaux étudiants et les visiteurs de s'orienter efficacement. La réalité

augmentée (RA) peut apporter une solution en superposant des informations virtuelles au monde réel. Grâce aux caméras des smartphones, elle permet de visualiser des itinéraires en ajoutant des ancres d'indication et des informations nécessaires sur des appareils mobiles, afin de guider l'utilisateur vers sa destination [4, 5].

Notre étude se concentre sur le développement d'un système de navigation à l'intérieur d'un bâtiment universitaire. Nous utilisons des données collectées par des capteurs externes, notamment la technologie ultra wideband (UWB), pour offrir une localisation précise. Notre système combine la technologie UWB et le Wi-Fi, avec des modules ESP32 UWB DW1000, afin de fournir une solution de navigation efficace et robuste, répondant aux besoins spécifiques des étudiants et des visiteurs dans un environnement universitaire.

1.1 Contexte

À notre époque numérique, les smartphones sont devenus des outils incontournables, nous permettant de rester connectés, informés et productifs où que nous soyons. Ces appareils intègrent divers capteurs dotés de multiples fonctionnalités, révolutionnant notre manière d'interagir avec le monde qui nous entoure. Parmi ces capteurs, l'intégration du GPS joue un rôle central en permettant une localisation précise. Cependant, l'utilisation du GPS pose parfois des défis dans certains environnements où le signal ne peut être capté correctement. Par exemple, à l'intérieur de bâtiments universitaires, d'hôpitaux ou d'entrepôts, le signal GPS diminue considérablement, voire devient totalement inutilisable, en raison des obstacles tels que les murs, les foules ou d'autres signaux d'interférences qui bloquent la réception.

Face à ce genre de dysfonctionnement du GPS, des technologies alternatives de navigation intérieure ont été développées pour combler cette lacune. Ces technologies proposent des solutions de localisation précises et fiables pour naviguer efficacement dans des environnements clos. Contrairement au GPS, principalement utilisé pour la navigation extérieure dans des espaces ouverts, la navigation intérieure repose sur une combinaison de technologies telles que les balises Bluetooth, les modules UWB (Ultra Wideband), les réseaux Wi-Fi, les capteurs ultrasoniques et même la réalité augmentée. Ces technologies permettent de déterminer avec précision la position de l'utilisateur. La navigation intérieure est d'une grande importance et trouve des applications dans divers domaines. Elle facilite l'orientation et la localisation des utilisateurs, tout en permettant aux entreprises de proposer des services innovants à leurs clients.
Cependant, bien que cette technologie présente de nombreux avantages, certaines applications soulèvent des défis, notamment en matière de collecte de données. Par exemple, certaines applications exigent que les utilisateurs se connectent, ce qui peut poser des problèmes liés à la confidentialité des données. C'est particulièrement le cas des applications de navigation qui proposent des services payants ou gratuits, comme ArcGIS Indoors ou c3nav.

En résumé, la navigation intérieure offre un avantage considérable dans le monde moderne en comblant les limites du GPS dans des environnements fermés. Elle permet à chacun de

découvrir facilement de nouveaux lieux, mais les applications qui exploitent cette technologie doivent également répondre aux préoccupations éthiques concernant la collecte et l'utilisation des données.

1.2 Problématiques

En résumé, la navigation intérieure offre un avantage considérable dans le monde moderne en comblant les limites du GPS dans des environnements fermés. Elle permet à chacun de découvrir facilement de nouveaux lieux, mais les applications qui exploitent cette technologie doivent également répondre aux préoccupations éthiques concernant la collecte et l'utilisation des données.

Comme mentionné dans l'introduction concernant l'intégration du GPS dans les smartphones, on observe que depuis son intégration, le système de localisation est devenu plus précis. Il y a eu une augmentation du nombre d'applications intégrant ce système afin de permettre aux utilisateurs de se localiser et de naviguer facilement. Les applications cartographiques offrent aux utilisateurs la possibilité de trouver leur chemin vers leur destination avec une précision accrue, que ce soit en voiture, à pied ou en utilisant les transports en commun. Cependant, comme le système GPS présente des limites dans certains environnements, de nombreux chercheurs se sont concentrés sur ce domaine pour apporter des solutions. L'intégration de technologies telles que la RFID, les modules UWB, ainsi que d'autres technologies de positionnement comme le Wi-Fi, le Bluetooth ou la réalité augmentée dans les applications de navigation intérieure a permis de résoudre les problèmes liés aux signaux GPS dans les endroits où ils sont faibles ou inaccessibles. Les applications de navigation utilisant le système GNSS sont idéales pour orienter les utilisateurs lorsqu'ils sont à l'extérieur, en fournissant des indications sur la direction et la distance jusqu'à leur destination.

Malgré l'évolution du GNSS, ce système de navigation reste moins performant par rapport à d'autres technologies comme l'UWB pour le positionnement intérieur. Toutefois, il est important de noter qu'il demeure extrêmement utile dans la vie quotidienne, car il reste la technologie la plus utilisée pour la navigation. Cela dit, dans certains endroits comme les bâtiments universitaires, les aéroports et les supermarchés, où la force des signaux diminue,

voire disparaît, le GPS devient inadapté pour la localisation et la navigation en intérieur (Y.-C. Cheng et J.-Y. Lin, 2011) [6].

Plusieurs recherches ont été menées pour résoudre les défis liés au système de positionnement intérieur (IPS). Bien que le système GNSS ait connu un grand succès depuis son développement, il reste inefficace dans certains environnements en raison de la dégradation de son signal. Selon les recherches effectuées par Tiemann et Schweikowski (2015), ceux-ci ont proposé un système de navigation utilisant la technologie UWB pour pallier ces limitations [7]. Certaines études basées sur la géolocalisation intérieure et la réalité augmentée ont été réalisées en utilisant différentes méthodes. Par exemple, Baek et al. (2019) [8] ont proposé une unité de localisation intérieure basée sur des capteurs et des marqueurs d'appareils permettant de déterminer précisément la position de l'utilisateur. D'autres travaux, tels que ceux de Hile et al. [9], ont exploité des techniques de vision par ordinateur pour collecter des photos existantes et générer automatiquement des annotations destinées à la navigation piétonne, en s'appuyant sur les données GPS.
L'intégration d'outils puissants et de fonctionnalités avancées dans les smartphones leur permet d'exécuter des tâches performantes, comme l'utilisation de la réalité augmentée (S. Vert et R. Vasiu 2012) [10]. Cette technologie ouvre de nouvelles perspectives, notamment dans le domaine de la navigation intérieure, en offrant aux utilisateurs une expérience de navigation plus intuitive et interactive. Elle facilite l'orientation dans des environnements complexes tels que les bâtiments universitaires. La convergence de ces avancées technologiques et de la mobilité transforme notre manière d'interagir avec notre environnement quotidien. Elle propose des solutions innovantes pour simplifier les déplacements et améliorer la qualité de vie quotidienne.

La réalité augmentée (RA) est une technologie qui superpose des données numériques à l'environnement physique, telles que des images, des textes ou d'autres informations, en les affichant sur l'écran d'un smartphone ou sur des lunettes spécialisées. L'utilisation de la RA dans les milieux universitaires offre un large éventail d'applications innovantes. Par exemple, le déploiement de marqueurs comme points d'ancrage dans l'environnement permet à un utilisateur de déterminer son emplacement en alignant ces marqueurs avec les

informations de localisation préenregistrées. Cependant, il est crucial que l'angle de la caméra soit correctement aligné avec les marqueurs pour initier le processus de correspondance. De plus, les marqueurs apposés sur les murs ou dans d'autres endroits peuvent se détériorer ou se salir, rendant leur reconnaissance difficile et entraînant des coûts de maintenance supplémentaires (A. Mulloni et al., 2009 ; L.C. Huey et al., 2011) [4, 5, 11]. S. Kasprzak et al. (2013), ainsi que J. Kim et al. (2008), ont proposé une méthode consistant à rechercher des images d'objets pré-étiquetés, tels que des panneaux publicitaires ou des marques déposées, présents dans l'environnement. L'emplacement de l'utilisateur est ensuite déterminé en fonction de ces objets identifiés [8, 12, 13]. Toutefois, plus l'environnement est complexe, plus il devient difficile d'identifier les objets pré-étiquetés. Une autre approche repose sur la correspondance des caractéristiques, qui est également utilisée pour déterminer la position de l'utilisateur. Cependant, la construction de nuages de points pour représenter un environnement intérieur réel est une tâche longue et coûteuse, en particulier pour de grands bâtiments. Cette difficulté augmente lorsque la disposition et la décoration de différentes parties de l'espace sont similaires, compliquant davantage le traitement de correspondance d'images.

Dans nos recherches, nous visons à répondre à ces problématiques en analysant différentes technologies afin de trouver le meilleur moyen de faciliter la navigation à l'intérieur de l'université. Nous allons analyser des technologies telles que le Bluetooth et le Wi-Fi, qui constituent des éléments clés pour le système de navigation intérieure, ainsi que d'autres technologies de transfert de données.

1.3 Proposition

À cause des défis que présente la navigation intérieure (dans les bâtiments universitaires), tels que la perte de signal GPS et la complexité des structures internes, notamment pour les nouveaux étudiants et les visiteurs, la proposition d'une application utilisant la technologie UWB pourrait apporter une solution adaptée en offrant une navigation précise tout en présentant des informations utiles et graphiques. Cela est particulièrement crucial dans un environnement dynamique comme un campus universitaire.

L'objectif de notre projet est de développer une application mobile pour la navigation intérieure à faible coût, spécialement adaptée aux environnements universitaires. Ce projet se concentrera sur l'exploitation de technologies open source et de matériel facilement disponible pour créer une solution de navigation intérieure fiable et évolutive.
Nous allons développer une application qui offrira différentes fonctionnalités permettant à l'utilisateur de choisir son point de départ et sa destination. Nous cartographierons le plan universitaire afin de faciliter la localisation. Dans notre application, l'utilisation d'un réseau Wi-Fi sera nécessaire pour assurer le transfert des données.
L'application est basée sur la technologie UWB et utilise les modules ESP32 UWB, qui permettent un positionnement précis à l'intérieur de notre université. Ces fonctionnalités et technologies intégrées à notre application offrent une expérience de navigation optimale, en facilitant la localisation précise et les déplacements des utilisateurs au sein de nos bâtiments universitaires.

1.4 Méthodologie de recherche

Afin d'arriver au bon résultat pour nos objectifs, nous avons utilisé une méthodologie de recherche citée ci-dessous :

- Une étude de la littérature pour identifier les services concernant :
    - Les différentes technologies nécessaires utilisées pour atteindre le résultat escompté.
    - Les différents matériels requis pour aider au développement du système de navigation à l'intérieur de nos bâtiments universitaires.
    - Les méthodes nécessaires à utiliser pour calculer le positionnement et faciliter la navigation intérieure.
    - L'estimation des coûts requis pour développer un système à faible coût.
- Conception du système et réalisation de tests itératifs sur les composants logiciels et matériels.
- Réalisation d'une analyse détaillée pour garantir que le système reste abordable en vue d'une mise en œuvre à grande échelle.

Notre choix pour la méthode de notre recherche est basé sur le fait de trouver un meilleur moyen de navigation intérieure selon les analyses de la revue de la littérature. Nous avons procédé à quelques méthodes d'expérimentation afin de trouver une méthode qui puisse répondre à nos problématiques citées dans la partie ci-dessus.
Nous avons analysé quelques travaux afin d'identifier la meilleure approche pour le calcul de positionnement. Parmi les méthodes analysées, il y a la triangulation et la trilatération.
Nous avons procédé à des tests en utilisant les modules ESP32 UWB DW1000 afin de fournir un système de navigation efficace et robuste à l'intérieur des bâtiments universitaires. Comme c'est un système de navigation intérieure, des expérimentations ont été réalisées dans le bâtiment universitaire de l'UQAC au quatrième étage du bâtiment principal.
Après la méthodologie de recherche, nous effectuerons une évaluation des besoins et exigences.

1.5 Organisation de mémoire

La suite de notre document est subdivisée comme suit :
Chapitre 2 - Études technologiques pour la navigation en intérieur : Ce chapitre donne une analyse nécessaire afin de comprendre les technologies et les services nécessaires pour le développement des applications de navigation intérieure.

Chapitre 3 – La localisation et la navigation avec l'UWB : Ce chapitre nous décrit le fonctionnement de la technologie UWB dans le domaine de localisation et de navigation. Il nous présente aussi les méthodes qu'on peut utiliser dans le calcul du positionnement.

Chapitre 4 – Implémentation du système proposé : Ce chapitre nous décrit comment le système proposé a été implémenté. Il présente également l'analyse des résultats du système.

Chapitre 5 – Évaluation et travaux futurs : Ce chapitre présente l'analyse de notre système ainsi que les améliorations à faire dans les travaux futurs.

Chapitre 6 – Conclusion : Ce chapitre est une synthèse générale de notre travail de recherche et des résultats obtenus.

CHAPITRE 2
ÉTUDES TECHNOLOGIQUES POUR LA NAVIGATION EN INTERIEUR.

Afin de développer un système qui surmonte les problèmes rencontrés dans les bâtiments universitaires, il est nécessaire d'analyser les technologies existantes et de choisir celles qui conviennent bien à situation.

La compréhension des technologies nécessaires au développement est essentielle pour créer un système efficace. Notre analyse de la littérature existante nous permettra de déterminer les méthodes les plus adaptées à nos besoins et de nous familiariser avec les outils et les services cartographiques de navigation requis pour le développement d'un système de localisation en temps réel performant. Cette recherche bibliographique sera donc un élément clé dans la conception et la mise en œuvre de notre système.

2.1 Les technologies de localisation et de navigation

Les technologies de localisation sont des outils et des systèmes utilisés pour déterminer la position géographique d'une entité d'intérêt pouvant être une personne ou un objet. On parle alors de géolocalisation qui est en fait une procédure permettant de déterminer la position géographique d'un objet ou d'une personne sur un plan ou une carte à l'aide de ses coordonnées géographiques.

Elles comprennent des technologies bien connues comme le GPS, qui utilise des satellites pour fournir des coordonnées précises d'une entité d'intérêt située sur Terre. Cependant, en intérieur, il peut être difficile d'utiliser le GPS pour se localiser avec précision, par exemple dans des bâtiments comme une université. Pour répondre à ce défi, les systèmes de positionnement intègrent diverses technologies telles que le GNSS, le Wi-Fi, le Bluetooth, la RFID, l'UWB, le Zigbee, ainsi que des capteurs inertiels, entre autres [1, 2, 14, 15]. Ces technologies peuvent être utilisées pour estimer la position en mesurant la force des signaux de points d'accès ou de balises. Les capteurs présents dans les smartphones, comme les accéléromètres et les gyroscopes, peuvent aussi être utilisés pour le suivi des mouvements et contribuer à déterminer la position exacte de ces derniers.

La localisation revêt une grande importance car elle utilisée dans nombres d'applications telles que la navigation, le suivi des actifs en temps réel, et la géolocalisation des smartphones. Ces technologies rendent la vie quotidienne plus facile pour les utilisateurs en améliorant la sécurité des utilisateurs et en offrant des services personnalisés basés sur la géolocalisation.

Certaines technologies utilisées dans le domaine de la navigation présentent des défis dans le domaine de la localisation. Par exemple, les technologies BLE et Zigbee sont à courte portée, comparées aux technologies Wi-Fi ou UWB [2]. Les technologies, qu'elles soient à courte ou moyenne portée, jouent un rôle crucial dans ce domaine de localisation et de navigation en répondant aux besoins spécifiques du transfert de données de manière rapide et fiable dans des environnements intérieurs. La combinaison de ces différentes technologies dans les systèmes de navigation intérieure offre une bonne précision, une connectivité, ainsi qu'une connectivité robuste et flexible dans les bâtiments complexes [16].

Les technologies de communication à courte portée influencent le coût du système, car plus la portée du signal est réduite, plus de capteurs sont nécessaires pour couvrir une surface donnée. Il en découle a priori un cout plus élevé du système. Ainsi, les systèmes à longue portée restent nécessaires pour la navigation intérieure. Notre objectif est de trouver une technologie à longue portée capable d'offrir une couverture étendue et des solutions de communication à faible consommation d'énergie afin de limiter la consommation de la batterie.

Comme nous avons vu les différentes technologies qui peuvent être utilisées dans le système de navigation, nous allons analyser certaines afin de déterminer celles que nous pouvons choisir pour fournir un système efficace, utilisable dans notre environnement universitaire et capable de minimiser la consommation d'énergie sur les appareils des utilisateurs.

2.1.1 GPS (Global Positioning System)

Le GPS (Global Positioning System) est un système de navigation par satellite qui permet de déterminer la position géographique d'un objet, d'une personne ou d'un véhicule avec une grande précision. Développé par le département de la Défense des États-Unis, il est devenu officiellement accessible au grand public dans les années 2000. Le GPS utilisait un réseau

de 24 satellites en orbite autour de la Terre (depuis 2015 il est constitué de 31 satellites en orbite intermédiaire en six plans orbitaux) qui émettent leurs signaux. Les récepteurs GPS, présents dans les smartphones, les voitures et les dispositifs de navigation, captent ces signaux et calculent leur position en mesurant le temps que mettent les signaux pour voyager depuis plusieurs satellites. En utilisant les informations de trois à quatre satellites, le récepteur peut déterminer la position exacte en termes de latitude, de longitude et d'altitude.

Dans les recherches effectuées par Wang. J., le système de localisation GPS est inclus dans le système de GNSS, au même titre que d'autres systèmes tels que GLONASS (Russie), Galileo (Union européenne) et Beidou (Chine). Ces systèmes utilisent plusieurs satellites pour déterminer la localisation ou pour la navigation. Le système GNSS permet d'améliorer les capacités de ces systèmes pour offrir une meilleure précision et fiabilité. Par ses recherches, l'auteur conclut que plus les satellites impliqués dans la localisation sont nombreux, plus la position que donne le GPS est précise et fiable [17]. Les services de localisation sur les smartphones offrent des fonctionnalités telles que la recherche de lieux à proximité, la fourniture d'itinéraires, et le suivi des activités physiques. Le GPS a transformé la manière dont nous nous déplaçons et interagissons avec notre environnement, offrant une précision et une commodité sans précédent. Zafari, F. et al. (2018) ont effectué des recherches sur un système de navigation pour aveugles, notamment via une canne intelligente visant à déterminer sa position grâce au GPS.

La détermination de la position d'un récepteur par le GPS utilise principalement la méthode de la trilatération. Le récepteur GPS capte les signaux de plusieurs satellites. Chaque signal indique la distance entre le satellite et le récepteur en mesurant le temps de parcours du signal. La position initiale est estimée grâce à la trilatération. En raison des interférences des signaux dans le calcul du positionnement, le GPS utilise des filtres afin de calculer une position plus précise. Parmi les filtres les plus connus, on peut citer le filtre de Kalman, qui est utilisé pour améliorer la précision. Ce filtre combine les mesures GPS avec des prédictions basées sur le mouvement du récepteur (comme la vitesse et la direction) et corrige les erreurs dues aux interférences ou aux variations des signaux, offrant ainsi une localisation plus fiable et précise [16, 18].

Les images suivantes montrent le fonctionnement du système GPS au en calculant le la position de l'utilisateur en utilisant à trois satellites et en appliquant la méthode de trilatération.

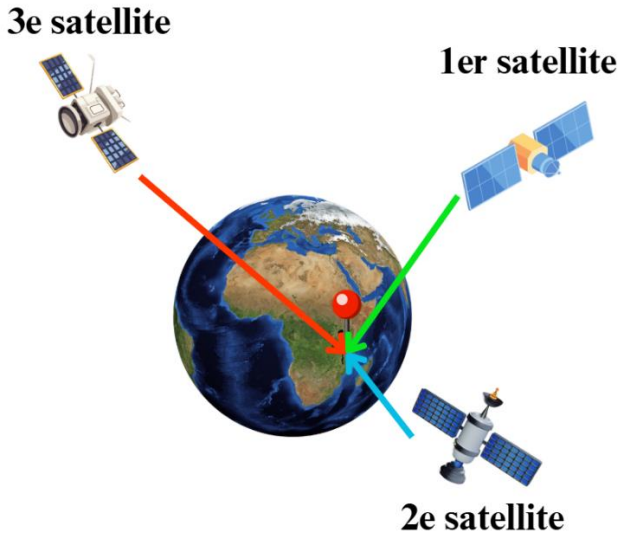


Figure 1 : Positionnement avec GPS

© Hafashimana Eric, 2024

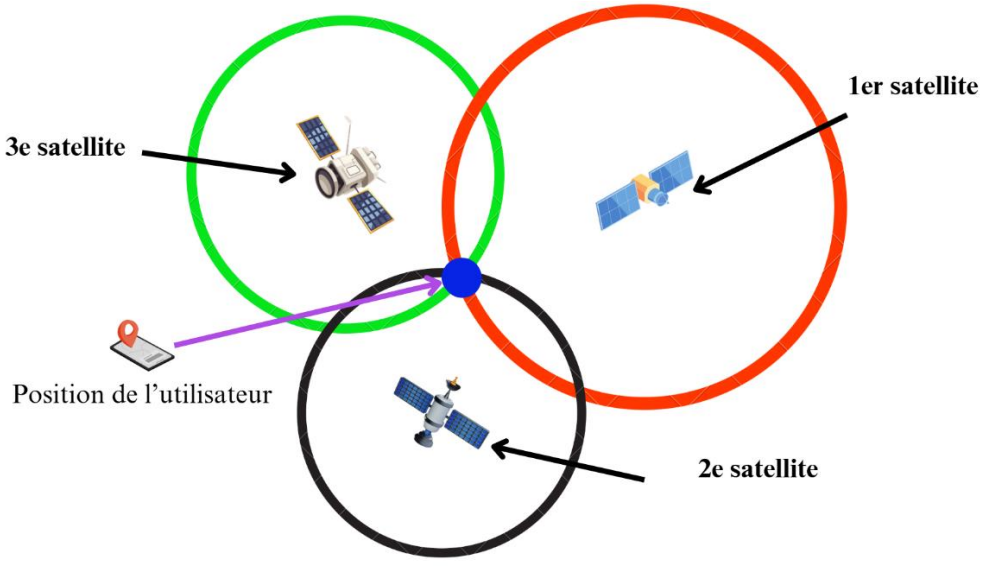


Figure 2 : Calcul du positionnement avec GPS

© Hafashimana Eric, 2024

2.1.2 RFID (Radio Frequency Identification)

La RFID (Radio Frequency Identification) est une technologie qui utilise des ondes radio pour identifier et suivre des objets. Un système RFID est composé de deux éléments principaux : une étiquette (ou un tag) RFID attachée à un objet, et un lecteur RFID qui envoie un signal radio pour détecter l'étiquette. Lorsque l'antenne RFID envoie un signal, l'étiquette répond avec ses informations, sans avoir besoin de contact direct. Dans un système RFID, la localisation repose sur l'identification de la position des étiquettes RFID placées à des emplacements spécifiques. Lorsqu'un utilisateur se déplace, sa position est déterminée en analysant les signaux reçus par plusieurs lecteurs RFID à l'aide de méthodes comme la triangulation ou la trilatération. Ces techniques permettent un suivi précis en temps réel. Dans le domaine de la navigation, bien que de nombreuses applications soient développées pour des systèmes cellulaires, l'utilisation de la RFID dans des environnements complexes requiert une attention particulière pour le calcul du positionnement. Dans ces environnements, tels que les bâtiments universitaires ou les entrepôts, le calcul du positionnement peut sembler difficile en raison d'interférences ou d'obstacles qui perturbent les signaux de RFID.

Retscher, G., et Fu, Q. (2010) ont de leur côté proposé un système de navigation hybride combinant la RFID avec des capteurs cellulaires pour une utilisation à l'intérieur de bâtiments complexes. L'intégration des capteurs inertiels améliore le positionnement et le suivi des mouvements dans les systèmes de navigation intérieure [19].

Les recherches mettent en évidence les avantages de la RFID pour le positionnement en intérieur. Bien que sa portée soit généralement courte, elle peut atteindre quelques dizaines de mètres selon les conditions environnementales. La RFID se distingue également par une installation rapide et facile, une indépendance vis-à-vis de la ligne de visibilité et une capacité à être utilisée pour la détermination de positions et le suivi d'objets. Comparée à d'autres technologies de positionnement intérieur, telles que le WLAN, le Bluetooth, l'UWB (Ultra Wideband), l'infrarouge ou l'ultrason, la RFID est souvent considérée comme plus économique et pratique [16, 18, 19].

Dans le domaine de la navigation, le positionnement ou la localisation constitue une étape cruciale. Pour cause, une précision insuffisante de positionnement peut rendre la navigation

inefficace. Dans les recherches effectuées par Retscher, G., & Fu, Q., ils ont constaté que leur système hybride, combinant RFID et capteurs cellulaires, présentait une erreur de précision de 1 à 2 mètres. Bien que cette marge puisse sembler acceptable dans certains contextes, elle reste problématique dans des environnements complexes où une telle imprécision pourrait entraîner des erreurs de navigation significatives et potentiellement désorienter les utilisateurs.

2.1.3 Bluetooth

Bluetooth est une technologie à faible consommation d'énergie grâce à son protocole Bluetooth Low Energy (BLE). Il utilise des modes de veille pour économiser de l'énergie lorsqu'il n'est pas actif, envoie des données en petits paquets courts et ajuste la puissance du signal en fonction de la distance.

La localisation intérieure avec Bluetooth repose sur de petits dispositifs appelés balises Bluetooth (ou beacons) placées à divers endroits d'un bâtiment [20, 21]. Ces balises émettent des signaux captés par les smartphones ou d'autres appareils utilisant le Bluetooth. En mesurant la force de ces signaux, il est possible d'estimer la distance entre le téléphone et chaque balise. Grâce à ces informations, on peut déterminer avec précision la position de l'utilisateur dans le bâtiment.

Pour améliorer la précision, les systèmes utilisent plusieurs balises et combinent les signaux reçus pour calculer la position exacte de l'utilisateur. Cette technologie est utilisée dans des endroits où le GPS fonctionne mal, comme les universités, les centres commerciaux, les musées ou les aéroports. Les balises peuvent également transmettre des informations supplémentaires, telles que des alertes ou des conseils, en fonction de la position de l'utilisateur. Cependant, des éléments tels que les murs, les meubles et les interférences environnementales peuvent affecter la précision de la localisation. Les systèmes de navigation intérieure peuvent aussi afficher des informations supplémentaires comme des points d'intérêt, des promotions ou des événements en fonction de la position de l'utilisateur. Cette technologie améliore l'expérience de l'utilisateur en proposant des itinéraires personnalisés et des informations contextuelles, bien que la précision du positionnement varie en fonction des obstacles et des interférences présents dans l'environnement.

L’intégration de fonctionnalités permettant de guider l’utilisateur d’un point de départ à un point d’arrivée améliore l’efficacité et l’accessibilité du système. Le calcul des itinéraires est généralement effectué à l’aide d’algorithmes bien connus, tels que l’algorithme de Dijkstra et l’algorithme A*. Ces algorithmes aident l’utilisateur à choisir le chemin le plus court pour atteindre sa destination. Par exemple, Satan, A. (2018) a développé un système utilisant l’algorithme de Dijkstra pour calculer l’itinéraire le plus court et adapter le parcours en fonction des changements de position de l’utilisateur pendant la navigation [20]. Cependant, en raison des problèmes rencontrés par les signaux Bluetooth, comme les interférences causées par les murs ou d’autres obstacles, l’intégration d’algorithmes de filtrage est essentielle pour améliorer les performances des applications de navigation intérieure. L’implémentation du filtre de Kalman [16, 22] permet d’optimiser la gestion des signaux Bluetooth, tandis que l’utilisation de la trilatération avec des balises renforce la précision du positionnement. Campana, F., et al. (2017) ont proposé un système de navigation utilisant un algorithme d'apprentissage automatique, qui se base sur les empreintes digitales stockées dans une base de données pour prédire avec précision la position exacte de l’utilisateur [23].

2.1.4 Wi-Fi (Wireless Fidelity)

Le Wi-Fi ou le WiFi, est un ensemble de protocoles de communication sans fil régis par les normes du groupe IEEE 802.11 (ISO/CEI 8802-11). Cette technologie permet aux appareils électroniques (ordinateurs, routeurs, smartphones, modems, etc.) de se connecter à Internet ou à d'autres réseaux locaux via des ondes radio.

La localisation intérieure basée sur le Wi-Fi est une méthode qui permet de déterminer la position d’un objet ou d’une personne à l'intérieur d'un bâtiment en exploitant les signaux Wi-Fi. Cette méthode repose sur l’utilisation des points d'accès Wi-Fi en combinaison avec certains capteurs présents dans les appareils, comme les capteurs de mouvement ou ceux mesurant les vitesses angulaires. Les dispositifs, tels que les smartphones, captent ces signaux et mesurent leur intensité. En comparant la force des signaux reçus provenant de différents points d'accès, le système peut estimer la position de l’appareil à l'intérieur du bâtiment. Pour détecter les réseaux Wi-Fi disponibles à proximité, les appareils envoient

continuellement des signaux. Comme la majorité des réseaux Wi-Fi sont fixes, il est possible d'estimer la position de l'utilisateur en fonction des réseaux détectés. Bien que le Wi-Fi n'ait pas été initialement conçu pour la localisation, l'analyse de la force du signal (RSSI) émis par les points d'accès ou les appareils permet d'obtenir une localisation relativement précise. Cette méthode s'appuie sur des techniques comme la triangulation ou la trilatération et repose sur des mesures régulières de l'intensité du signal, offrant ainsi des estimations fiables, même dans des environnements intérieurs complexes. Les données sur la position des points d'accès, stockées dans une base de données, permettent d'améliorer encore la précision de la localisation.

Vilaseca, D. I., & Giribet, J. I. (2013) ont proposé un système de navigation utilisant la combinaison des capteurs inertiels et des signaux Wi-Fi. Ils ont démontré que l'intégration des algorithmes de filtrage, comme le filtre Kalman améliore la précision des solutions de navigation en réduisant les erreurs liées à l'intensité du signal et aux capteurs inertiels. De plus, l'utilisation de la valeur du signal RSSI peut encore renforcer la précision de la localisation [24].

Bien que le Wi-Fi soit connu pour consommer davantage d'énergie que le Bluetooth, notamment le Bluetooth Low Energy (BLE), qui est spécifiquement conçu pour réduire l'utilisation de la batterie, il reste largement utilisé dans les applications de navigation. Cela s'explique par sa large disponibilité et sa présence dans presque toutes les infrastructures modernes. Comparé au Bluetooth, le Wi-Fi offre une meilleure portée et une précision de localisation supérieure, ce qui en fait un choix privilégié pour de nombreuses applications de navigation intérieure.

2.1.5 Ultra wideband (UWB)

UWB, ou Ultra-Wideband, est une technologie de communication sans fil qui utilise une large gamme de fréquences radio pour transmettre des données sur de courtes distances avec une très grande précision. Contrairement à d'autres technologies comme le Wi-Fi ou le Bluetooth, l'UWB émet des impulsions de faible puissance sur un large spectre de fréquences, ce qui permet de mesurer le temps de vol (Time of Flight, ToF) des signaux avec une grande précision.

Le calcul de la distance grâce à cette technologie, en utilisant le ToF, s'effectue entre deux dispositifs ou avec un appareil possédant la même technologie UWB. Ce calcul dépend du parcours du signal de l'émetteur vers le récepteur et du temps nécessaire pour le retour du récepteur vers l'émetteur. Il existe plusieurs moyens de calculer la distance de localisation, tels que la méthode de l'angle d'arrivée (AoA) ou l'analyse de la force du signal (RSS), etc. L'UWB joue un rôle crucial dans les systèmes de localisation en intérieur. Il est à noter que, par rapport aux autres technologies, l'UWB présente une faible erreur de précision, pouvant atteindre 20 cm. Tiemann, J., & Wietfeld, C. (2017) ont présenté un système de navigation évolutif pour drones utilisant la différence de temps d'arrivée (TDoA). Grâce au filtre Kalman, ils ont constaté que l'erreur de précision était de 10 cm [25]. La capacité à calculer des distances entre dispositifs avec une erreur de seulement quelques centimètres fait de la technologie UWB une solution idéale pour des applications de localisation et de navigation en intérieur.

L'évolution de la technologie UWB a poussé de nombreux chercheurs à se focaliser sur celle-ci afin de résoudre les problèmes liés au signal GPS dans les endroits où ce dernier ne peut être capté correctement. À l'origine, la technologie UWB était destinée aux applications militaires, mais au fil du temps, grâce aux avancées de la recherche, elle s'est diversifiée pour être utilisée dans plusieurs domaines, tels que la navigation, la domotique, et bien d'autres.

Dans la recherche effectuée par Czyslo, S. et al. (2008), un système de localisation a été développé en fusionnant la technologie UWB avec des capteurs inertiels grâce aux algorithmes de *dead reckoning* et de fusion de capteurs (sensor fusion). L'utilisation de l'algorithme de Kalman a été mise en avant pour filtrer les estimations de vitesse et d'accélération causées par les erreurs cumulatives de l'algorithme de dead reckoning [16, 18, 26]. Le principal problème de la localisation et de la navigation en intérieur avec la technologie UWB réside dans la difficulté d'obtenir une localisation précise, notamment lorsqu'il y a des obstacles. Parfois, ces obstacles peuvent provoquer une perte de connexion directe entre le récepteur et l'émetteur, ce qui complique encore davantage la situation. Pour résoudre ce problème, Segura, M. et al. (2012) ont proposé un système robotique intégrant un algorithme d'estimation pour améliorer la précision de la localisation. Leur approche

consiste à mettre en œuvre numériquement l'émetteur et le récepteur UWB tout en intégrant un système de radiofréquence. Grâce à cette méthode, le robot peut naviguer de manière autonome, même dans des environnements où les signaux UWB sont perturbés [27].
Au regard, de cette revue de la littérature et en considérant notre objectif de développer une application abordable dans un environnement comme un bâtiment universitaire, nous pensons que l'utilisation de l'UWB représente un atout majeur pour atteindre cet objectif, car, jusqu'à présent, elle est la seule technologie capable de permettre le calcul du positionnement à longue portée avec une erreur de précision assez faible.

Le tableau suivant montre la classification des technologies étudiées selon leur fonctionnement de l'extérieur ou de l'intérieur.
Tableau 1 : Classification des technologies selon leur utilisation pour la navigation intérieure et extérieure

Navigation à l'intérieur	Navigation à l'extérieur
RFID, Bluetooth, Wi-Fi, UWB Zigbee	GPS (GNSS), Wi-Fi

2.2 Intégration des principales technologies de localisation en intérieur dans du matériel

Du fait de leur efficacité dans le positionnement en intérieur, plusieurs des technologies précitées, ont été intégrées dans du matériel. Dans ce qui suit, nous faisons un bref résumé de cela.

2.2.1 Arduino

Arduino est une plate-forme électronique open source, reposant sur un matériel et des logiciels faciles à utiliser. La plate-forme Arduino propose divers dispositifs électroniques, tels que les capteurs RFID et les capteurs ultrasoniques, qui peuvent être utilisés dans les systèmes de navigation. Ces dispositifs, plus économiques que ceux proposés par d'autres plates-formes, permettent de concevoir un système de navigation accessible à moindre coût.

La navigation dans les bâtiments universitaires en utilisant Arduino repose sur l'utilisation de capteurs et de microcontrôleurs. En tant que plate-forme de prototypage électronique, Arduino offre un environnement de développement intégré (IDE), intuitif et facile à prendre en main. Les cartes Arduino représentent une solution à la fois économique et flexible pour les systèmes de navigation.
Arduino est principalement utilisé comme contrôleur pour lire les informations des capteurs et exécuter des commandes liées aux systèmes de navigation intérieure. Grâce à son faible coût et à sa flexibilité, Arduino constitue un atout majeur dans le développement de systèmes de navigation abordables. Parmi les technologies applicables aux systèmes de navigation, Arduino peut être associé à des cartes RFID, des capteurs infrarouges et des capteurs inertiels, ce qui permet d'améliorer la précision du positionnement et de suivre les mouvements des utilisateurs.

Pour mettre en œuvre la navigation intérieure, divers types de capteurs peuvent être utilisés, notamment des balises Bluetooth, des capteurs Wi-Fi, des capteurs ultrasoniques et des capteurs inertiels intégrés dans les téléphones. Les balises Bluetooth, par exemple, émettent des signaux que les smartphones peuvent détecter, ce qui permet de déterminer la position relative de l'utilisateur. Les réseaux Wi-Fi existants peuvent également trianguler la position d'un appareil en fonction de la puissance des signaux reçus par différents points d'accès.
Marasigan, R. I., et Dellosa, R. M., ont présenté un système fonctionnant dans des environnements où le GPS est inopérant. Leur drone, équipé d'un microcontrôleur Arduino, intégrait des capteurs ultrasoniques et un gyroscope, ce qui lui permettait de suivre une trajectoire précise. Grâce à l'intégration du Wi-Fi et à l'utilisation de la trilatération, ils ont

constaté que leur système de navigation obtenait une précision allant de 0,43 m à 1,93 m, malgré les interférences des signaux Wi-Fi [28]. Da Mota et al. ont proposé un système robotique mobile utilisant Arduino, couplé à des capteurs RFID et ultrasoniques, pour garantir que le robot reste sur le bon chemin. Ils ont également suggéré l'utilisation d'une modélisation mathématique, appelée « réseaux de Petri », pour surveiller les mouvements du robot [14]. Xiao et Coll [29] ont conçu la structure d'un système innovant basé sur plusieurs capteurs, qui offre une précision élevée pour la surveillance de l'état et de la position des utilisateurs. Ces techniques déterminent les emplacements à l'aide de capteurs basés sur la triangulation, installés dans des zones spécifiques.

L'intégration de ces technologies dans un environnement universitaire présente certains défis, notamment en matière de coûts. Tout d'abord, les coûts initiaux d'installation des capteurs peuvent être considérables. Les balises Bluetooth doivent être déployées à intervalles réguliers dans tout le bâtiment, ce qui nécessite une planification minutieuse ainsi qu'un investissement en matériel et en main-d'œuvre. De même, l'infrastructure Wi-Fi doit être adaptée et optimisée pour assurer une couverture précise et fiable. En dehors du coût des microcontrôleurs et des capteurs, une analyse préalable est nécessaire pour garantir la rentabilité du système. Les capteurs nécessitent un entretien régulier, notamment le remplacement des batteries pour les balises Bluetooth et les mises à jour logicielles pour maintenir leur précision et leur fiabilité. Par ailleurs, les infrastructures réseau doivent être surveillées et modernisées périodiquement pour éviter les interférences et les dégradations de signal. Les applications doivent être compatibles avec une grande variété d'appareils et de systèmes d'exploitation. Elles nécessitent également des mises à jour régulières pour s'adapter aux changements dans l'infrastructure des bâtiments ou pour intégrer de nouvelles fonctionnalités. Dans les bâtiments universitaires, l'utilisation d'Arduino représente une solution prometteuse dans le domaine de la localisation, car l'intégration de différents types de capteurs permet de surmonter les limitations des systèmes GNSS dans ces environnements. De plus, l'application de diverses méthodes de traitement des données par ces capteurs contribue à réduire les erreurs de positionnement et à améliorer la précision.

2.2.2 Raspberry Pi

Le Raspberry Pi est un nano-ordinateur monocarte, équipé d'un processeur ARM, peu coûteux et polyvalent. Il a été créé en 2012 par la Fondation Raspberry Pi, à l'université de Cambridge, pour promouvoir l'apprentissage de l'informatique et de la programmation dans les écoles. Le Raspberry Pi fonctionne principalement avec divers systèmes d'exploitation basés sur GNU/Linux, tels que Debian ou Ubuntu. Il est également compatible avec Windows pour l'Internet des objets (IoT).
Grâce à ses évolutions technologiques, le Raspberry Pi est désormais utilisé dans de nombreux domaines, comme la domotique, la robotique et tout système impliquant la technologie de l'Internet des objets. Dans le développement d'un système de navigation intérieure, l'utilisation conjointe du Raspberry Pi et de l'Arduino offre de nombreux avantages. Par exemple, grâce à sa puissance de calcul et à sa capacité de connexion via Wi-Fi ou Bluetooth, le Raspberry Pi peut gérer plusieurs tâches, notamment le traitement des données. L'Arduino, de son côté, est utilisé pour gérer les informations provenant des capteurs de positionnement connectés à ses ports. Grâce à sa flexibilité et à son système d'exploitation, le Raspberry Pi peut héberger des applications légères adaptées à ses capacités de performance.

Plusieurs recherches ont exploité cette combinaison de matériels. Gupta, S., et Garg, D. ont étudié un système robotique de navigation intérieure basé sur le Raspberry Pi 3B+. Ce système utilise des capteurs ultrasoniques ainsi que des caméras pour capturer des images des corridors environnants, images ensuite traitées à l'aide de techniques telles que la détection des contours et les opérations morphologiques. Ces méthodes, proposées par les auteurs, permettent au robot de naviguer dans les corridors en identifiant les pixels pertinents à partir des images et en évitant les obstacles grâce aux capteurs ultrasoniques [30]. Bin Abdul Malek, M. F., et Drieberg, M. ont proposé un système de localisation et de navigation basé sur la réalité augmentée. L'implémentation du système repose sur le Raspberry Pi, équipé d'une caméra connectée, et des lunettes adaptées à la réalité augmentée. Ce système positionne des marqueurs virtuels, tels que des symboles ou des flèches, pour guider et orienter l'utilisateur pendant la navigation [29]. L'utilisation du Raspberry Pi dans les

systèmes de localisation et de navigation intérieure répond efficacement à divers besoins. En combinant cette technologie avec l'Arduino, qui contrôle les différents capteurs du système, il est possible de développer une solution performante et économique [3]. Ces systèmes, basés sur cette plate-forme, sont reconnus pour leur efficacité et leur accessibilité financière.

2.3 Les services cartographiques de navigation

Les services cartographiques de navigation fournissent des cartes interactives et des itinéraires pour guider les utilisateurs d'un point à un autre. Ces systèmes s'appuient sur des technologies GPS pour la localisation en temps réel et sur des algorithmes avancés pour optimiser les trajets. Ils jouent un rôle essentiel dans la vie quotidienne en intégrant des données sur le trafic, les transports publics et les points d'intérêt, ce qui facilite grandement la navigation. Aujourd'hui, grâce aux progrès technologiques, de tels systèmes sont disponibles sur divers appareils : non seulement sur les smartphones, mais aussi dans les voitures et sur d'autres dispositifs utilisant la technologie GPS. Parmi les services cartographiques les plus connus, on peut citer OpenStreetMap et Google Maps comme exemple.

Dans le présent travail de recherche, le système de navigation proposée sera équipé d'un service cartographique intégré pour faciliter l'expérience de l'utilisateur pendant la navigation. Dans ce qui suit, nous étudierons les services et technologies nécessaires pour garantir une navigation fluide aux utilisateurs de l'application. Nous nous concentrerons principalement sur des services et technologies open source afin de développer un système à faible coût.

2.3.1 OpenStreetMap

Il existe plusieurs entreprises dans le domaine cartographique, telles que Google ou Yahoo, mais beaucoup d'entre elles proposent des services payants et ne partagent pas leurs données cartographiques. Ces entreprises autorisent l'utilisation de leurs données via des API, mais avec des accès restreints. OpenStreetMap (OSM) est un projet collaboratif visant à créer une base de données cartographique libre et éditable par tous. Initié en 2004 par Steve Coast, OSM permet à ses utilisateurs de collecter et de mettre à jour des données géographiques du

monde entier, qui sont ensuite disponibles sous une licence open-source. Le projet est souvent décrit comme ayant pour but de « construire une carte mondiale » [31].

Le développement d'OSM joue un rôle important dans l'évolution des applications de navigation utilisant des données cartographiques. Les utilisateurs peuvent adapter les cartes OSM selon leurs besoins, ce qui est particulièrement pertinent pour les développeurs et les chercheurs dans le domaine de la navigation.

La collecte des données OSM est réalisée par des contributeurs qui utilisent des sources telles que des relevés GPS, des images satellites et des informations locales. Ces contributeurs ajoutent et modifient les données en utilisant des éditeurs comme JOSM ou iD Editor, dessinant des nœuds, des chemins et des relations pour représenter les entités géographiques. Les modifications sont envoyées aux serveurs OSM, où elles sont temporairement stockées et validées pour garantir leur qualité. Après validation, les données sont intégrées dans la base de données principale d'OSM, qui utilise PostgreSQL avec l'extension PostGIS pour le stockage géospatial [32]. Les données géographiques sont ensuite indexées afin d'optimiser les performances des requêtes spatiales. Les contributeurs continuent de soumettre de nouvelles données et mises à jour, assurant ainsi que la base de données reste à jour et précise. Les utilisateurs peuvent accéder aux données OSM via des API publiques, des fichiers téléchargeables et divers outils d'extraction et d'analyse.
Comme, par défaut, OSM est totalement gratuit, de nombreux projets ont vu le jour pour créer des applications utilisant ce service, permettant ainsi de développer des systèmes de navigation moins coûteux, notamment pour les environnements complexes tels que l'intérieur des bâtiments.
En 2013, Afyouni et al. ont présenté un système de navigation intérieure utilisant OSM à faible coût (Afyouni et al., 2014 ; Fallah et al., 2013 ; Strenberg et al., 2013). Dans une recherche menée par Basiri A. et al., l'intégration de données OSM avec des services de navigation utilisant la réalité augmentée et des bases de données graphiques comme Neo4j a permis de proposer une navigation visuelle intuitive, adaptée aux environnements connectés et déconnectés. Leur étude met en avant l'efficacité des bases de données graphiques pour gérer et analyser des données hautement connectées [3].

2.3.2 Google Maps

Google Maps est un service de cartographie en ligne proposé par Google, qui offre des cartes interactives, des itinéraires et des vues panoramiques. Ce service fournit des informations géographiques précises et actualisées, facilitant ainsi la navigation et la planification de trajets. Il permet aux utilisateurs de localiser divers lieux, tels que des entreprises locales, des points d'intérêt et des services essentiels. En outre, Google Maps propose des informations en temps réel, comme le trafic et les transports en commun, ce qui aide à éviter les embouteillages et à choisir les meilleurs itinéraires. Le service n'est pas seulement utilisé pour la navigation : les entreprises peuvent également en bénéficier en augmentant leur visibilité et en attirant des clients potentiels grâce à la représentation détaillée de leurs établissements.

Toutefois, soulignons que Google Maps présente certaines limitations en matière de navigation. Son système de localisation repose principalement sur le GPS, et comme mentionné précédemment, la perte de signal à l'intérieur de certains bâtiments rend le service difficilement utilisable pour la navigation intérieure. Par exemple, naviguer dans des environnements universitaires à l'aide de Google Maps peut s'avérer compliqué, le plus souvent impossible, en raison de cette dépendance au GPS.

Pour pallier ces limites, la navigation et la localisation en intérieur avec Google Maps nécessitent l'utilisation de divers capteurs afin de garantir une précision optimale. Contrairement à la navigation extérieure, qui repose principalement sur le GPS, la navigation intérieure doit surmonter le problème de la perte de signal. L'utilisation de Google Maps pour la localisation est facilitée par les capteurs intégrés dans les smartphones, tels que les accéléromètres, les gyroscopes et les magnétomètres. Ces capteurs détectent les mouvements et l'orientation de l'utilisateur, ce qui aide à calculer sa position. Comme Google Maps s'appuie sur le système de positionnement GPS, le calcul de la position de l'utilisateur est effectué à l'aide de la méthode de trilatération, garantissant ainsi une certaine précision [19]. L'utilisation de Google Maps pour les services de cartographie est plus complexe que celle d'OSM, car Google Maps n'est pas totalement open-source. Toutefois, le changement des coordonnées et d'autres modifications ne sont gérés que par les développeurs de Google. Les

développeurs tiers peuvent toutefois accéder aux fonctionnalités de Google Maps via son API. À noter que l'API de Google impose certaines limitations : elle est gratuite pour les services de base, ce qui est généralement suffisant pour tester une application, mais les fonctionnalités avancées nécessitent un abonnement payant.

2.4 Les critères de localisation et de navigation intérieure

Concernant nos recherches et notre méthodologie, nous avons analysé les points forts et les faibles des outils, et des technologies nécessaires pour concevoir un système de navigation en intérieur. Nous nous sommes concentrés sur les technologies et outils les mieux adaptés pour garantir un résultat performant et fiable dans le cadre de notre système de navigation au sein de l'environnement universitaire. Il est essentiel de définir des critères clairs et précis pour la réalisation de notre projet, afin que les utilisateurs de notre système puissent s'orienter efficacement et éviter de se perdre.
Les critères de localisation et de navigation en intérieur jouent un rôle clé dans la conception de systèmes capables de guider et de positionner avec précision des personnes ou des objets dans des environnements complexes, tels que des bâtiments, des centres commerciaux ou des hôpitaux. Ces critères influencent directement la performance, la précision et la fiabilité des systèmes, qui peuvent être appliqués dans diverses applications de navigation.

Parmi les principaux critères, on peut étudier quelques-uns :

- Précision de la localisation
    - Précision absolue : Il s'agit de la capacité du système à déterminer la position exacte d'un utilisateur ou d'un objet par rapport à un point de référence. Dans un environnement universitaire, une précision absolue est cruciale pour éviter que les utilisateurs se perdent ou aient des difficultés à atteindre leur destination. Une localisation imprécise risque de semer la confusion quant à la position réelle et à la destination des utilisateurs.
    - Précision relative : Elle désigne la capacité du système à localiser un utilisateur ou un objet par rapport à un point de repère, ce qui est souvent requis dans des applications telles que la logistique ou le suivi des mouvements.

- La portée et la couverture

La portée et la couverture figurent parmi les critères essentiels dans les systèmes de localisation et de navigation, car elles déterminent l'efficacité de la localisation dans différents espaces. Par exemple, une balise Bluetooth peut couvrir une distance allant jusqu'à quelques dizaines de mètres, tandis qu'un signal Wi-Fi peut atteindre une portée d'environ 100 mètres en intérieur. La portée fait référence à la distance maximale à laquelle un capteur peut émettre ou détecter un autre capteur. Dans les systèmes de navigation qui utilisent des capteurs externes, l'évaluation de la couverture est essentielle pour garantir une installation optimale et un bon fonctionnement global.

- Le temps de latence

Le temps de latence correspond au délai nécessaire pour localiser un utilisateur. Dans le cadre de notre projet, il est crucial d'optimiser ce paramètre. Par exemple, si un système présente une latence élevée, la position de l'utilisateur affichée ne sera pas actualisée en temps réel. Cela peut entraîner une navigation erronée, car l'utilisateur pourrait avoir déjà dépassé l'endroit indiqué par le système.

- La consommation d'énergie

Lors du développement d'un système de navigation, il est essentiel de minimiser la consommation d'énergie afin de préserver la batterie des appareils des utilisateurs. Ce critère est particulièrement important pour garantir la durabilité et l'efficacité des équipements, qu'il s'agisse de balises, de capteurs ou de smartphones. Certaines technologies, telles que Bluetooth Low Energy (BLE) et Zigbee, sont souvent privilégiées pour leur faible consommation d'énergie.

- La robustesse et la fiabilité
  - La robustesse : un système robuste est capable de résister aux perturbations des signaux. Par exemple, dans un environnement universitaire, les murs, les meubles ou d'autres équipements électroniques peuvent perturber les signaux, rendant une forte robustesse essentielle.

- La fiabilité : un système fiable doit être capable de fournir des positions précises et d'assurer un fonctionnement ininterrompu.

➢ La scalabilité

La scalabilité désigne la capacité du système à maintenir sa performance lorsque la demande augmente. Dans un environnement universitaire, le système doit pouvoir s'adapter à une augmentation du nombre d'utilisateurs ou permettre l'ajout de nouveaux capteurs sans compromettre son fonctionnement. Un système incapable de supporter de telles évolutions serait considéré comme non scalable.

➢ La facilité d'intégration et d'installation

Ce critère est essentiel lors de la mise en œuvre du système. Un déploiement facile permet de gagner du temps et de réduire les coûts d'installation. De plus, le système doit être adaptable aux technologies existantes dans l'environnement, comme le Wi-Fi, sans nécessiter de modifications importantes.

Les systèmes basés sur des capteurs, des balises ou d'autres équipements doivent également être simples à installer et compatibles avec les contraintes spécifiques de l'environnement intérieur. Une installation simplifiée contribue à réduire les coûts de maintenance et de mise en œuvre.

➢ La sécurité et la confidentialité

La sécurité et la confidentialité des données sont des critères majeurs, surtout dans les applications de navigation et de localisation. Avant le déploiement d'un système, il est impératif de vérifier comment les données sont collectées, traitées et protégées. La protection des itinéraires empruntés et des mouvements des utilisateurs en temps réel est essentielle pour éviter tout risque d'exploitation abusive des données.

➢ L'interface utilisateur (UI) et l'expérience utilisateur (UX)

L'interface utilisateur et l'expérience utilisateur sont des éléments déterminants pour l'efficacité d'un système de navigation. Une interface intuitive et une expérience utilisateur

fluide permettent aux utilisateurs d'interagir facilement avec le système, améliorant ainsi son adoption et son efficacité dans un environnement universitaire.
Le système doit disposer d'une interface simple et facile à utiliser, adaptée aussi bien aux utilisateurs novices qu'aux utilisateurs expérimentés. Il doit fournir des informations claires et compréhensibles, accompagnées d'indications précises pour guider un utilisateur d'un endroit à un autre. Par exemple, dans un environnement universitaire, le système pourrait permettre à l'utilisateur de sélectionner la salle la plus proche en fonction de sa localisation actuelle et de sa destination. Il pourrait également afficher un tracé indiquant le chemin à suivre, ainsi que des informations en temps réel sur la position de l'utilisateur. Plus l'interface du système est complexe ou difficile à interpréter, plus le risque de désorientation augmente.

Dans le deuxième chapitre, nous avons analysé les différentes technologies et les services open-source utilisés dans la navigation en intérieur universitaires. Nous avons abordé les problèmes et les défis potentiels liés à ce type de développement, ce qui nous a permis de sélectionner les technologies et services les mieux adaptés à nos objectifs.
Pour garantir le bon fonctionnement du système, nous avons également étudié les critères essentiels à prendre en compte lors du développement. Dans la prochaine section, nous analyserons en détail la technologie UWB (Ultra Wideband), qui semble offrir des performances supérieures par rapport à d'autres solutions en surmontant efficacement le problème de perte de signal.
Le système de navigation repose nécessairement sur des données en temps réel pour permettre à l'utilisateur de localiser sa position avec précision. Toujours dans cette section, nous examinerons les méthodes de calcul de positionnement, telles que la triangulation et la trilatération, afin de choisir la méthode la plus appropriée pour notre projet.

CHAPITRE 3
LA LOCALISATION ET LA NAVIGATION AVEC L'UWB

L'UWB trouve ses origines dans la période de l'évolution de la radio et a été développé par Heinrich Hertz et Guglielmo Giovanni Maria Marconi. Elle a vu le jour à la fin du 19e siècle, en 1887, grâce à des tests sur la création d'étincelles diffusées à travers des dipôles à large bande chargés. À ses débuts, la technologie ne transmettait pas d'informations. Ce n'est qu'ensuite qu'elle a évolué pour faciliter la communication dans les services militaires.
Grâce à son évolution, de nos jours, la technologie ne se limite plus aux services militaires. Elle est utilisée dans plusieurs domaines tels que la navigation, la domotique, la santé, l'industrie, et l'automobile, entre autres.
La technologie UWB se distingue par un délai de latence extrêmement faible. Elle transmet les informations sous forme d'une série d'impulsions d'une durée d'une nanoseconde chacune. Parmi les critères examinés dans le chapitre précédent, on a vu que le temps de latence dans le domaine de la navigation est un critère crucial pour les applications utilisant les systèmes de positionnement. C'est pour cette raison qu'elle est devenue un sujet de recherche majeur dans ce domaine.

Dans les chapitres précédents, nous avons abordé les différents types de technologies utilisées pour la navigation intérieure. L'utilisation de la technologie UWB a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs grâce aux résultats prometteurs qu'elle offre pour la localisation et la navigation dans les zones à faible signal GPS, ainsi que pour la réduction de la consommation d'énergie dans les applications basées sur l'UWB.

3.1 Le fonctionnement de l'UWB

La technologie UWB est une technologie qui permet de transmettre des informations sur une large bande passante de plus de 500 MHz. L'UWB, un protocole de communication similaire au Bluetooth ou au Wi-Fi, transmet les informations par des séries d'impulsions très rapides.

En comparant la technologie UWB aux autres technologies, on constate qu'elle utilise une large bande passante et transmet les données plus rapidement que le Wi-Fi et le Bluetooth. Pour le Wi-Fi, la bande passante moyenne varie entre 20 MHz et 160 MHz, tandis que le Bluetooth dispose d'une bande passante d'environ 1 MHz. Prenons l'exemple de nos recherches concernant la navigation en intérieur : la technologie UWB fonctionne grâce à un émetteur-récepteur et présente l'avantage de ne pas nécessiter l'installation d'antennes. Un appareil possédant la technologie peut communiquer ou détecter un appareil aux alentours possédant la même fonctionnalité.

3.2 Caractéristiques de l'UWB

La mise en œuvre de la technologie dans la navigation ne nécessite pas uniquement un espace ouvert. C'est une technologie adaptable aux environnements comportant divers obstacles et qui fonctionne grâce à l'installation de balises ou de modules équipés de la technologie UWB. Cette technologie excelle dans la résolution des problèmes de positionnement, bien qu'elle soit relativement coûteuse à mettre en place. Ces balises sont capables de localiser ou de détecter l'emplacement d'une autre balise pour une précision allant jusqu'à 10 cm grâce à sa capacité de transmission.

La différence entre les transmissions radio conventionnelles et celles utilisant la technologie UWB (Ultra-Wideband) réside dans la manière dont les informations sont transmises. Les systèmes conventionnels transmettent des informations en variant la puissance et la fréquence, tandis que les transmissions UWB envoient des informations en générant de l'énergie radio à des intervalles de temps spécifiques et en utilisant une large bande passante. La technologie UWB permet également la transmission des informations en s'appuyant sur la manière dont les impulsions (les petits signaux envoyés) sont générées. Par exemple, la direction, la force ou la forme des impulsions peuvent être modifiées selon les besoins. Ces impulsions peuvent être envoyées à un rythme lent et espacé ou très rapidement.

Grâce à la rapidité de l'envoi des impulsions UWB, la technologie peut transmettre plus d'un milliard d'impulsions par seconde. Elle permet ainsi le transfert d'une grande quantité de données (jusqu'à 675 mégabits par seconde). De plus, elle dispose d'une capacité de correction des erreurs pouvant se produire lors de la transmission, garantissant ainsi des informations fiables.

Avec ses caractéristiques, la technologie UWB apparaît comme un choix pertinent pour atteindre notre objectif de recherche. Elle offre toutes les fonctionnalités nécessaires pour démontrer que le système peut surmonter les problèmes couramment rencontrés dans les environnements universitaires lors de la transmission des informations.
Dans la partie suivante, nous examinerons les différentes méthodes à utiliser pour déterminer la position d'un utilisateur en utilisant la technologie UWB. Nous analyserons ensuite quelle approche serait la plus efficace pour minimiser les erreurs de précision dans des environnements comportant de nombreux obstacles.

3.3 Méthodes de mesure pour localisation à l'aide de l'UWB

Le système de localisation basé sur la technologie UWB repose sur l'envoi de signaux très courts et rapides, qui se déplacent à la vitesse de la lumière. Ces impulsions sont utilisées pour calculer la distance entre un appareil et son récepteur. Pour qu'un appareil utilisant la technologie UWB en tant qu'émetteur puisse localiser un autre appareil équipé de balises fonctionnant avec la même technologie, plusieurs méthodes sont utilisées :

- La méthode de l'angle d'arrivée (AoA), qui permet de déterminer la direction exacte de provenance du signal.
- La méthode Time of Arrival (ToA), qui calcule la distance en mesurant le temps que met le signal d'un Tag pour atteindre une ancre.
- La télémétrie bidirectionnelle (TWR), qui mesure le temps de trajet aller-retour du signal afin d'optimiser la précision en temps réel.
- La méthode Phase Difference of Arrival (PDoA), qui compare les phases des signaux pour estimer la distance en temps réel [33, 34].

En utilisant ces méthodes combinées avec des techniques de filtrage, la localisation UWB peut atteindre une précision d'erreur allant de 10 à 20 cm, ce qui est particulièrement adapté pour la localisation dans des environnements complexes comme les universités.

3.3.1 Angle of Arrival (AoA)

AoA (Angle of Arrival) est une méthode utilisée dans les systèmes de localisation, permettant de déterminer la direction de propagation d'une onde radiofréquence atteignant un récepteur (une ancre) équipé de plusieurs antennes en réseau.

L'AoA permet de déterminer la direction du signal en mesurant la différence de temps d'arrivée au niveau des éléments du réseau d'antennes.

Les recherches ont montré que le calcul de l'angle d'arrivée peut être effectué grâce à la force du signal (RSSI). Prenons l'exemple d'un émetteur (Tag) qui reçoit des données de deux antennes distinctes (ancres). En utilisant le RSSI pour déterminer l'angle du signal, il devient possible de calculer la localisation de l'émetteur via la technique de triangulation. La force du signal joue un rôle essentiel dans la technologie UWB, car plus la force du signal est élevée, plus les données obtenues sont fiables [28, 33, 35].

En général, on peut affirmer que l'AoA a une grande importance dans les systèmes de navigation intérieure. Il est crucial de connaître la provenance du signal de l'ancre avant de pouvoir se localiser avec précision dans un plan quelconque.

3.3.2 Received Signal Strength (RSS)

Received Signal Strength (RSS) – est la puissance du signal captée par un dispositif lorsqu'il reçoit un signal sans fil provenant d'un autre émetteur, comme un routeur Wi-Fi ou une balise.

Dans un système de localisation, cette méthode permet d'estimer la distance ou la position d'un objet en mesurant l'intensité du signal radio lorsqu'il atteint un récepteur. Dans le chapitre précédent, nous avons analysé en quoi consiste la technologie UWB ainsi que les problèmes qu'elle peut rencontrer dans les environnements universitaires [36]. En raison des obstacles présents dans ces environnements, les conditions NLOS (Non Line of Sight) peuvent fausser les estimations de localisation [37]. Il est bien connu que plus le signal diminue, plus la navigation devient difficile, comme cela a été illustré avec l'exemple du GPS. Cependant, l'avantage principal de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas une synchronisation temporelle stricte entre les appareils et qu'elle peut être utilisée avec des systèmes sans fil existants, comme le Wi-Fi. Bien que la méthode RSS puisse rencontrer des

problèmes liés au signal dans des environnements complexes, elle peut être combinée avec d'autres méthodes, telles que l'AoA ou la ToA, afin de fournir des résultats plus robustes et précis.

La puissance RSS est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$P_r(d) = P_0 - 10\gamma log_{10}d + S \quad (1)$$

d'où :

- $P_r(d) - \ (dbm)$: est la puissance du signal reçue à une distance d de l'émetteur au récepteur
- $d - (m)$: distance entre deux nœuds, entre l'émetteur au récepteur
- P_0: est la puissance reçue à une distance de référence de 1m
- Le paramètre γ est connu sous le nom d'exposant de perte de trajet, qui dans les environnements intérieurs prend généralement des valeurs comprises entre 2 et 6
- $S - (dB)$: représente les variations de décoloration à grande échelle (c'est-à-dire l'ombrage). Il est courant de modéliser S comme une variable aléatoire Gaussienne avec une moyenne nulle et un écart type σ_S.

3.3.3 Time of Arrival (ToA)

Time of Arrival (ToA) – correspond au temps nécessaire pour qu'un signal radio émis par un émetteur atteigne un récepteur. Lors de la transmission, le temps écoulé entre l'émission du signal et sa réception est appelé le temps de vol (ToF).

La méthode ToA est l'une des plus importantes dans les systèmes de localisation utilisant la technologie UWB. Son principe repose sur la télémétrie bidirectionnelle (TWR). Cela signifie que, pour calculer la distance entre un tag et une ancre, le tag doit être capable d'envoyer et de recevoir un signal provenant de l'ancre. Par exemple, si trois ancres sont positionnées à différents endroits, le tag envoie un signal à chacune d'elles. Dès que le signal radio atteint une ancre, le système enregistre le temps d'arrivée (ToA). Le temps écoulé depuis l'envoi du signal, soit le temps de vol (ToF), est également pris en compte. Le ToA et le ToF varient en fonction de la position relative de chaque ancre par rapport au tag.

Pour calculer la distance entre le tag et une ancre, il est essentiel de connaître le temps de propagation du signal. La distance est déterminée en fonction du temps de vol (ToF) et de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques, qui est approximativement égale à la vitesse de la lumière (V ≈ 3 10^8 m/s). Connaissant le temps de propagation du signal, la distance peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$d = v_l * t_{prop} \quad (2)$$

d'où :

- $d - (m)$: la distance entre deux l'émetteur et le récepteur
- $v_l - (m/s)$: la vitesse de la lumière (vitesse de propagation des ondes électromagnétiques)
- $t_{prop} - (s)$: temps de propagation des ondes électromagnétiques

Dans un système de navigation utilisant la méthode ToA, le principal défi réside dans la détermination précise du temps que met le signal pour atteindre le tag, ainsi que du temps qu'il met à revenir. Cette section explore les moyens de calculer la durée de propagation du signal. Il existe deux approches principales pour mesurer ce temps entre le tag et l'ancre : Single-Sided Two-Way Ranging (SS-TWR) et Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR) [34].

A. Single-Sided Two-Way Ranging (SS-TWR)

Le calcul de la distance avec la méthode Single-Sided Two-Way Ranging (SS-TWR) repose sur l'échange de deux messages entre le tag et l'ancre. L'ancre envoie un signal, puis reçoit à son tour une réponse du tag. La distance est mesurée en fonction du délai total, incluant le temps nécessaire pour le traitement du signal lors de l'aller-retour. Cependant, cette méthode présente une limitation : elle n'est pas adaptée lorsqu'il s'agit de calculer la distance entre plusieurs ancres. Un avantage notable de la méthode SS-TWR est qu'elle consomme moins d'énergie que la méthode DS-TWR.

L'image suivante illustre le fonctionnement de la méthode SS-TWR entre le tag et l'ancre

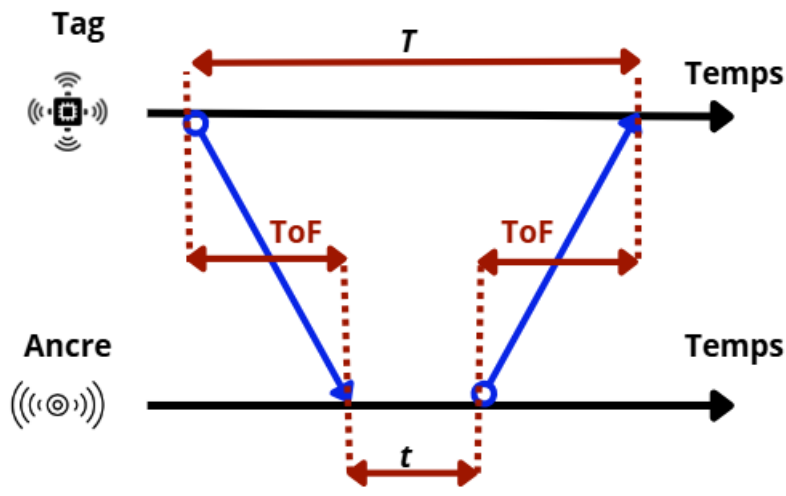


Figure 3 : Fonctionnement de SS-TWR

© Hafashimana Eric

À partir de cette image, la durée de propagation du signal est donnée par la formule suivante :

$$T_{prop} = \frac{1}{2}(T - t) \quad (3)$$

d'où :

- $T_{prop} - (s)$: est la durée totale de propagation du signal
- $T - (s)$: est la durée du moment que le tag envoie et reçoit le signal
- $t - (s)$: est la durée du moment que l'ancre reçoit le signal et au moment quand elle répond

B. Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR)

Avec la méthode Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR), le calcul de la distance repose sur plusieurs échanges de signaux entre un tag et une ancre. En général, au minimum trois réponses sont nécessaires. L'ancre envoie un signal à plusieurs reprises et reçoit autant de réponses du tag. Ces multiples échanges permettent de prendre en compte les délais d'envoi et de réception du signal, ainsi que les décalages temporels, pour calculer avec

précision la durée totale de propagation du signal. À partir de cette durée, on peut déterminer la distance qui sépare le tag de l'ancre.

L'image suivante illustre le fonctionnement de la méthode DS-TWR entre le tag et l'ancre

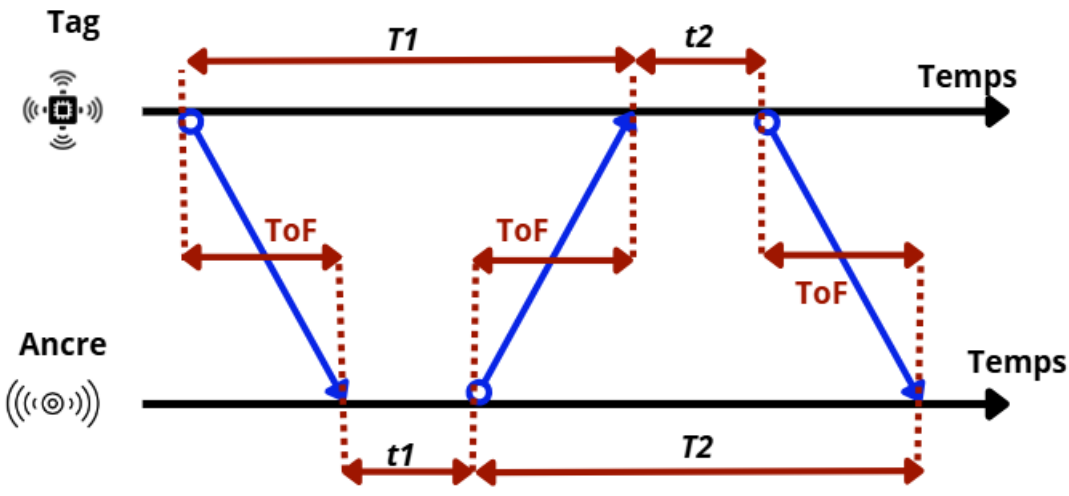


Figure 4 : Fonctionnement de SD-TWR

© Hafashimana Eric

$$T_{prop} = \frac{(T1*T2-t1*t2)}{(T1+T2+t1+t2)} \quad (4)$$

d'où :

- $T_{prop} - (s)$: est la durée totale de propagation du signal
- $T1\ et\ T2 - (s)$: sont les durées du moment que le tag et l'ancre envoient et reçoivent le signal l'un à l'autre. T1 pour le premier envoie et T2 pour la deuxième envoie
- $t1, t2 - (s)$: sont les durées du moment que l'ancre et le tag reçoivent le signal, et au moment quand ils répondent l'un à l'autre. $t1$ pour la première réponse et $t2$ pour la deuxième réponse.

3.3.4 Time Difference of Arrival (TDoA)

Time Difference of Arrival (TDoA) – est une méthode permettant de mesurer la différence de temps à laquelle un signal radio atteint plusieurs récepteurs (ancres). En général, le calcul de la localisation avec cette méthode repose sur la différence de ToA.

Bien que cette méthode soit essentielle dans les systèmes de localisation et de navigation en intérieur, elle présente des limitations en raison des obstacles rencontrés dans des environnements tels que les bâtiments universitaires. Si elle est utilisée seule, sans combinaison avec d'autres méthodes ou sans techniques de filtrage, son efficacité reste limitée. Par exemple, dans les recherches menées par Heydariaan et al. (2020), un système de localisation en intérieur appelé AnguLoc, basé sur la méthode de l'angle d'arrivée (AoA), a été étudié. Lors de tests impliquant des transmissions simultanées, ils ont constaté une erreur allant jusqu'à 2,4 mètres, causée par des imprécisions d'horodatage [14]. Contrairement à la méthode ToA, qui mesure le temps exact de transmission des signaux, le TDoA s'appuie sur la différence relative des temps de réception de ces signaux. Les recherches ont également montré que la méthode TDoA nécessite une synchronisation précise des horloges entre les balises pour garantir une bonne précision. De plus, l'intégration de la méthode TDoA avec d'autres approches, telles que la méthode AoA, ou l'utilisation de techniques de filtrage, comme le filtre de Kalman, améliore considérablement la précision, même dans des environnements contenant de nombreux obstacles [38, 39].

3.3.5 Phase Difference of Arrival (PDoA)

Phase Difference of Arrival (PDoA) est l'une des méthodes utilisées dans les systèmes de localisation en intérieur. Tout comme le TDoA, la méthode PDoA consiste à mesurer la différence de phase au moment de la réception d'un signal. En se basant sur ces mesures de phase d'arrivée, les balises peuvent estimer l'Angle of Arrival (AoA).

Dans les systèmes de localisation, le calcul du positionnement à l'aide de la méthode de différence de phase d'arrivée est à la fois simple et efficace, car cette méthode ne nécessite que deux balises. Comparée à la méthode TDoA, la méthode PDoA consomme moins d'énergie et ne requiert pas de synchronisation d'horloge entre les balises [40, 41].

Cependant, comme pour d'autres méthodes, le système de positionnement repose sur la réception de signaux, qu'ils soient en ligne de vue directe (LOS) ou hors ligne de vue (NLOS). Le problème survient particulièrement dans les cas NLOS, par exemple à l'intérieur des bâtiments où des obstacles ou des interférences peuvent affecter la qualité du signal. Bien que la technologie UWB soit largement reconnue pour ses performances dans les systèmes de navigation, elle nécessite souvent l'intégration d'autres techniques afin de minimiser les erreurs pouvant survenir lors de la localisation. Comme pour d'autres méthodes de localisation, l'utilisation de techniques de filtrage est essentielle avec la méthode PDoA. Cela permet de calculer l'AoA avec plus de précision et de surmonter les erreurs de phase qui peuvent affecter les performances de cette méthode.

3.4 Approches géométriques pour la localisation avec UWB

Dans la partie précédente, nous avons examiné les principales méthodes de mesure pouvant être utilisées pour le positionnement en exploitant la technologie UWB. Dans l'introduction, nous avons évoqué comment l'évolution technologique a révolutionné le domaine de la navigation. Pour rendre la navigation possible, il est nécessaire d'intégrer des méthodes permettant d'exploiter les données collectées grâce aux approches mentionnées précédemment et d'afficher les résultats sur nos smartphones.

Dans cette section, nous analyserons les méthodes géométriques qui peuvent être utilisées pour rendre la navigation possible dans un plan. Nous nous concentrerons sur l'analyse de la méthode de triangulation et de la méthode de trilatération [1, 2, 33, 34]. Dans les travaux de recherche menés par Messaoudi, M. D. et al., les auteurs ont proposé une canne blanche autonome équipée de capteurs à ultrasons destinée à aider les personnes malvoyantes à naviguer à l'intérieur des bâtiments. Ils ont souligné que les méthodes de triangulation et de trilatération sont fréquemment utilisées dans le domaine de la navigation. Dans leur recherche, les deux méthodes ont été combinées pour améliorer les performances de la canne. La méthode de triangulation a été employée pour guider les malvoyants, tandis que la trilatération a permis de déterminer leur position avec précision [1, 2].

3.4.1 Triangulation

La triangulation est une méthode qui permet de déterminer le positionnement ou l'emplacement d'un objet ou d'une personne en mesurant les angles et les distances entre plusieurs points. Pour utiliser cette méthode, au moins trois balises sont nécessaires : un tag et deux ancres.

Des recherches ont été menées dans divers domaines en exploitant la triangulation. Chen, J. et al. (2020) ont étudié la reconstruction 3D en vision par ordinateur en déterminant la position d'un point dans l'espace tridimensionnel grâce à la combinaison de la triangulation avec d'autres approches, comme la méthode d'optimisation Linear-Eigen [42]. Dans le domaine de la navigation, la combinaison de la triangulation avec d'autres techniques est un atout majeur pour concevoir des systèmes robustes dans des environnements intérieurs. Par exemple, Lee, B. a proposé un système robotique d'auto-localisation en utilisant la force du signal RSSI et en intégrant différentes méthodes telles que le ToA [43]. Par ailleurs, Jensen, T. L. et al. ont présenté un système innovant pour surveiller les hélices d'éoliennes en mouvement. Dans ce système, la triangulation est utilisée pour mesurer les angles d'inclinaison et les mouvements précis des hélices à l'aide de signaux UWB. Des capteurs sont placés à la base et à la pointe des pales, et les mesures des angles d'inclinaison permettent d'estimer l'orientation exacte de chaque pale en temps réel, cela aide à détecter d'éventuelles déviations nécessitant une intervention [44]. De plus, dans des environnements complexes contenant des obstacles, où le bruit ou la proximité d'objets peut altérer la précision des mesures, l'utilisation de méthodes de filtrage ou la combinaison avec d'autres techniques permet de corriger les erreurs et d'améliorer la précision.

Calcul de la triangulation

En partant de la définition de la triangulation, cette section montre comment calculer la position d'un utilisateur en se basant sur l'angle du signal et les distances séparant le tag et les deux ancres.

La figure suivante illustre le placement d'un tag et de deux ancres, A et B, dans un plan. Dans ce plan, le tag est représenté par un smartphone.

- La distance entre le tag et l'ancre A est notée a.
- La distance entre les ancres A et B est notée b.
- La distance entre le tag et l'ancre B est notée c.

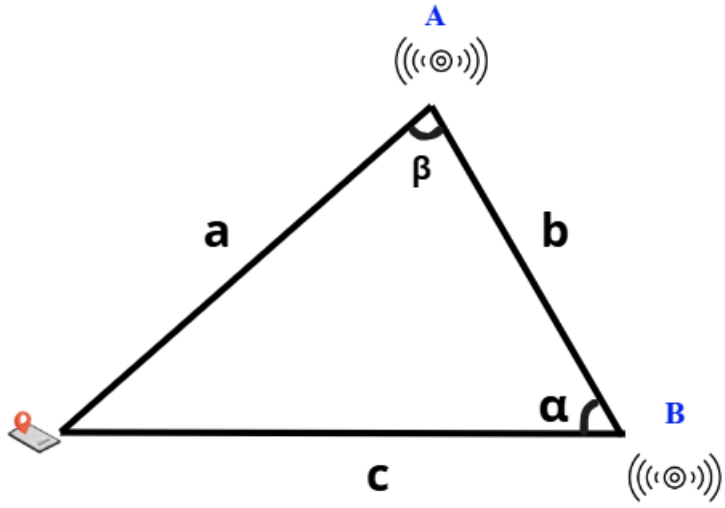


Figure 5 : Méthode de triangulation

© Hafashimana Eric

En utilisant le théorème des cosinus, qui énonce que le carré de chaque côté d'un triangle est égal à la somme des carrés des deux autres côtés, moins le double du produit de ces deux côtés et du cosinus de l'angle inclus, on obtient la relation suivante :

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc * \cos\alpha \quad (5)$$

$$\cos\alpha = \frac{b^2+c^2-a^2}{2bc} \quad (6)$$

Le calcul du sinus de l'angle à l'aide du théorème de Pythagore est effectué en utilisant cette formule :

$$cos^2\alpha + sin^2\alpha = 1 \quad (7)$$

$$\sin\alpha = \sqrt{1 - cos^2\alpha} \quad (8)$$

La méthode de triangulation repose sur la division d'une surface ou d'un espace en triangles, dont les propriétés géométriques sont bien connues et faciles à manipuler. Elle exploite le fait qu'un triangle est une forme déterminée soit par ses trois côtés, soit par deux côtés et

l'angle compris entre eux. Une fois ces paramètres mesurés, les autres caractéristiques du triangle, telles que les positions ou les angles manquants, peuvent être calculées à l'aide des lois de la trigonométrie.

3.4.2 Trilatération

La trilatération est une méthode de localisation qui permet de déterminer les coordonnées d'un objet ou d'une personne grâce à la mesure des distances qui les séparent des points de référence, appelés ancres.
Dans les systèmes de navigation des applications utilisant la technologie Ultra Wideband (UWB), la trilatération est la méthode la plus fréquemment utilisée par rapport à la triangulation. En effet, contrairement à la triangulation, qui s'appuie sur les angles pour déterminer la position du balise, l'algorithme de trilatération utilise des mesures de distance afin de calculer ses coordonnées. De nombreux chercheurs se sont intéressés aux systèmes de navigation intérieure pour résoudre les problèmes liés aux obstacles présents dans les bâtiments. Dans les environnements complexes, la combinaison de la triangulation et de la trilatération peut être employée pour guider et déterminer les coordonnées de l'utilisateur en temps réel [33, 34]. Avant d'appliquer la méthode de trilatération, il est nécessaire de recourir à des méthodes de mesure, comme celles analysées précédemment, qui permettent de déterminer la position d'un tag en utilisant les signaux radio des balises UWB. La mesure des distances entre le tag et les ancres repose souvent sur des techniques telles que ToA (Time of Arrival), TWR (Two-Way Ranging), etc. Pour calculer les coordonnées d'un tag, l'algorithme de trilatération nécessite au minimum trois ancres. Chaque distance entre une ancre et le tag est considérée comme le rayon d'un cercle dans un plan 2D ou d'une sphère dans un espace 3D. L'intersection de ces cercles ou sphères détermine la position du tag.

Dans les applications de navigation intérieure, bien que la trilatération soit efficace pour les systèmes de positionnement, elle rencontre parfois des limitations similaires à celles des autres systèmes. Les obstacles peuvent introduire des erreurs lors du calcul des coordonnées du tag : plus les distances mesurées entre le tag et les ancres sont incorrectes, plus les coordonnées obtenues sont inexactes. Un autre problème peut survenir lorsque le système

comporte un grand nombre d'ancres, ce qui peut entraîner des déviations du signal. Pour améliorer la précision, des techniques de réduction des interférences et des filtres, comme le filtre de Kalman, sont parfois appliqués. Des recherches montrent, par exemple, que l'utilisation de la méthode dite "true-range multilatérations" permet de minimiser les erreurs causées par les déviations de signal dues aux obstacles [35, 45, 46].

Dans les systèmes de navigation intérieure utilisant les balises UWB, il est important de noter que la robustesse du système dépend également de l'emplacement des balises. Si les balises sont placées trop loin, là où le signal est faible pour atteindre le tag, il y a une forte probabilité d'obtenir des coordonnées incorrectes. Pour garantir la fiabilité du système, il est essentiel de positionner les balises dans des endroits où le signal peut parvenir clairement au tag. Cela permet de calculer avec précision les coordonnées du tag, de tracer les cercles correspondants et de déterminer sa position exacte [45, 46].

Calcul de la Trilatération

Il existe plusieurs approches pour mesurer les distances dans un système de trilatération. Par exemple, la méthode ToA (Time of Arrival) calcule le temps que met un signal à atteindre l'objet cible, puis multiplie cette durée par la vitesse de propagation pour obtenir la distance. Dans les applications UWB (Ultra Wideband), les calculs s'appuient également sur des protocoles spécifiques, comme le Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging (SDS-TWR), qui permet de mesurer les distances avec une précision élevée, même dans des environnements complexes contenant des obstacles [47, 48].

Supposons qu'il existe trois ancres : ancre1, ancre2 et ancre3, associées à un tag. Les distances d1, d2, d3 représentent respectivement les distances entre le tag et chaque ancre. Après avoir déterminé ces distances, il est possible de tracer des cercles centrés sur chaque ancre (ancre1, ancre2 et ancre3), avec des rayons correspondant aux distances d1, d2 et d3. Le point d'intersection des trois cercles indique la position du tag, soit le point recherché.

La figure ci-dessous illustre le principe de localisation du tag en fonction des distances par rapport aux trois ancres.

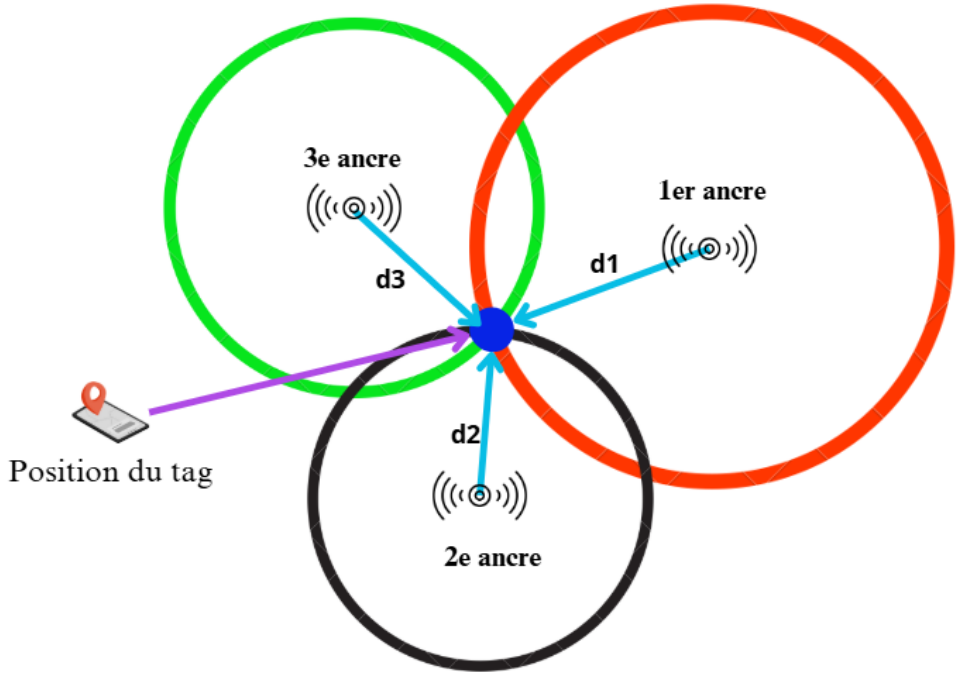


Figure 6 : Fonctionnement de la trilatération

© Hafashimana Eric

Le calcul de la position est fait grâce à l'équation d'un cercle représente dans un plan cartésien

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2 \qquad (9)$$

En connaissant les distances entre le tag et les ancres ainsi que les coordonnées (x_i, y_i) des ancres dans un plan donné, il est possible d'appliquer des formules géométriques de trilatération pour déterminer la position du tag. Avec trois ancres, la position du tag est calculée à l'aide de ces formules :

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

d'où :

- (x, y) : sont les coordonnées du tag

- (x_i, y_i) : sont les coordonnées des ancres de référence
- d_i : est la distance entre le tag et les ancres.
- $i = 1, 2, 3$: représentent respectivement le nombre d'ancres

3.4.3 Les Contraintes de la Trilatération dans le Positionnement Intérieur

Cette sous-section approfondira l'étude des problèmes potentiels que le système pourrait rencontrer lors du calcul du positionnement de l'utilisateur.

D'après les analyses que nous avons menées sur la trilatération et la triangulation, et conformément à nos recherches, notre système s'appuiera principalement sur la trilatération, complétée par d'autres méthodes, afin de permettre aux utilisateurs de naviguer de manière efficace. L'algorithme de trilatération est largement utilisé dans diverses applications intégrant des systèmes de navigation ou de localisation, que ce soit en intérieur ou en extérieur, comme le célèbre système GPS, connu mondialement. Dans les analyses précédentes, nous avons identifié certains problèmes susceptibles de survenir pendant le développement de notre système de navigation. Bien que la trilatération soit très utile, les méthodes complémentaires qui permettent de calculer les distances entre l'utilisateur et les ancres peuvent introduire des erreurs, rendant la localisation moins précise. Dans cette section, nous examinerons les principales contraintes associées à ces méthodes et proposerons des solutions pour garantir des coordonnées précises de l'utilisateur (ou tag), même en présence de ces contraintes.

Parmi les contraintes, on peut citer :

- Les Obstacles physiques

À l'intérieur des bâtiments universitaires utilisant la technologie UWB, des obstacles tels que les murs, les meubles, les ordinateurs, les personnes, et autres éléments peuvent bloquer ou réfléchir les signaux radio pendant leur propagation. Cela peut fausser les mesures et entraîner des erreurs dans l'évaluation des distances. Par exemple, lorsqu'un signal rencontre un mur, il peut être affaibli ou réfléchi, ce qui produit une mesure incorrecte de la distance entre le tag et l'ancre. Cette situation, appelée "Non-Line-of-Sight" (NLOS), introduit des

erreurs dans la localisation de l'objet [22, 37, 47]. Pour minimiser ce problème, il est essentiel de choisir judicieusement l'emplacement des balises et de recourir à des méthodes de filtrage avancées (comme les filtres de Kalman) pour réduire les erreurs de mesure.

- Les Interférences électroniques

Dans un bâtiment universitaire, il est inévitable de rencontrer des appareils électroniques, tels que des téléphones, des routeurs Wi-Fi, des ordinateurs, etc., qui émettent des ondes susceptibles d'interférer avec les signaux des balises UWB. Ces interférences produisent du "bruit", rendant les signaux moins clairs et plus faibles. Dans des environnements contenant des interférences, la force du signal de propagation diminue et les mesures de distance deviennent moins précises, entraînant des erreurs dans le positionnement [47]. Il est crucial d'identifier les sources majeures d'interférences et, si possible, de réduire leur impact en optimisant la configuration des balises et en utilisant des techniques de suppression de bruit.

- La Position des Points de Référence

Dans un système de navigation basé sur des balises UWB, l'emplacement des ancres (points de référence) joue un rôle crucial. Pour garantir une précision optimale et obtenir des coordonnées fiables du tag grâce à la trilatération, les ancres doivent être positionnées stratégiquement autour de la zone ciblée. Un mauvais emplacement des ancres à l'intérieur d'un bâtiment peut entraîner des erreurs significatives dans le positionnement. Avant l'installation d'un système de navigation, une analyse approfondie de l'environnement est indispensable pour garantir une disposition optimale des ancres. Une bonne implantation des points de référence favorise une propagation efficace des signaux radio vers le tag, ce qui améliore la précision du système [22, 46].

3.4.4 Le filtre de Kalman

Dans nos recherches, après avoir analysé les contraintes potentielles liées à la propagation des signaux à l'intérieur des bâtiments, il apparaît que l'utilisation de certains filtres, tels que le filtre de Kalman, est essentielle pour obtenir des mesures précises.

Le filtrage de Kalman est une méthode efficace permettant de réduire les effets du bruit et des réflexions dans les signaux, ce qui stabilise et améliore la précision de la localisation

entre le tag et les ancres [22, 49]. Outre l'utilisation de ce filtre, il est également important de souligner que la précision des mesures augmente lorsque :

- Les ancres ne sont pas trop éloignées les unes des autres.
- Le système de navigation comprend un nombre suffisant d'ancres bien réparties [46, 50].

Avec la technologie UWB, le filtre de Kalman est couramment utilisé pour optimiser les données issues des capteurs de localisation Ultra Wideband. Ce filtre fonctionne en deux étapes principales : la prédiction et la mise à jour (ou correction).

a. Étape de prédiction :

- Cette étape utilise le modèle dynamique du système pour prédire l'état futur basé sur l'état précédent.
- La prédiction inclut également une estimation de l'incertitude (ou la "variance") de cette prédiction.

b. Étape de mise à jour (ou correction) :

- Une nouvelle mesure est intégrée dans le processus.
- Le filtre compare cette mesure à la prédiction effectuée lors de l'étape précédente.
- En tenant compte des incertitudes liées à la mesure et à la prédiction, le filtre ajuste ses estimations pour fournir une localisation plus précise.

L'algorithme de Kalman est donné par les équations suivantes selon ses étapes [31].

a. Équations de prédiction :

Prédiction de l'état :

$$\hat{x}_{k|k-1} = A_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k \quad (11)$$

Prédiction de la covariance :

$$P_{k-1} = A_k P_{k-1|k-1} A_k^T + Q_k \quad (12)$$

d'où :

- $\hat{x}_{k|k-1}$: est l'estimation de prédiction basée sur l'état actuel k à l'état précédent $k-1$
- A_k : matrice de transition qui relie l'état précédent $k-1$ à l'état actuel k
- B_k : est la matrice qui relie l'entrée u_k à l'état x_k
- $P_{k-1|k-1}$: est la matrice de covariance qui est estimée à l'état précédent $k-1$

- Q_k : est la matrice de covariance qui montre le processus du bruit

b. Équations de mise à jour :

Gain de Kalman

$$K_k = P_{k|k-1} - H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T - R_k)^{-1} \quad (13)$$

Etat de mise à jour

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (14)$$

Mise à jour de la covariance

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (15)$$

d'où :

- K_k : est le gain de Kalman
- $\hat{x}_{k|k}$: état de mise à jour
- $P_{k|k}$: mise à jour de la covariance
- z_k : est la mesure observée a l'instant k
- H_k : est la matrice qui relie l'état x_k à l'instant z_k
- R_k : est la matrice de la covariance du bruit
- I : est la matrice unitaire

Après l'analyse de tous les éléments nécessaires à la conception d'un système de navigation intérieure, dans la partie suivante, nous allons utiliser les méthodes, technologies et services analysés pour concevoir ce système de navigation intérieure économique, basé sur la technologie UWB, et capable d'aider les utilisateurs à naviguer à l'intérieur de notre établissement.

CHAPITRE 4
IMPLEMENTATION DU SYSTEME PROPOSE

Dans les chapitres précédents, nous avons abordé les différentes technologies utilisées pour la navigation intérieure dans des environnements complexes. Nous avons analysé leurs caractéristiques, leurs avantages, ainsi que leurs limitations. Pour chacune de ces technologies, des expériences ont été réalisées afin d'évaluer leurs performances et de déterminer laquelle offre les meilleurs résultats, avant de tirer des conclusions.
Dans ce chapitre, nous présenterons les outils et les matériels utilisés pour la mise en œuvre de notre système.

4.1 Schéma du système avec les différents composants

Le schéma de notre système est subdivisé en deux parties :

- Partie matérielle

La partie matérielle de notre système repose sur des modules ESP32 UWB DW1000. Elle est constituée d'un tag et de plusieurs ancres qui communiquent entre eux à l'aide de la technologie UWB.

- Partie logicielle

La partie logicielle repose sur une application Android installée sur un smartphone. Cette application communique avec le tag via le protocole MQTT pour transmettre les données. Cette communication, basée sur le protocole TCP/IP, nécessite une connexion Wi-Fi afin d'établir et de faciliter l'échange des informations.
Le schéma suivant illustre les différentes parties du système : la partie matérielle et la partie logicielle

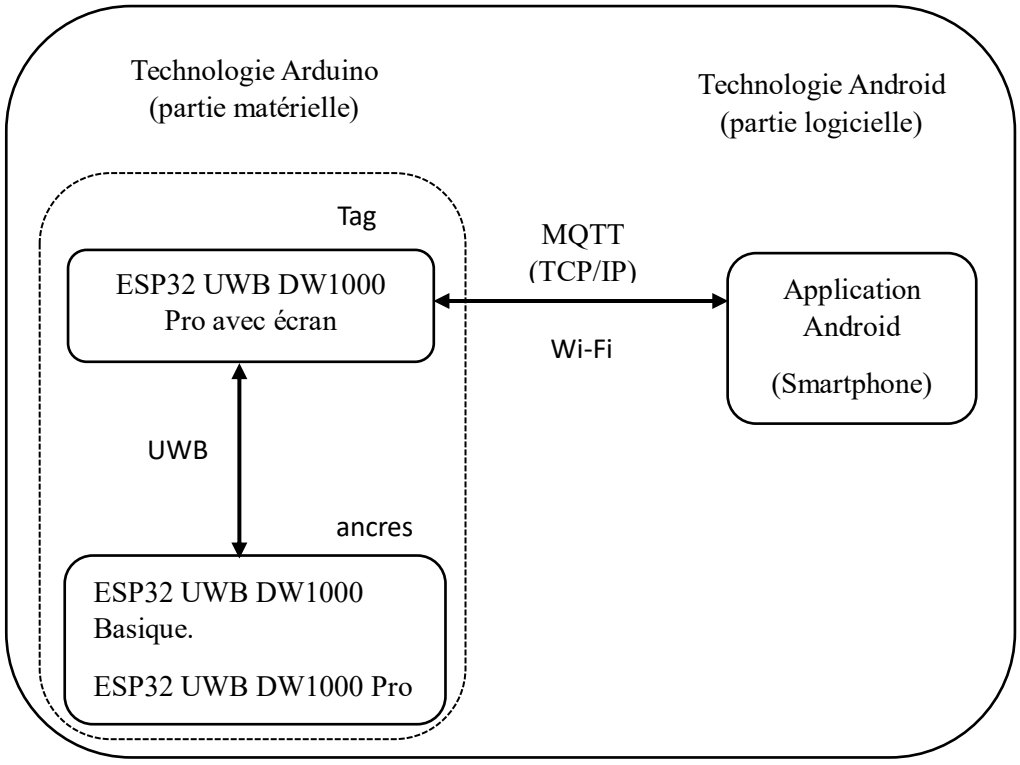


Figure 7 : Partie matérielle et logicielle du système

© Hafashimana Eric

4.2 Logiciels et les matériels utilisés

Pour la réalisation de notre projet, nous avons utilisé différents outils et matériels en fonction de nos besoins. Parmi ces outils, nous avons employé des APIs et des matériels électroniques tels que les téléphones Android ainsi que les modules ESP32 UWB.

Une API (Application Programming Interface ou « interface de programmation d'application ») est un ensemble d'outils qui permet aux programmes et aux applications d'interagir entre eux et d'exploiter les fonctionnalités des uns dans les autres.

Les APIs jouent un rôle essentiel dans le processus de développement d'une application, car elles offrent plusieurs avantages :

- Gagner du temps pendant le développement : Les développeurs peuvent utiliser des APIs existantes pour simplifier et accélérer la création de nouveaux produits en ajoutant des fonctionnalités courantes.

- Assurer la sécurité des applications : Les développeurs peuvent isoler certaines fonctions dans une application distincte, réduisant ainsi leur exposition aux risques.
- Faciliter l'intégration : Elles permettent une interaction fluide entre les applications sans nécessiter la collaboration directe des développeurs de ces applications.
- Réduire les coûts : L'utilisation des APIs évite de développer chaque fonction depuis zéro, ce qui diminue les coûts associés au développement.

➢ **Android Studio**

Android Studio est un environnement de développement intégré (IDE), développé par Google pour la création d'applications Android. Il est spécialement conçu pour les applications Android et permet aux développeurs de coder, tester et héberger les applications qu'ils conçoivent. Les principaux langages utilisés pour les applications Android sont Kotlin et Java. Parmi ces langages, Kotlin est préféré à Java car il permet d'avoir un code plus sécuritaire et parce que Kotlin est un langage moderne qui supporte plusieurs paradigmes. Toutefois, il est à noter que Java reste largement utilisé en raison de sa popularité et de son efficacité. Android Studio permet également d'éditer d'autres fichiers, comme les fichiers XML (Extensible Markup Language). Son éditeur visuel permet aux développeurs de créer des applications rapidement en glissant et déposant des éléments d'interface tels que les boutons, les champs de texte, etc., sans avoir à manipuler directement le code XML.

Contrairement à d'autres IDE pour Android, Android Studio est spécialement optimisé pour ce système d'exploitation. Il est régulièrement mis à jour par Google pour intégrer les nouvelles technologies. Comme mentionné ci-dessus, le choix d'Android Studio comme IDE pour notre projet était essentiel, car il offre des bibliothèques nécessaires et à jour pour le développement d'applications Android.
Lors de nos tests, nous avons utilisé des téléphones équipés du système d'exploitation Android, notamment le Google Pixel 7 Pro et le Samsung Galaxy A70. Notre choix d'utiliser le système Android se base sur sa popularité et son adoption mondiale, qui surpassent celles d'autres systèmes d'exploitation.
L'image suivante montre l'interface de l'IDE Android Studio.

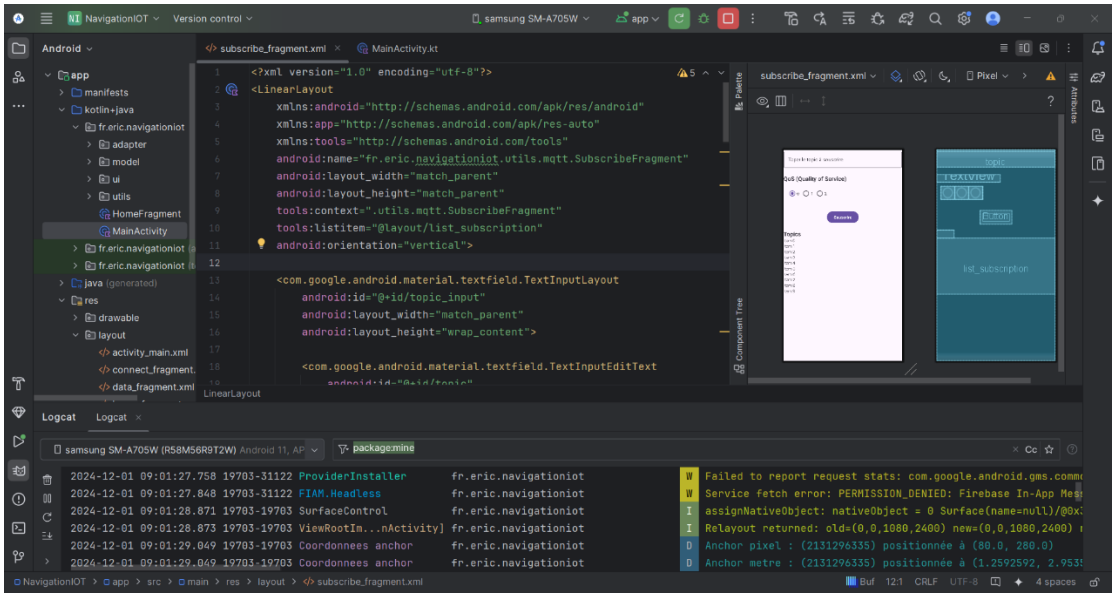


Figure 8 : Interface de l'Android studio

© Hafashimana Eric

- **Arduino**

Arduino est une plateforme de développement open-source permettant de créer des projets électroniques interactifs grâce à des cartes électroniques programmables appelées microcontrôleurs.

Un microcontrôleur est un composant électronique actif qui effectue le traitement numérique des informations de manière embarquée. Il est constitué d'un processeur, d'une mémoire et d'entrées/sorties permettant de communiquer avec d'autres appareils.

Ces microcontrôleurs peuvent être connectés à divers capteurs pour former un système autonome ou contrôlé. Arduino utilise un langage de programmation simplifié, basé sur le C++, adapté pour rendre le code plus accessible et facile à écrire. Pour les projets IoT, Arduino facilite la compréhension des circuits électroniques et la programmation des microcontrôleurs, tant pour les débutants que pour les professionnels.

Dans notre projet de navigation, comme nous avions besoin d'utiliser des modules programmables, Arduino nous a semblé idéal grâce à son interface simple. Arduino offre des

bibliothèques de ressources nécessaires ainsi que des tutoriels, ce qui facilite le démarrage de n'importe quel projet. L'IDE prend également en charge une variété de composants adaptés à différents types de projets, tels que l'IoT, la robotique, la domotique, etc.
La figure suivante montre l'interface de l'IDE Arduino.

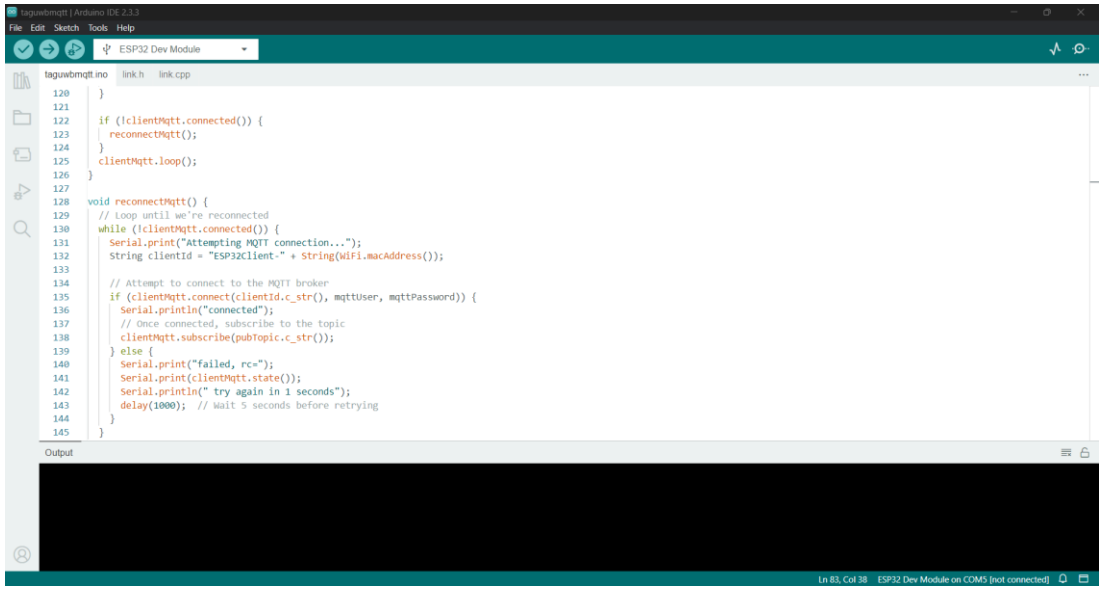


Figure 9 : Interface d'Arduino IDE

© Hafashimana Eric

- **Courtier MQTT**

MQTT (**Message Queuing Telemetry Transport**) est un protocole de messagerie léger conçu pour permettre la communication entre les clients MQTT.
Pour garantir la transmission des messages entre les systèmes Machine-to-Machine (M2M) et l'IoT, MQTT utilise principalement le protocole TCP/IP, avec divers ports :

- **Le port 1883** : utilisé pour envoyer des données sans chiffrement.
- **Le port 8883** : souvent utilisé pour des connexions sécurisées grâce au chiffrement TLS.
- **Les ports 80 et 443** : généralement utilisés dans les WebSockets.

L'architecture MQTT est composée par des composants qui fonctionnent comme des clients MQTT ou des brokers MQTT.

- **Client MQTT** : un agent (dispositif ou application) qui se connecte à un Broker MQTT afin de publier ou de recevoir des messages publiés par d'autres clients.
- **Broker MQTT** : un agent (serveur) qui reçoit des messages publiés par les clients MQTT et les transmet aux clients connectés.

Dans la méthode de transmission des messages, le broker gère également les connexions et implémente différents niveaux de qualité de service (QoS) pour garantir la fiabilité des messages, même en cas de problèmes de connexion.

Pour assurer la fiabilité des communications, il existe trois niveaux de QoS :

- **QoS 0** : À ce niveau, le broker ne vérifie pas si le message est envoyé ou non. C'est le niveau le plus rapide, mais il offre une fiabilité limitée (livraison "au moins une fois").
- **QoS 1** : À ce niveau, le broker garantit l'envoi des messages au moins une fois, sans se soucier des doublons (livraison "au moins une fois avec accusé de réception").
- **QoS 2** : À ce niveau, le broker s'assure que chaque message est livré exactement une fois, sans duplications

L'envoi des messages fonctionne selon le modèle **publish/subscribe**. Le client se connecte au broker et publie des messages sur un certain sujet (topic). Les autres clients connectés au broker avec le même sujet reçoivent ces messages. Ils peuvent également publier leurs propres données auprès du broker.

Il existe différents types de brokers MQTT, parmi lesquels les plus utilisés sont :

- **Mosquitto** : open-source, léger, et très souvent utilisé pour des déploiements locaux.
- **HiveMQ** : souvent utilisé par les entreprises, avec un support pour le clustering.
- **EMQX** : hautement évolutif et adapté aux applications nécessitant des performances élevées.
- **AWS IoT Core** : géré par Amazon, idéal pour les environnements cloud.

Pour nos tests, le choix de Mosquitto s'est avéré idéal. En tant que broker, il offre des services gratuits et permet de réaliser facilement des tests dans le cadre du modèle publish/subscribe.

- **ESP32 UWB DW1000**

L'ESP32 UWB DW1000 est un module combinant deux technologies puissantes : ESP32 et UWB DW1000

- **ESP32** : C'est un microcontrôleur doté de fonctionnalités de connectivité, telles que le Wi-Fi et le Bluetooth, qui permettent la communication avec d'autres appareils ou entre eux.
- **UWB DW1000** : C'est un module exploitant la technologie UWB, capable de mesurer les distances avec une grande précision. Grâce à cette précision, il est souvent utilisé dans les applications de localisation en intérieur, où le GPS ne fonctionne pas correctement.

Dans les tests effectués pour notre projet, nous avons utilisé des modules ESP32 UWB DW1000 de l'entreprise Makerfabs, tels que ESP32 UWB DW1000, ESP32 UWB DW1000 Pro, et ESP32 UWB DW1000 Pro avec écran.

Le module ESP32 UWB de Makerfabs est basé sur la puce Decawave DW1000. Il fonctionne comme un radar qui scanne en continu. Il peut se connecter précisément à un autre appareil (ancre) et communiquer avec celui-ci pour déterminer la position de chaque appareil. Lorsque le module se trouve à proximité d'un autre dispositif utilisant la technologie UWB, ils entament un processus de télémétrie (ranging). La télémétrie consiste à calculer le temps de vol (ToF) : le temps que mettent les signaux à effectuer un aller-retour entre les deux appareils.

Avantages des modules ESP32 UWB DW1000 pour les applications de positionnement en intérieur :

1. Une bonne précision dans le positionnement : Le DW1000 utilise des signaux UWB pour calculer la distance avec une précision millimétrique, contrairement au GPS, moins précis en intérieur.
2. Une longue portée : Selon leur type, ces modules peuvent mesurer des distances jusqu'à 200 mètres dans des environnements avec peu d'obstacles, ce qui les rend idéaux pour le suivi d'objets, la localisation ou la navigation intérieure, ainsi que pour les systèmes de détection de présence.

3. Une communication bidirectionnelle : Les modules UWB équipés de la puce DW1000 permettent une communication mutuelle, partageant les données pour améliorer la précision des mesures.
4. Intégration avec l'ESP32 : Grâce à la puissance du microcontrôleur ESP32, ces modules intègrent des fonctionnalités telles que le Wi-Fi et le Bluetooth, particulièrement avantageuses pour les applications IoT.

Dans le tableau suivant, on va voir la comparaison des modules ESP32 UWB utilisés dans notre projet.

Tableau 2 : Comparaison des modules ESP32 UWB.

	UWB basique	UWB Pro	UWB & écran
Processeur	ESP32-WROOM/WROVER	ESP32-WROVER	ESP32-WROVER
Noyau UWB	DW1000	DW1000	DW1000
Écran	N	N	Y
Distance de mesure (m)	45	200	200
Prise de batterie	N	N	Y
Chaîne UWB	2/5	2/5	2/5
Test	Test normal	Longue distance nécessaire	Longue distance nécessaire
Prix (USD)	39,80 $/41,80 $	51,84 $	54,80 $

Les images suivantes montrent les différents types des modules qu'on a utilisées pour les tests. Chaque module comporte deux faces, le module portant le numéro est le module ESP32 UWB Basique tandis que le module portant le numéro 5 est le module ESP32 UWB Pro.

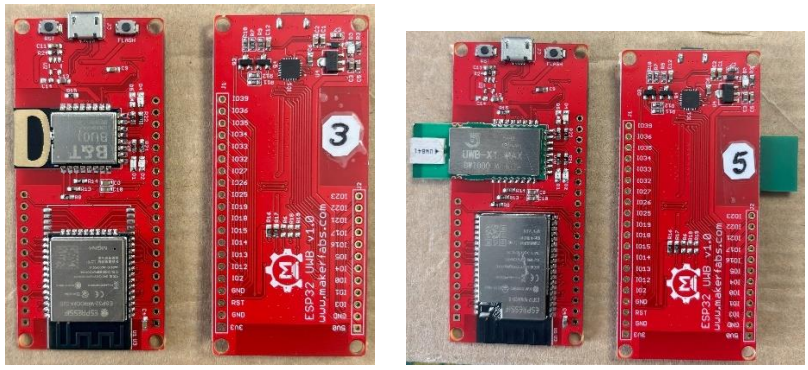


Figure 10 : ESP32 UWB Basique et ESP32 UWB Pro

© Hafashimana Eric

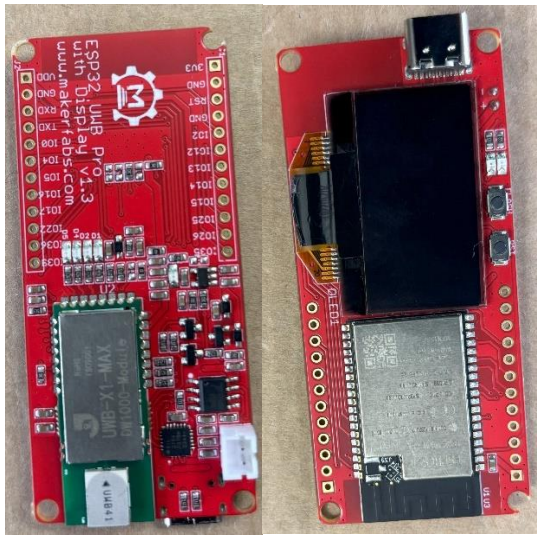


Figure 11 : ESP32 UWB Pro avec écran

© Hafashimana Eric

4.3 Les fonctionnalités et les modules de l'application « Indoor Navigation »

Le fonctionnement de notre système de navigation à l'intérieur d'un bâtiment universitaire est constitué de deux parties de code, à savoir :

- La **première partie** est utilisée dans la programmation des modules ESP32 UWB DW1000, elle consiste à calculer les distances qui séparent le Tag et les autres afin de les transférer dans une application Android via MQTT.

- La **deuxième partie** est utilisée pour la conception de l'application Android « Indoor Navigation » elle s'occupe à la récupération des données envoyées via MQTT et d'afficher la position de l'utilisateur en temps réel.

Pendant le développement de notre système, comme mentionné dans la présentation des outils utilisés, nous avons employé les modules ESP32 UWB pour déterminer la position de l'utilisateur.
Dans notre système, tous les modules ESP32 UWB n'ont pas les mêmes fonctionnalités : un module agit comme Tag, tandis que les autres servent d'ancres.
Programmées dans l'IDE Arduino en langage C++, les ancres ont été fixées à différents endroits du bâtiment universitaire pour élargir l'espace de navigation. Grâce à la technologie UWB, ces ancres communiquent facilement avec le Tag sans utiliser le Wi-Fi. Le Tag est programmé pour calculer et filtrer les distances qui le séparent des ancres. Pour garantir la précision des données, nous avons intégré le filtrage de Kalman dans le système. Le Tag utilise une connexion Wi-Fi et le protocole MQTT pour transférer les données filtrées vers l'application Android, que les utilisateurs peuvent exploiter.

L'application Android « Indoor Navigation » récupère les données transmises par le Tag via MQTT. Ces données permettent de calculer la position de l'utilisateur sur un plan universitaire en temps réel. La localisation est basée sur la méthode de Trilatération. L'application « Indoor Navigation » comprend quatre modules principaux : **Connexion, Abonnement/Désabonnement, Données, et Navigation**.

Module *Connexion*

Le module de connexion est situé dans l'onglet Accueil de l'application. Il permet à l'utilisateur de se connecter au broker MQTT pour que l'application puisse recevoir des données. Pour établir une connexion, l'utilisateur doit fournir les informations suivantes :

- L'adresse IP ou le nom du domaine du broker
- Le port (1883 pour les connexions non sécurisées ou 8883 pour les connexions sécurisées)
- L'ID unique pour MQTT (dans notre application l'ID est généré automatiquement)

- Le nom d'utilisateur MQTT
- Le mot de passe MQTT

Module d'*abonnement*

Le module d'abonnement se trouve dans l'onglet Souscrire de l'application. Il permet à l'utilisateur de s'abonner ou de se désabonner du broker MQTT en utilisant un sujet (topic). Pour fonctionner, ce module nécessite :

- Le sujet (topic) pour s'abonner au broker
- Le choix de qualité de service (QoS) afin de garantir la fiabilité de communication qu'on a déjà vu dans les parties précédentes pendant la description du Broker MQTT.
- L'espace que contiendra la liste des topics (sujets) sur lesquels il s'est connecté.

Le module des *Données*

Le module des données se trouve dans l'onglet Données de notre application. Le module de données permet d'afficher les informations ou les données reçues via MQTT.

Le module de *Navigation*

Le module de navigation se trouve dans l'onglet de Navigation de notre application. Il affiche la position de l'utilisateur en temps réel sur un plan cartographique du bâtiment universitaire.

4.4 Le fonctionnement de notre système de navigation intérieure

Le système de navigation intérieure développée est basé sur les technologies UWB et Wi-Fi. Elle utilise deux modules *ESP32 UWB Basic*, trois modules *ESP32 UWB Pro*, un module *ESP32 UWB Pro* avec écran d'affichage, ainsi qu'un téléphone Android Samsung A70.

Une fois que le Tag est connecté au Wi-Fi, il communique avec les ancres via la technologie UWB. Le Tag commence à télémétrer les ancres et à filtrer les distances obtenues. Si le Tag détecte trois ancres, il envoie les données filtrées vers l'application Android. Si le nombre d'ancres détectées dépasse trois, le Tag envoie uniquement les données des trois ancres les

plus proches. En revanche, si le Tag n'est pas connecté au Wi-Fi, un message d'erreur s'affiche pour signaler une tentative de connexion échouée.

La navigation dans l'application « Indoor Navigation » est fonctionnelle uniquement si l'utilisateur est connecté et souscrit au broker. Dans cette application, la souscription au broker est possible uniquement si l'utilisateur est déjà connecté. Sinon, un message d'erreur informe que l'utilisateur n'est pas connecté.

Le calcul de positionnement de l'utilisateur, basé sur la trilatération, est possible uniquement si les données proviennent de trois ancres. Si les données proviennent de moins de trois ancres, le système renvoie une erreur signalant que les données sont insuffisantes pour effectuer le calcul de trilatération.

4.5 Analyse des coûts

L'analyse des coûts consiste à examiner les dépenses engagées pour développer le prototype de cette application. Le système de navigation à l'intérieur d'un bâtiment universitaire proposé est principalement basé sur des technologies open-source, à l'exception des modules utilisant la technologie ESP32 UWB. Ce qui suit présente en détail les coûts associés au développement du système.

Nous avons utilisé six modules ESP32 UWB : deux modules basiques, trois modules Pro, et un module Pro avec écran. En calculant le coût selon les prix affichés sur le site de Makerfabs, sans inclure les frais de livraison, nous obtenons :

$$PA = (41.80\ \$ * 2) + (51.84\ \$ * 3) + (54.80\ \$ * 1) = 293.92\ \$\ USD\ \approx\ 411\ \$\ (CAD)$$

Hypothèse pour les matériels Wi-Fi

$$PA = 200\$\ (CAD)$$

1. Les dimensions de l'espace couvert par ces matériels sont de 21,6 m de longueur et 5,5 m de largeur.

La superficie couverte par les matériels sur une partie de l'étage.

$$S = 21{,}6m * 7{,}5m = 162m^2$$

- Coût par mètre carré (UWB)

$$\text{Coût} = \frac{411\$\ (CAD)}{162m^2} \approx 2{,}54\$\ (CAD)/m^2$$

- Coût par mètre carré (Wi-Fi)

$$\text{Coût} = \frac{200\$\ (CAD)}{162m^2} \approx 1{,}23\$\ (CAD)/m^2$$

2. Si les mêmes matériels auraient pu potentiellement couvrir une partie de l'étage en dessous, la superficie vaut :

$$S = 162m^2 * 2 = 324m^2$$

- Coût par mètre carré (UWB)

$$\text{Coût} = \frac{411\$\ (CAD)}{324m^2} \approx 1{,}27\$\ (CAD)/m^2$$

- Coût par mètre carré (Wi-Fi)

$$\text{Coût} = \frac{200\$\ (CAD)}{324m^2} \approx 0{,}62\$\ (CAD)/m^2$$

Tableau 3 : Comparaison des coûts au mètre carré entre les technologies UWB et Wi-Fi.

Technologie	Coût total (1 étage)	Coût par m^2 (1 étage)	Coût par m^2 (2 étages)
UWB	$411\ \$\ (CAD)$	$2{,}54\$\ (CAD)/m^2$	$1{,}27\$\ (CAD)/m^2$
Wi-Fi	$200\$\ (CAD)$	$1{,}23\$\ (CAD)/m^2$	$0{,}62\$\ (CAD)/m^2$

4.6 Tests et Optimisation

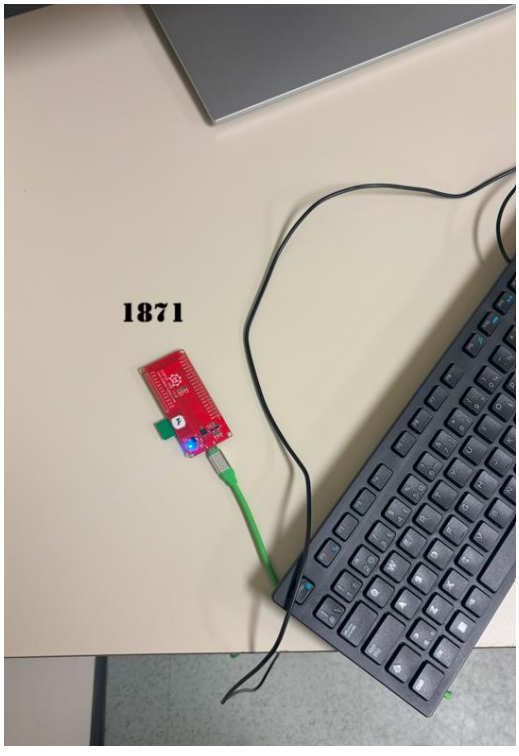
Le test de notre application a été réalisé au 4e niveau, aux alentours de du département d'informatique et de mathématique de l'université du Québec à Chicoutimi. La première étape avant de procéder aux tests consiste à installer les modules ESP32 UWB dans différents endroits de l'espace ou le système est déployé.

L'étape suivante consiste à démarrer le broker MQTT, que nous avons installé sur un ordinateur et qui sert de serveur pour faciliter le transfert des données vers l'application Android. Dans le système proposé, les ancres fonctionnent comme des antennes relais lors de la connexion avec le Tag. Si les ancres sont détectables par le Tag dans une zone donnée, elles se connectent automatiquement à celui-ci. Pendant la navigation, si le Tag entre dans une autre zone où certaines ancres précédemment détectées ne sont plus accessibles, mais que d'autres ancres sont détectées, les nouvelles ancres se connectent automatiquement au Tag, tandis que les anciennes se déconnectent. Cela reste en vigueur jusqu'à ce que

l'utilisateur revienne dans la zone initiale. Le calcul des distances entre le Tag et les ancres s'effectue automatiquement et en temps réel à partir de la connexion.
Lors de quelques essais réalisés, nous avons constaté que les modules ne pouvaient pas communiquer directement avec les téléphones utilisés (Samsung Galaxy A70 et Google Pixel 7 Pro). Ainsi, pour faciliter la localisation, l'utilisateur devait porter un dispositif spécifique. Les résultats illustrant le fonctionnement de ce système de navigation sont présentés sous forme de captures d'écran. Nous analyserons ensuite ces résultats pour mieux comprendre le fonctionnement du système.

Les images suivantes montrent les différents emplacements où les modules ESP32 UWB ont été installés en tant qu'ancres. Chaque ancre possède une identité unique :

- L'ancre 1781 est située dans la salle P4-6600.
- L'ancre 1782 est placée devant la salle P4-6570.
- L'ancre 1784 est positionnée à côté de la salle P4-6140.
- L'ancre 1783 est placée devant la salle P4-6010.
- L'ancre 1785 est située à côté du secrétariat de notre département DIM, P4-5180.



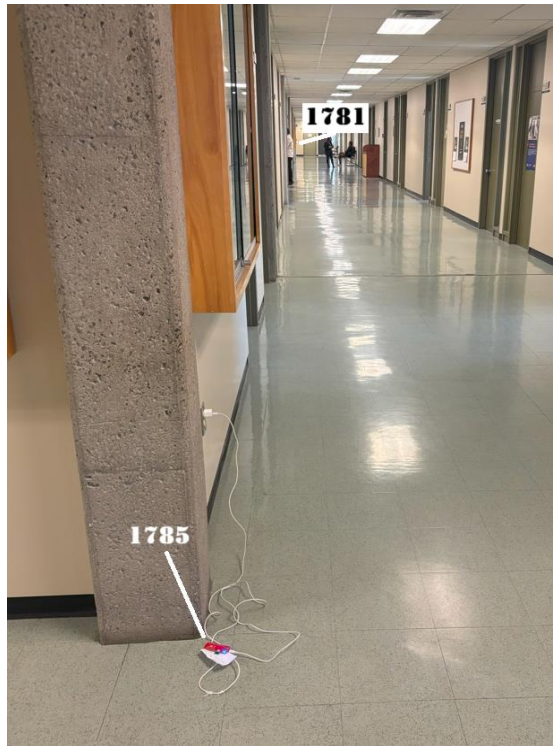


Figure 12 : Emplacement des ancres 1781 et 1785
© Hafashimana Eric

Figure 13 : Emplacement des ancres 1782 et 1783

© Hafashimana Eric

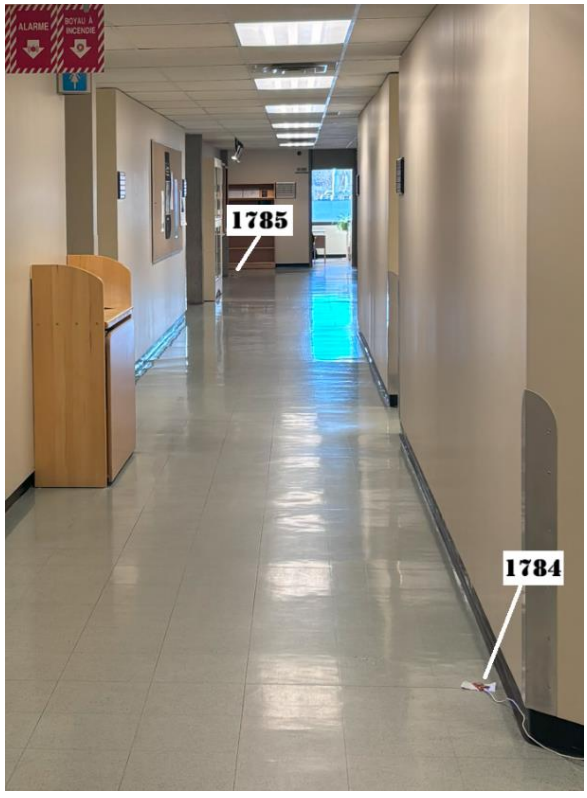


Figure 14 : Emplacement des ancres 1784 et 1785

© Hafashimana Eric

L'image suivante montre la position de nos ancres (représentées par des points rouges) telle qu'elle est affichée dans l'interface de notre application. Ces ancres couvrent différents endroits du 4e niveau du bâtiment universitaire de l'UQAC. Le point bleu, quant à lui, représente le Tag, dont la position est initialement définie avant la réception des données en temps réel.

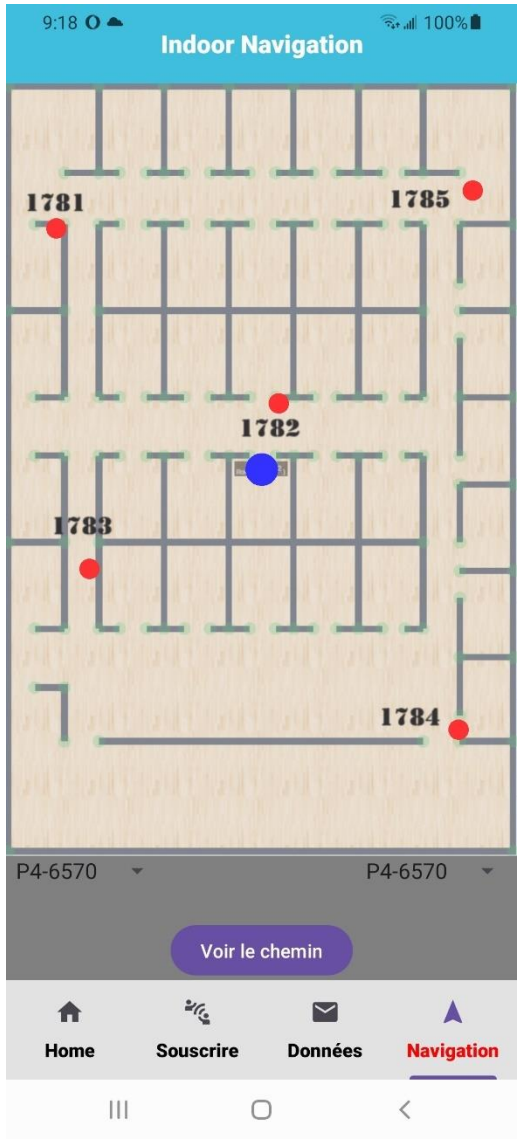


Figure 15 : On retrouve ici un plan 2D de l'espace ou le système a été déployé. Les emplacements des ancres sont marqués par un point rouge.

© Hafashimana Eric

4.6.1 Résultat de l'application « Indoor Navigation »

- Page d'Accueil « Home »

Après l'installation de l'application « Indoor Navigation », dès que l'utilisateur lance l'application, il se retrouve sur la page d'accueil contenant le module de Connexion, l'utilisateur devra compléter le formulaire de connexion avant de se souscrire au broker

MQTT. Si toutes les informations ne sont pas remplies, l'utilisateur recevra un message d'erreur indiquant qu'il puisse remplir tous les champs.

Les images suivantes montrent l'interface du module de connexion ainsi que le message d'erreur affiché si l'utilisateur tente de se connecter sans fournir toutes les informations nécessaires. Par exemple, la deuxième image illustre une situation où le champ du mot de passe n'est pas rempli.

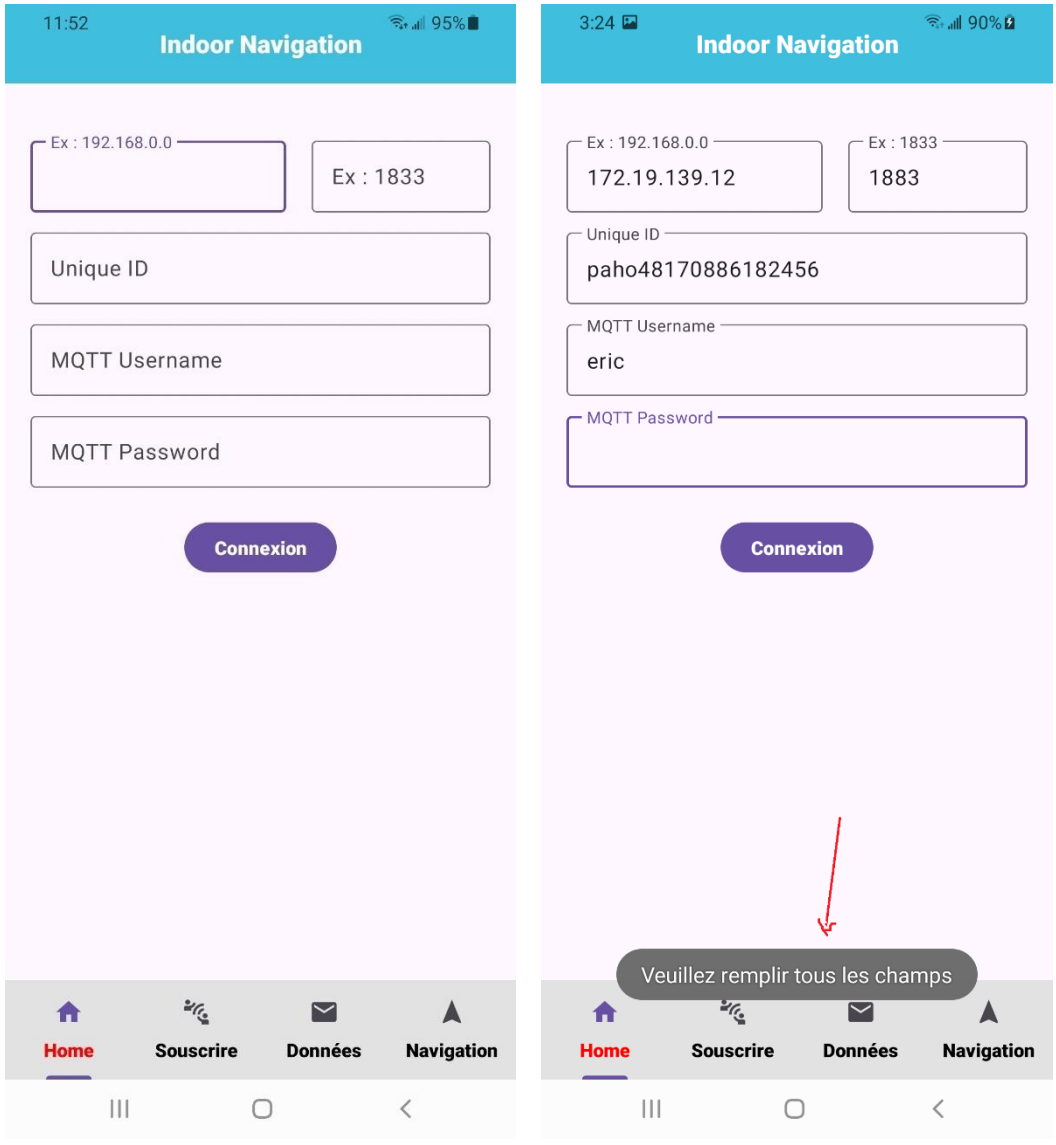


Figure 16 : Module de connexion

© Hafashimana Eric

- Page d'abonnement « Souscrire »

Une fois que l'utilisateur est connecté, il est redirigé vers la page de souscription à MQTT, où il peut s'abonner pour permettre à l'application de recevoir les données. L'utilisateur ne peut pas se souscrire au broker tant qu'il n'est pas connecté. Si l'utilisateur tente de s'abonner avant d'avoir établi une connexion, un message d'erreur lui indique qu'il n'est pas connecté au broker MQTT.

Lors de la souscription, l'utilisateur peut sélectionner le niveau de QoS en fonction de la manière dont il souhaite envoyer les messages. Par défaut, le QoS est réglé sur 0. Pendant la période des tests, nous avons utilisé ce paramètre par défaut.

Les images suivantes montrent l'interface du module de souscription ainsi que le message d'erreur qui apparaît lorsqu'une tentative d'abonnement est effectuée sans connexion préalable.

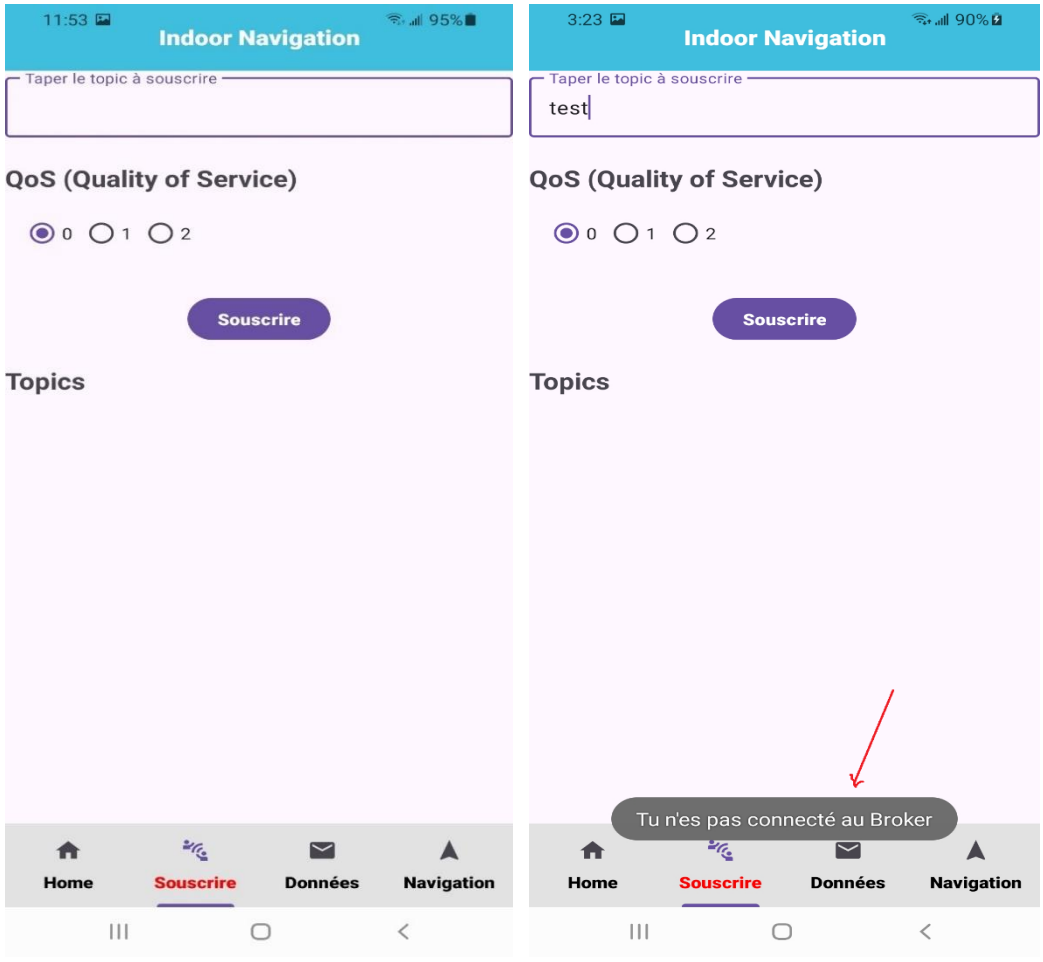


Figure 17 : Module abonnement

© Hafashimana Eric

- Page de données « Données »

La page des données correspond au module des données de notre application. Elle permet à l'utilisateur de visualiser les données envoyées par le Tag. La réception des données est possible uniquement si l'utilisateur est connecté et souscrit (abonné) au broker. Dans le système déployé, le broker est installé sur un ordinateur qui fonctionne comme serveur. Lorsqu'on ouvre l'interface en ligne de commande (CLI) de l'ordinateur pour se connecter au broker, et si le Tag commence à envoyer des données, celles-ci apparaissent sur la console.

L'image suivante montrent la réception des données envoyées par le Tag sur la console CLI. Ces données représentent les distances séparant le Tag des ancres 1781, 1782, et 1783

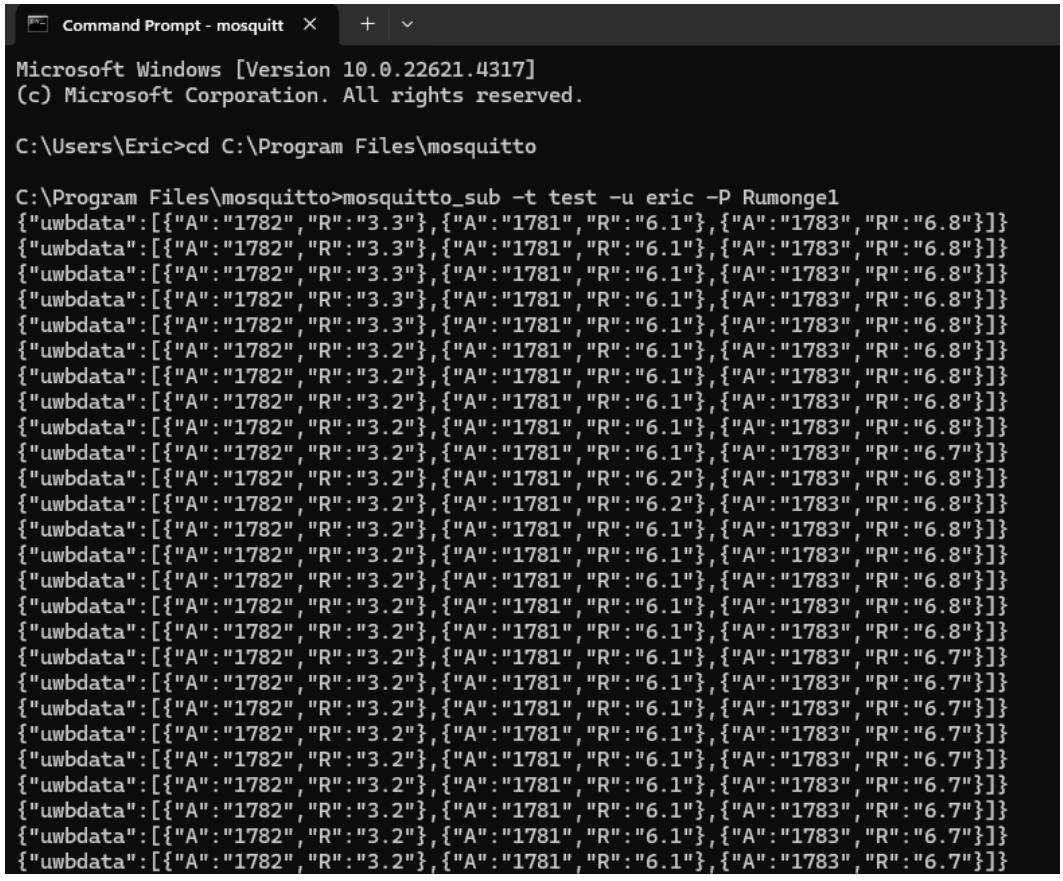


Figure 18 : Distances entre le Tag et les ancres 1781, 1782 et 1783

© Hafashimana Eric

Les deux premières lignes consistent les étapes de connexion du broker qui est installé sur notre ordinateur.

Dans notre cas la commande :

- cd nous donne l'accès du répertoire où est installé le broker
- mosquitto_sub, c'est une commande de souscription MQTT qui permet de se connecter au broker afin d'écouter les messages publiés.
- -t indique le topic (sujet) auquel on veut s'abonner.
- -u indique le nom de l'utilisateur du broker pour s'authentifier au broker
- -P indique le mot de passe du broker pour s'authentifier au broker

L'image suivante montre les distances séparant le Tag et les ancres 1785, 1782, 1784 pendant la navigation.


```
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"9.7"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"9.0"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"8.7"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"8.5"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"8.4"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.8"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.3"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.4"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.6"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.4"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.7"},{"A":"1782","R":"6.7"},{"A":"1784","R":"8.4"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.7"},{"A":"1782","R":"6.6"},{"A":"1784","R":"8.4"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.7"},{"A":"1782","R":"6.6"},{"A":"1784","R":"8.4"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.8"},{"A":"1782","R":"6.6"},{"A":"1784","R":"8.4"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.8"},{"A":"1782","R":"6.6"},{"A":"1784","R":"8.4"}]}
{"uwbdata":[{"A":"1785","R":"5.8"},{"A":"1782","R":"6.6"},{"A":"1784","R":"8.4"}]}
```


Figure 19 : Distances du Tag et les ancres 1782, 1784 et 1785

© Hafashimana Eric

Lorsqu'on analyse cette image, on observe que :

- Les distances par rapport à l'ancre 1785 augmentent, ce qui signifie que l'utilisateur s'éloigne de l'ancre 1785.
- Les distances par rapport à l'ancre 1782 diminuent, ce qui indique que l'utilisateur se dirige vers l'ancre 1782, c'est-à-dire qu'il se rapproche de celle-ci.
- Les distances par rapport à l'ancre 1784 diminuent, mais à un certain moment, elles commencent à augmenter. Cela signifie que, pendant la navigation, l'utilisateur s'est d'abord rapproché de l'ancre 1784, puis, à un moment donné, il s'est arrêté et a fait demi-tour, s'éloignant ainsi de l'ancre 1784.

En général, on peut dire que si la distance séparant le Tag et l'ancre diminue, l'utilisateur se rapproche de l'ancre, au contraire dès que la distance augmente, l'utilisateur s'éloigne du tag.

Nous revenons maintenant à notre application « Indoor Navigation » pour examiner l'interface des données. Les données affichées pour l'utilisateur comprennent le topic (sujet) et les informations transmises via MQTT.

L'image suivante illustre l'interface de la page des données.

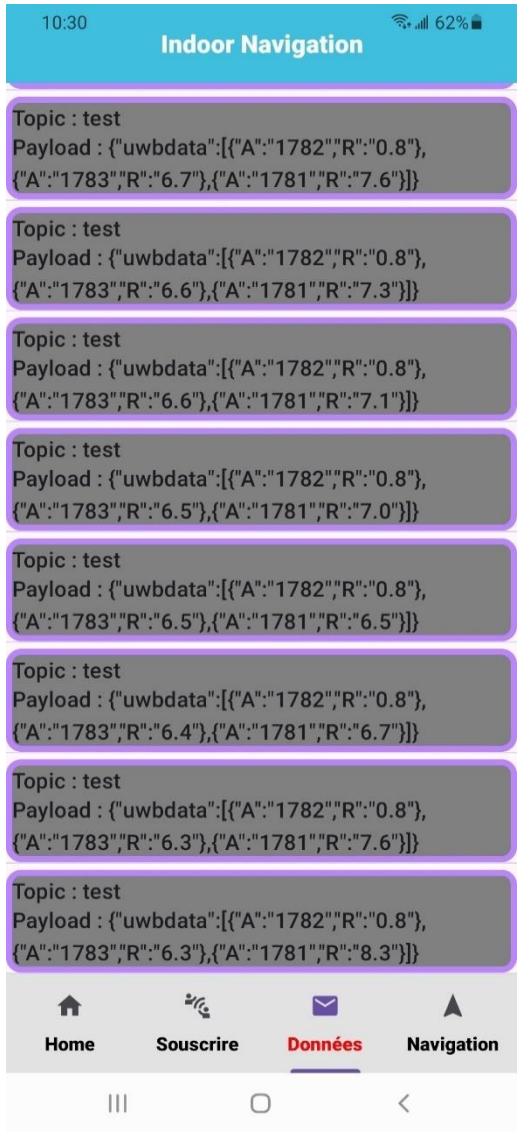


Figure 20 : Page des données

© Hafashimana Eric

- Page de « Navigation »

La page de navigation correspond au module de Navigation. Avec l'application Android, l'utilisateur peut voir sa localisation en temps réel et observer ses déplacements d'une salle à une autre. L'application dispose également d'une fonctionnalité permettant à l'utilisateur de définir un point de départ et un point d'arrivée pour la navigation. Une fois que l'utilisateur a sélectionné ces deux points, il peut appuyer sur le bouton « Voir le chemin » pour afficher son itinéraire de navigation. Le point de départ est représenté par les numéros des salles ou des laboratoires.

Pendant nos tests, les captures d'écran suivantes montrent que, lors de leur prise, nous étions positionnés devant la porte du laboratoire P4-6570. Nous avons choisi le secrétariat de DIM (P4-5180) comme point d'arrivée pour visualiser notre cheminement.

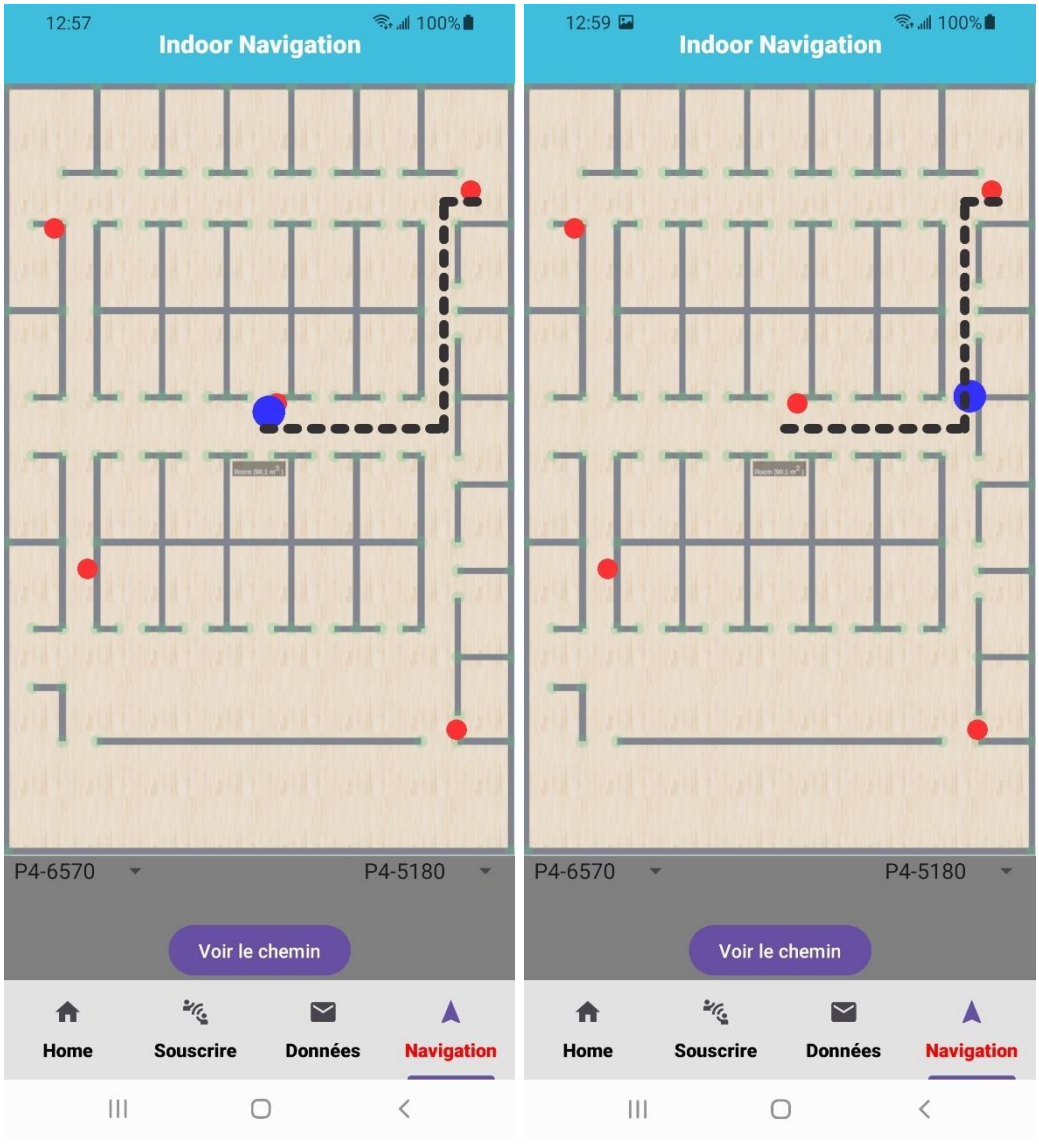


Figure 21 : Page de Navigation

© Hafashimana Eric

Pendant nos tests, lors de la vérification des erreurs de précision, nous avons constaté que l'erreur pouvait varier entre 0 cm et 20 cm. Les images suivantes illustrent l'affichage des données du Tag ainsi que sa localisation sur l'interface de notre application.

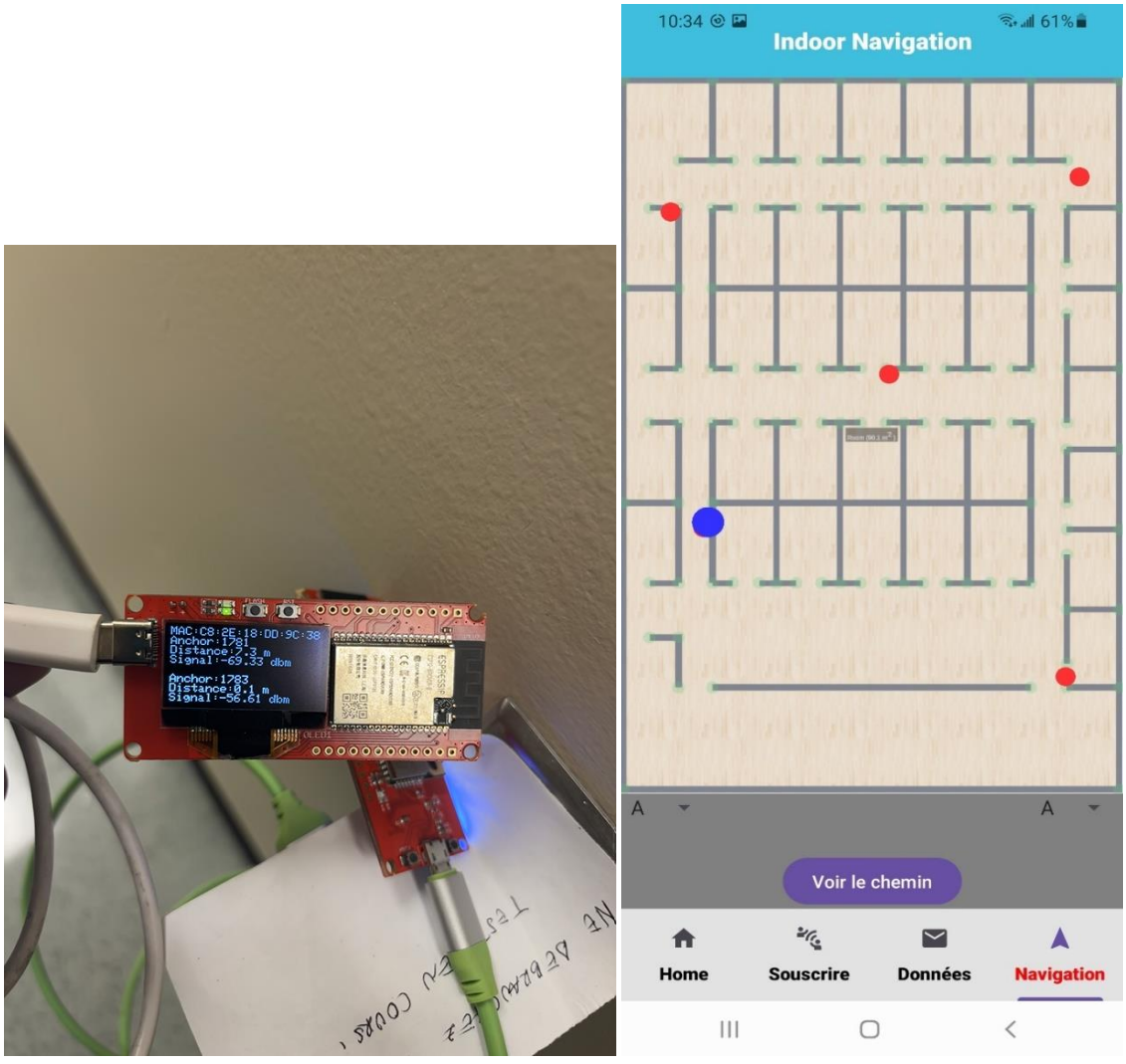


Figure 22 : Précision des mesures

© Hafashimana Eric

Lorsqu'on analyse ces images, on constate que, pour la première image, le tag est positionné au-dessus de l'ancre 1783 avec une précision de 0,1 m. En observant la deuxième image, on remarque que notre application indique précisément que l'utilisateur est très proche de l'emplacement de l'ancre 1783.

4.6.2 Analyse graphique des résultats

Les captures d'écran suivantes illustrent l'évolution des distances (en mètres) entre les ancres et le tag en fonction du temps (en millisecondes) pendant la navigation.

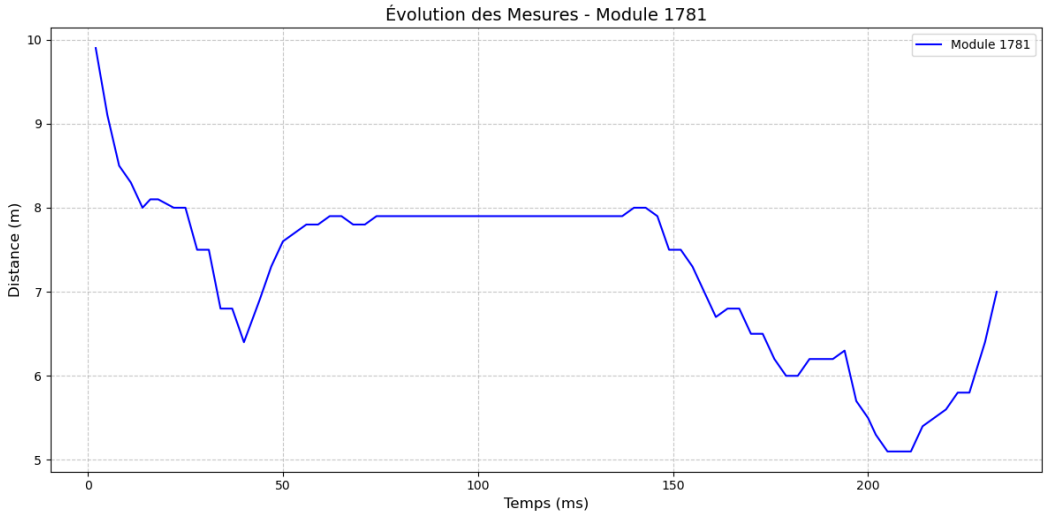


Figure 23 : Évolution du module 1781

© Hafashimana Eric

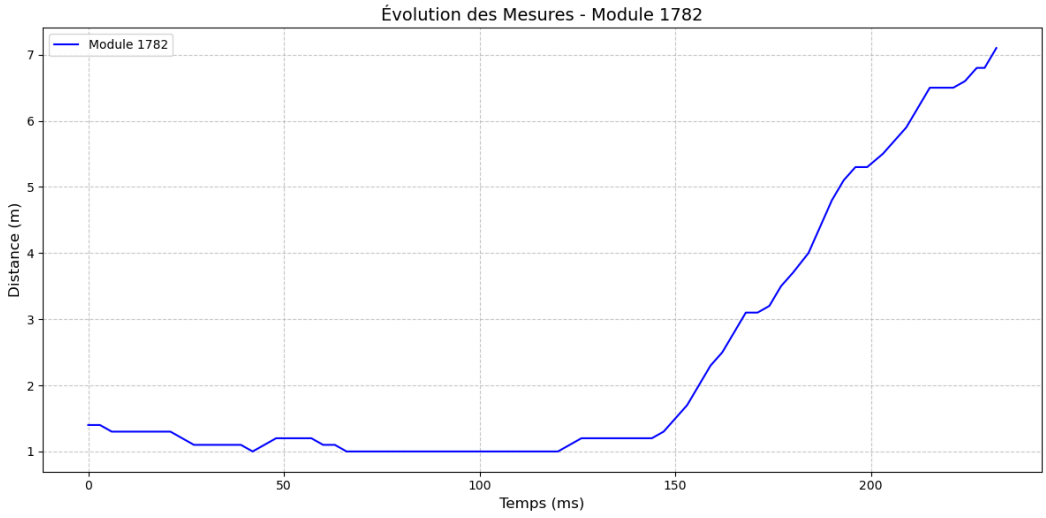


Figure 24 : Évolution du module 1782

© Hafashimana Eric

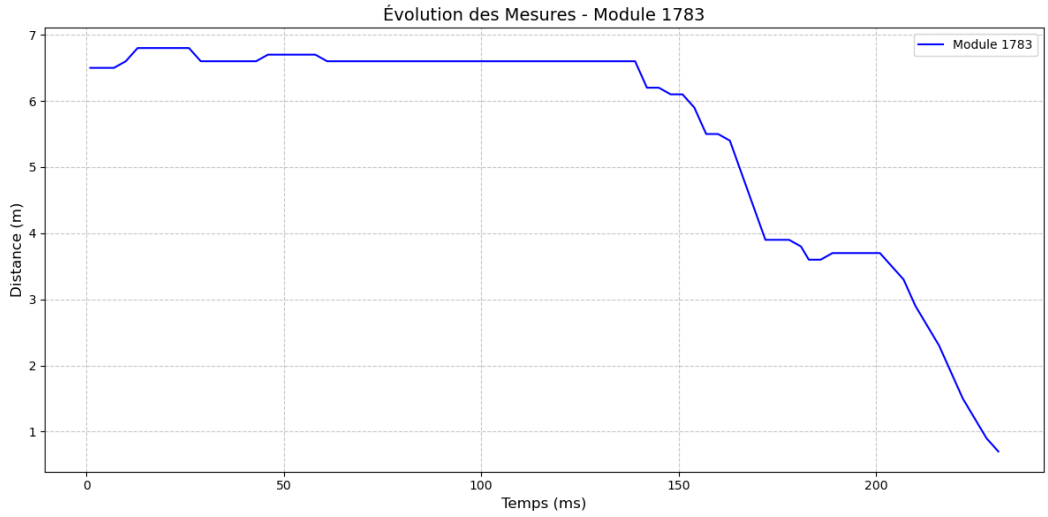


Figure 25 : Évolution du module 1783

© Hafashimana Eric

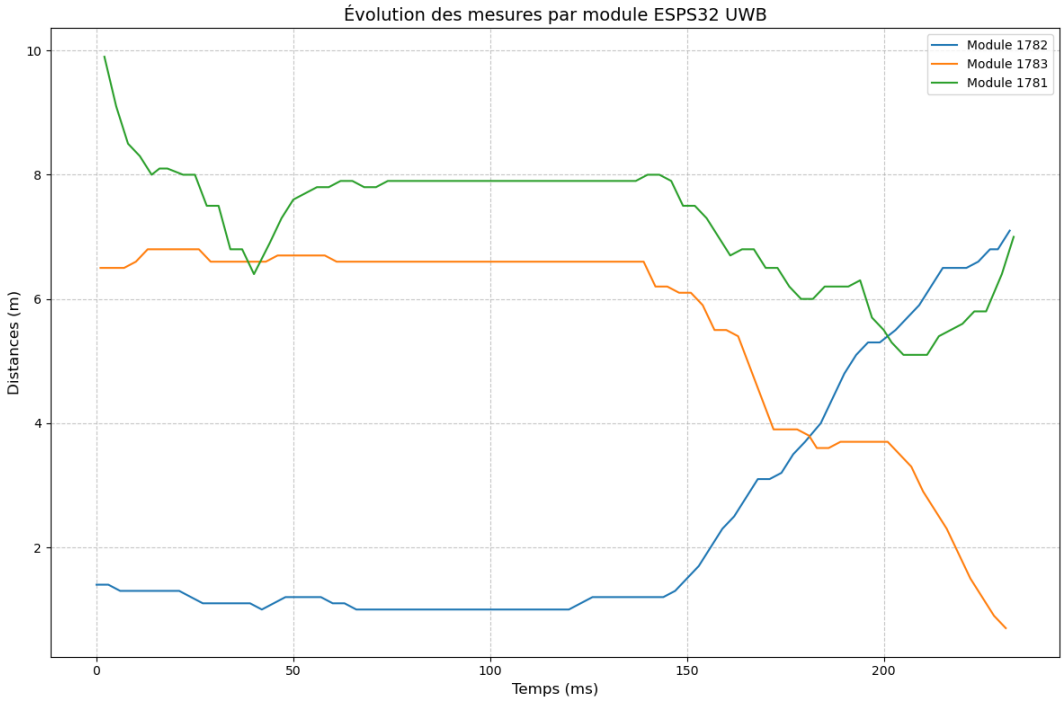


Figure 26 : Comparaison de l'évolution des modules 1781, 1782 et 1783

© Hafashimana Eric

En analysant les graphiques représentant l'évolution des distances pendant la navigation, nous constatons que l'utilisateur se trouvait à des distances différentes par rapport aux ancres

: environ 9,9 m de l'ancre 1781, environ 1,4 m de l'ancre 1782 et environ 6,5 m de l'ancre 1783.

Pendant la navigation, la distance entre l'utilisateur et le module 1781 diminue avant d'augmenter, tandis que la distance entre l'utilisateur et le module 1782 augmente. Par ailleurs, la distance séparant l'utilisateur du module 1783 diminue progressivement.

D'après la Figure 14, qui illustre l'emplacement des ancres dans notre plan universitaire, ces observations suggèrent qu'au départ, l'utilisateur était proche du module 1782, avant de s'éloigner de celui-ci en direction des modules 1781 et 1783. Ensuite, l'utilisateur s'est dirigé vers l'emplacement du module 1783, ce qui explique l'augmentation de la distance par rapport au module 1781.

Dans le chapitre suivant, nous procéderons à une évaluation de notre système et proposerons des fonctionnalités supplémentaires à intégrer dans les travaux futurs.

CHAPITRE 5
ÉVALUATION ET TRAVAUX FUTURS

À partir des captures d'écran que nous avons examinées, nous pouvons constater l'efficacité et la robustesse du système de navigation déployés dans un environnement comportant de nombreux obstacles.

Dans le domaine de la navigation, comme le précisent les critères nécessaires à la mise en place de notre système, l'un des éléments les plus importants est la localisation ou le positionnement. En effet, il est impossible de naviguer dans un espace sans disposer d'une position exacte en temps réel.

Nos tests ont montré que le système présente une marge d'erreur de précision variant entre 0 cm et 20 cm pendant la navigation. En nous référant aux captures d'écran (Figure 21), nous pouvons affirmer que notre système est performant pour la navigation dans des environnements complexes contenant des obstacles.

Pendant nos tests, nous avons d'abord constaté que notre application a surmonté tous les défis posés dans les milieux universitaires. Cependant, nous avons identifié un léger problème lié à la déconnexion automatique de l'application, ce qui entraîne l'arrêt de la réception des données. Rassurez-vous, ce problème n'est pas dû à notre système, mais plutôt à la portée limitée du signal Wi-Fi utilisé. Le Wi-Fi en question était basé dans le local P4-6600. L'aspect essentiel est que, pendant la navigation, dès que l'utilisateur revient dans la zone couverte par le Wi-Fi, l'application se reconnecte automatiquement. Toutefois, si l'utilisateur met trop de temps à revenir, il devra se reconnecter manuellement à l'application. Cela dit, le Tag, lui, n'a besoin du Wi-Fi que pour envoyer des données. Lors de la mise en place de notre système, il sera crucial de s'assurer que l'espace de navigation dispose d'une couverture Wi-Fi adéquate.

Ensuite, lors de nos tests, nous avons également noté un aspect important lié au fonctionnement du système : la manière dont les ancres agissent comme des relais d'antennes. Les ancres peuvent se connecter et se déconnecter automatiquement en fonction

de la portée du Tag. De plus, elles peuvent se reconnecter dès que le Tag les détecte à nouveau.
Enfin, un autre point important est que le système est évolutif. Par exemple, si l'université souhaite agrandir l'espace de navigation, il ne sera pas nécessaire de modifier le code. Il suffira simplement d'attribuer des identités uniques aux nouvelles ancres et de les positionner correctement sur l'interface de l'application pour visualiser leur emplacement.

Lors du lancement de notre application, celle-ci s'est ouverte rapidement, et nous avons également remarqué sa grande vitesse dans l'exécution de ses tâches. Parmi les critères les plus importants pour les utilisateurs, figure la consommation énergétique d'une application, car cela peut avoir un impact direct sur la batterie de leur appareil. Ce qui est favorable pour notre système, c'est que, pendant nos tests, nous avons constaté une faible consommation d'énergie due à l'usage de l'application déployée.
Par ailleurs, soulignons que l'application est dotée d'une interface intuitive et facile à comprendre, qui ne nécessite aucune formation pour une première utilisation. Comme le montrent les captures d'écran examinées dans les sections précédentes, notre application simplifie la compréhension des événements pour l'utilisateur pendant son utilisation. Par exemple, si l'utilisateur commet une erreur ou s'il n'est pas connecté, l'application lui envoie une notification sur son écran avec les informations nécessaires pour corriger le problème. Cependant, lors de nos tests, nous avons relevé un manque d'indication concernant la direction de l'utilisateur. Ce point sera traité dans les travaux futurs. En attendant, l'utilisateur peut naviguer en suivant son itinéraire indiqué (voir Figure 20).

Dans les travaux futurs, nous prévoyons d'ajouter tous les symboles de navigation nécessaires pour faciliter davantage la navigation de l'utilisateur. Ensuite, nous aimerions également intégrer des modules sonores, afin que le système puisse fournir des indications vocales pendant la navigation. Enfin, nous avons l'intention d'ajouter un module de réalité augmentée, permettant aux utilisateurs de visualiser leur direction en temps réel et de naviguer avec encore plus de précision et de facilité.

CONCLUSION

L'évolution des téléphones mobiles a grandement simplifié les tâches dans de nombreux domaines de la vie quotidienne. Leur utilité ne se limite pas à la communication, mais s'étend également à des domaines tels que la navigation. La facilité d'utilisation des smartphones pour la navigation, notamment grâce à leur portabilité, les distingue nettement des ordinateurs. Dotés de technologies avancées telles que le Wi-Fi, les capteurs inertiels et la capacité à communiquer avec des satellites, les smartphones permettent de se localiser et de naviguer facilement d'un endroit à un autre. Cependant, malgré l'utilisation du signal GPS, certaines situations, comme à l'intérieur de bâtiments universitaires, rendent la navigation impossible.

Pour résoudre ce problème de navigation à l'intérieur des bâtiments universitaires, nous avons proposé un système de navigation économique basé sur la technologie UWB. Ce système vise à surmonter les défis liés à la perte de signal GPS dans des environnements clos. Nous avons étudié en détail les technologies et les outils nécessaires pour développer ce système, tout en analysant les méthodes indispensables pour obtenir un système de navigation efficace et robuste. Afin de valider nos travaux, des tests ont été réalisés au sein du bâtiment universitaire de l'UQAC. Le calcul de la distance entre les modules ESP32 UWB se fait de manière suivante : un module fonctionne comme un "tag", tandis que les autres servent d'ancres. Nous avons utilisé la méthode de télémétrie bidirectionnelle DS-TWR pour déterminer la distance entre le tag et les ancres. Avant leur transmission à notre application de navigation, ces distances ont été filtrées à l'aide de l'algorithme de Kalman, ce qui a permis de corriger les erreurs causées par les obstacles présents dans le bâtiment. Les résultats montrent une précision d'erreur variant de 0 cm à 20 cm maximum. Pour déterminer la position exacte de l'utilisateur en temps réel, notre système utilise la méthode de trilatération, qui repose sur les mesures des distances entre le tag et les ancres. Les tests effectués ont démontré que le système est à la fois efficace et robuste, et qu'il peut être utilisé dans des environnements tels que les universités où le signal GPS est insuffisant.

En conclusion, les résultats obtenus confirment que notre projet intitulé « Conception et mise en œuvre d'un système de navigation intérieure économique utilisant des technologies open-source dans les bâtiments universitaires » a été mené à bien et répond aux objectifs fixés.

LISTE DE RÉFÉRENCES

[1] M. D. Messaoudi, B. -A. J. Menelas et H. Mcheick, «Autonomous Smart White Cane Navigation System for Indoor Usage,» *Technologies,* vol. 8, n°13, p. 37, 2020. https://doi.org/10.3390/technologies8030037

[2] M. D. Messaoudi, B. -A. J. Menelas et H. Mcheick, «Review of Navigation Assistive Tools and Technologies for the Visually Impaired,» *Sensors,* vol. 22, n°120, p. 7888, 2022. https://doi.org/10.3390/s22207888

[3] T. S. Dang, T. A. Mai, D. T. Duong, V. C. Le, H. C. Ta et S. P. Ho, «The Practice of Mapping-based Navigation System for Indoor Robot with RPLIDAR and Raspberry Pi,» *2021 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE),* p. 279–282, 2021. https://doi.org/10.1109/ICSSE52999.2021.9538474

[4] A. Mulloni, H. Seichter et D. Schmalstieg, «Handheld augmented reality indoor navigation with activity-based instructions,» *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services - MobileHCI '11,* p. 211–220, 2011. https://doi.org/10.1145/2037373.2037406

[5] A. Mulloni, D. Wagner, I. Barakonyi et D. Schmalstieg, «Indoor Positioning and Navigation with Camera Phones,» *IEEE Pervasive Computing,* vol. 8, n°12, p. 22–31, 2009. https://doi.org/10.1109/MPRV.2009.30

[6] Y. -C. Cheng, J. -Y. Lin, C. -W. Yi, Y. -C. Tseng, L. -C. Kuo et Y. -J. Yeh, «AR-Based Positioning for Mobile Devices,» *2011 40th International Conference on Parallel Processing Workshops,* p. 63–70, 2011. https://doi.org/10.1109/icppw.2011.48

[7] J. Tiemann, F. Schweikowski et C. Wietfeld, «Design of an UWB indoor-positioning system for UAV navigation in GNSS-denied environments,» *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN),* 2015. https://doi.org/10.1109/ipin.2015.7346960

[8] F. Baek, I. Ha et H. Kim, «Augmented reality system for facility management using image-based indoor localization,» *Automation in Construction,* vol. 99, p. 18–26, 2019. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.034

[9] H. Hile, R. Grzeszczuk, A. Liu, R. Vedantham, J. Košecka et G. Borriello, «Landmark-Based Pedestrian Navigation with Enhanced Spatial Reasoning,» *Pervasive Computing,* vol. 5538, p. 59–76, 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01516-8_6

[10] S. Vert et R. Vasiu, «Using Augmented Reality for Contextual Information and Navigation in Academic Buildings,» *2012 IEEE 12th International Conference on Advanced Learning Technologies,* p. 728–729, 2012. https://doi.org/10.1109/ICALT.2012.156

[11] L. C. Huey, P. Sebastian et M. Drieberg, «Augmented reality based indoor positioning navigation tool,» *2011 IEEE Conference on Open Systems,* p. 256–260, 2011. https://doi.org/10.1109/ICOS.2011.6079276

[12] S. Kasprzak, A. Komninos et P. Barrie, «Feature-Based Indoor Navigation Using Augmented Reality,» *2013 9th International Conference on Intelligent Environments,* p. 100–107, 2013. https://doi.org/10.1109/IE.2013.51

[13] J. Kim et H. Jun, «Vision-based location positioning using augmented reality for indoor navigation,» *IEEE Transactions on Consumer Electronics,* vol. 54, n°13, p. 954–962, 2008. https://doi.org/10.1109/tce.2008.4637573

[14] F. A. X. Da Mota, M. X. Rocha, J. J. P. C. Rodrigues, V. H. C. De Albuquerque et A. R. De Alexandria, «Localization and Navigation for Autonomous Mobile Robots Using Petri Nets in Indoor Environments.,» *IEEE Access,* vol. 6, pp. 31665-31676, 2018. https://doi.org/10.1109/access.2018.2846554

[15] R. I. Marasigan, Y. D. Austria, J. B. Enriquez, L. Lolong Lacatan et R. M. Dellosa, «Unmanned Aerial Vehicle Indoor Navigation using Wi-Fi Trilateration,» *2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC),* pp. 346-351, 2020. https://doi.org/10.1109/icsgrc49013.2020.9232623

[16] B. Olszewski, S. Fenton, B. Tworek, J. Liang et K. Yelamarthi, «RFID positioning robot: An indoor navigation system,» *IEEE International Conference on Electro-Information Technology, EIT 2013,* 2013. https://doi.org/10.1109/eit.2013.6632687

[17] J. J. .. Wang, «Antennas for Global Navigation Satellite System (GNSS),» *Proceedings of the IEEE,* vol. 100, n°17, 2012. https://doi.org/10.1109/jproc.2011.2179630

[18] F. Zafari, A. Gkelias et K. K. Leung, «A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials,* vol. 21, n°13, pp. 2568-2599, 2019. https://doi.org/10.1109/comst.2019.2911558

[19] G. Retscher et Q. Fu, «Continuous indoor navigation with RFID and INS,» *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium,* 2010. https://doi.org/10.1109/PLANS.2010.5507242

[20] A. Satan, «Bluetooth-based indoor navigation mobile system,» *2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC),* 2018. https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2018.8399651

[21] A. Singh, Y. Shreshthi, N. Waghchoure et W. Wakchaure, «Indoor Navigation System Using Bluetooth Low Energy Beacons,» *2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA),* 2018. https://doi.org/10.1109/ICCUBEA.2018.8697351

[22] D. Feng, C. Wang, C. He, Y. Zhuang et X. -G. Xia, «Kalman Filter Based Integration of IMU and UWB for High-Accuracy Indoor Positioning and Navigation,» *IEEE Internet of Things Journal,* p. 3133–3146, 2020. https://doi.org/10.1109/jiot.2020.2965115

[23] F. Campana, A. Pinargote, F. Dominguez et E. Pelaez, «Towards an indoor navigation system using Bluetooth Low Energy Beacons,» *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM),* 2017. https://doi.org/10.1109/etcm.2017.8247464

[24] D. I. Vilaseca et J. I. Giribet, «Indoor navigation using WiFi signals,» *2013 Fourth Argentine Symposium and Conference on Embedded Systems (SASE/CASE),* 2013. https://doi.org/10.1109/sase-case.2013.6636772

[25] J. Tiemann et C. Wietfeld, «Scalable and precise multi-UAV indoor navigation using TDOA-based UWB localization,» *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN),* 2017. https://doi.org/10.1109/ipin.2015.7346960

[26] S. Sczyslo, J. Schroeder, S. Galler et T. Kaiser, «Hybrid localization using UWB and inertial sensors,» *2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband,* pp. 89-92, 2008. https://doi.org/10.1109/icuwb.2008.4653423

[27] M. Segura, V. Mut et C. Sisterna, «Ultra-wideband indoor navigation system,» *IET Radar Sonar & Navigation,* vol. 6, n°15, p. 402, 2012. https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2011.0352

[28] M. I. Jais, P. Ehkan, R. B. Ahmad, I. Ismail, T. Sabapathy et M. Jusoh, «Review of angle of arrival (AOA) estimations through received signal strength indication (RSSI) for wireless sensors network (WSN),» *2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT),* pp. 354-359, 2015. https://doi.org/10.1109/I4CT.2015.7219597

[29] M. F. Bin Abdul Malek, P. Sebastian et M. Drieberg, «Augmented Reality Assisted Localization for Indoor Navigation on Embedded Computing Platform,» *International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA),* pp. 111-116, 2017. https://doi.org/10.1109/ICSIPA.2017.8120589

[30] R. Gupta, S. R, R. S. Mishra, G. Singal, T. Badal et D. Garg, «Corridor Segmentation for Automatic Robot Navigation in Indoor Environment using Edge Devices,» *Computer Networks,* 2020. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107374

[31] Q. Li, R. Li, K. Ji et W. Dai, «Kalman Filter and Its Application,» *2015 8th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS),* 2015. https://doi.org/10.1109/ICINIS.2015.35

[32] M. Haklay et P. Weber, «OpenStreetMap: User-Generated Street Maps,» *IEEE Pervasive Computing,* vol. 7, n°14, p. 12–18, 2008. https://doi:10.1109/mprv.2008.80

[33] M. Heydariaan, H. Dabirian et O. Gnawali, «AnguLoc: Concurrent Angle of Arrival Estimation for Indoor Localization with UWB Radios,» *2020 16th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS),* pp. 112-119, 2020. https://doi.org/10.1109/DCOSS49796.2020.00028

[34] A. Siddiqa, S. Sahoo et K. Saraswathi, «Design and Implementation of Indoor Positioning Using UWB Positioning Algorithm for Indoor Navigation,» *2022 IEEE 3rd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT),* p. 1–7, 2022. https://doi.org/10.1109/GCAT55367.2022.9971871

[35] N. Smaoui, M. Heydariaan et O. Gnawail, «Single-Antenna AoA Estimation with UWB Radios,» *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC),* 2021. https://doi.org/10.1109/wcnc49053.2021.9417526

[36] T. Gigl, G. J. M. Janssen, V. Dizdarevic, K. Witrisal et Z. Irahhauten, «Analysis of a UWB Indoor Positioning System Based on Received Signal Strength,» *2007 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication,* pp. 97-101, 2007. https://doi.org/10.1109/wpnc.2007.353618

[37] I. Guvenc et C. -C. Chong, «A Survey on TOA Based Wireless Localization and NLOS Mitigation Techniques,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials,* vol. 11, n°13, p. 107–124, 2009. https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090308

[38] D. Dardari, P. Closas et P. M. Djuric, «Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* vol. 64, n°14, p. 1263–1278, 2015. https://doi.org/10.1109/tvt.2015.2403868

[39] F. Ge et Y. Shen, «Single-Anchor Ultra-wideband Localization System using Wrapped PDoA,» *IEEE Transactions on Mobile Computing,* p. 4609–4623, 2021. https://doi.org/10.1109/tmc.2021.3083613

[40] Y. Zhang et L. Duan, «Toward Elderly Care: A Phase-Difference-of-Arrival Assisted Ultra-Wideband Positioning Method in Smart Home,» *IEEE Access,* p. 139387–139395, 2020. https://doi.org/10.1109/access.2020.3012717

[41] H. Chen, T. Ballal, N. Saeed et M.-. S. Alouini, «A Joint TDOA-PDOA Localization Approach Using Particle Swarm Optimization,» *IEEE Wireless Communications Letters,* 2020. https://doi.org/10.1109/lwc.2020.2986756

[42] J. Chen, D. Wu, P. Song, F. Deng, Y. He et S. Pang, «Multi-View Triangulation: Systematic Comparison and an Improved Method,» *IEEE Access,* vol. 8, p. 1–1, 2020. https://doi.org/10.1109/access.2020.2969082

[43] B. Lee, D. -M. Woo, M. -K. Park et S. Kim, «Development of self-localizer using collaboration of trilateration and triangulation,» *2014 11th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD),* 2014. https://doi.org/10.1109/fskd.2014.6980926

[44] T. L. Jensen, M. L. Jakobsen, J. Ostergaard, J. K. Nielsen, C. Byskov, P. Baek et S. H. Jensen, «Online estimation of wind turbine blade deflection with UWB signals,» *2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO),* 2015. https://doi.org/10.1109/eusipco.2015.7362570

[45] M. E. Rusli, M. Ali, N. Jamil et M. M. Din, «An Improved Indoor Positioning Algorithm Based on RSSI-Trilateration Technique for Internet of Things (IOT),» *2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE),* 2016. https://doi.org/10.1109/iccce.2016.28

[46] C. L. Sang, M. Adams, T. Korthals, T. Hormann, M. Hesse et U. Ruckert, «A Bidirectional Object Tracking and Navigation System using a True-Range Multilateration Method,» *2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN),* 2019. https://doi.org/10.1109/ipin.2019.8911811

[47] B. Silva, Z. Pang, J. Akerberg, J. Neander et G. Hancke, «Experimental study of UWB-based high precision localization for industrial applications,» *2014 IEEE International Conference on Ultra-WideBand (ICUWB),* 2014. https://doi.org/10.1109/icuwb.2014.6958993

[48] S. Monta, S. Promwong et V. Kingsakda, «Evaluation of ultra-wideband indoor localization with trilateration and min-max techniques,» *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON),* 2016. https://doi.org/10.1109/ecticon.2016.7561496

[49] H. N. Warnakulasuriya, T. Dorji et T. Horanont, «Indoor Positioning Based on Time of Flight and Kalman Filtering Using Ultra-Wideband Sensors,» *2024 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp),* p. 117–123, 2024. https://doi.org/10.1109/BigComp60711.2024.00027

[50] E. Teoman et T. Ovatman, «Trilateration in Indoor Positioning with an Uncertain Reference Point,» *2019 IEEE 16th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC),* 2019. https://doi.org/10.1109/icnsc.2019.8743240