



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE IBN KHALDOUN - TIARET

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTÉ DES MATHÉMATIQUES ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER

Spécialité Génie Informatique

Par :

BOUZERIA Rabia
SLIMANI Halima

Sur le thème

**Application mobile pour se déplacer à l'intérieur des
structures publiques ou privées**

Soutenu publiquement le .. / 06 / 2025 à Tiaret devant le jury composé de :

Mr BEKKAR khaled	MAA	Université Ibn Khaldoun-Tiaret-	Président
Mr CHIKHAOUI Ahmed	MCA	Université Ibn Khaldoun-Tiaret-	Encadreur
Mr BENOUDA Habib	MAA	Université Ibn Khaldoun-Tiaret-	Examineur

2024-2025

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail et nous a permis d'être ce que nous sommes aujourd'hui.

Nous adressons nos sincères remerciements à Mr CHIKHAOUI Ahmed, pour avoir accepté d'encadrer ce travail et pour ses conseils et ses précieuses orientations, sa patience qu'il n'a cessée de nous apporter tout au long de ce travail.

Nous tenons tout particulièrement à remercier vivement les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce modeste travail:

Dr Bekkar khaled et Dr Benouda Habib.

Nous remercions chaleureusement toute l'équipe du laboratoire pour leurs disponibilités et pour leur gentillesse.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Avant toute chose, mon succès ne dépend que d'Allah, le Très-Haut.

Avant de rendre hommage à ceux qui m'ont soutenue, je tiens à adresser mes remerciements à mes grands-parents, qui ont enraciné en nous des valeurs nobles et des principes justes. Je tiens à mentionner en particulier mon grand-père Bouzeria Ahmed, qui a été pour moi un véritable pilier dans tous les sens du terme. Qu'Allah lui accorde une longue vie, en bonne santé, emplie de bénédictions, et le récompense abondamment pour tout le bien qu'il a semé. J'espère être digne de la confiance qu'il m'a toujours accordée.

À mes chers parents, qu'Allah protège leur vie, les illumine, et les récompense pour tout l'amour, la tendresse, les prières et les encouragements qu'ils m'ont offerts. Leur patience et leur soutien indéfectible ont été un phare tout au long de mon chemin. Puisse ce travail, par la volonté d'Allah, être le fruit de leurs sacrifices et le témoignage sincère de ma profonde gratitude.

À mon frère Mohamed Abdelillah, et à mes sœurs bienaimées Malak et Hadil, pour leur affection sincère, leur soutien moral et leur présence constante dans les moments de joie comme dans les épreuves difficiles.

À toute ma famille et à mes proches, chacun et chacune par son nom, pour leur amour, leurs prières. Qu'Allah les bénisse et leur accorde le meilleur dans cette vie et dans l'au-delà.

À mes amis, pour leurs invocations, leurs encouragements et leur motivation constante.

Rabia BOUZERIA

Dédicace

À mon père, *Slimani Saad*, Merci pour ta présence solide, tes conseils calmes, et ton soutien discret mais essentiel. Ta confiance en moi m'a portée plus loin que tu ne peux l'imaginer.

À ma mère, *BM*, Un merci infini et particulier. Ton amour, ta tendresse et tes prières ont été le cœur battant de mes réussites. Tu es mon refuge, ma lumière, et la plus belle bénédiction que la vie m'ait offerte. Que Dieu te protège et t'élève en dignité et en paix.

À mon frère, *Slimani Mohamed*, Merci d'avoir été un véritable pilier dans ce parcours. Ta présence, ton aide concrète et ton soutien moral ont allégé bien des fardeaux. Je te suis profondément reconnaissante.

À mes amies, Merci d'avoir été là avec vos mots doux, vos encouragements sincères, votre écoute précieuse. Votre amitié a été un souffle d'air frais dans les moments les plus durs.

Et enfin, *Louange à Allah*, Le Tout-Miséricordieux, pour Sa guidance, pour les forces qu'Il m'a accordées et pour les épreuves par lesquelles Il m'a fait grandir. C'est par Sa volonté que cette étape a été franchie, et vers Lui reviennent ma reconnaissance et ma confiance éternelles.

Slimani Halima

Table de figures

Numéro	Le nom de figure	La page
1	IPS vs GPS	20
2	IPS	21
3	La base de système RFID	26
4	Logo de Bluetooth	27
5	Logo de Wi-Fi	28
6	LiDAR	29
7	UWB	30
8	Trilateration technique	31
9	Triangulation technique	32
10	Diagramme de cas d'utilisation	45

Abréviations

Abréviation	Signification (FR)	Signification (EN)
GPS	Système de positionnement global	Global Positioning System
BLE	Bluetooth basse consommation	Bluetooth Low Energy
UML	Langage de modélisation unifié	Unified Modeling Language
AR	Réalité augmentée	Augmented Reality
QR	Code à réponse rapide	Quick Response code
RTT	Temps aller-retour	Round Trip Time
ToF	Temps de vol	Time of Flight
IMU	Unité de mesure inertielle	Inertial Measurement Unit
LiDAR	Détection et télémétrie par la lumière	Light Detection and Ranging
UWB	Bande ultra-large	Ultra Wide Band
RSSI	Indicateur de force du signal reçu	Received Signal Strength Indicator
KNN	Algorithme des k plus proches voisins	K-Nearest Neighbors
CNN	Réseau neuronal convolutif	Convolutional Neural Network
IPS	Système de positionnement intérieur	Indoor Positioning System
MVC	Modèle-Vue-Contrôleur	Model-View-Controller
API	Interface de programmation d'application	Application Programming Interface

Résumés

En arabe :

شهد الاستخدام الواسع النطاق للأجهزة المحمولة ظهور خدمات رقمية جديدة تهدف إلى تحسين الحياة اليومية للأفراد وتقليل الضغوط الناتجة عن تسارع وتيرة الحياة في مجتمع الاستهلاك. من بين أبرز هذه الاحتياجات المتزايدة، برزت الحاجة إلى أنظمة فعالة لتحديد المواقع داخل الهياكل والمؤسسات المختلفة مثل الجامعات، المستشفيات، المطارات والأسواق التجارية، حيث يُعد غياب فعالية نظام GPS داخل المباني مشكلة حقيقية تؤثر على توجيه المستخدمين، خصوصاً في الحالات الحرجة. وفي هذا السياق، يتمثل مشروع التخرج في دراسة وتصميم وتطوير تطبيق موبايل يتيح للمستخدمين التنقل داخل هذه الفضاءات المغلقة، من خلال نظام لتحديد المواقع يعتمد على تقنيات بديلة مثل Wi-Fi ، البلوتوث منخفض الطاقة (BLE) ، QR Code ، والواقع المعزز، مع استخدام طريقة تجمع قوة الإشارة في أماكن محددة أثناء مرحلة التعلم وتخزينها في قاعدة بيانات، بهدف استغلالها لاحقاً لتحديد الموقع بدقة في مرحلة التوقع، مع تنفيذ خوارزمية تعلم قادرة على تقدير الموقع الأكثر احتمالاً. وقد تم اعتماد منهجية هندسية تركز على دورة حياة من نوع "V" ونمذجة UML لتحليل المتطلبات وتصميم النظام، فيما تم تطوير التطبيق باستخدام تقنيات حديثة كـ Laravel ، AR.js و Google Maps. وقد أثبتت الدراسة جدوى الحل من الناحيتين التقنية والاقتصادية، إلى جانب قابليته للتكيف مع مختلف البيئات، مع اقتراح آفاق مستقبلية لتطوير النظام عبر دمج الذكاء الاصطناعي وتحسين دقة التوقع، مع الحرص على احترام خصوصية المستخدمين.

الكلمات المفتاحية: الموقع الداخلي، شبكة الواي فاي، البلوتوث منخفض الطاقة (BLE) ، رمز الاستجابة السريعة (QR Code) ، الواقع المعزز (AR) ، قوة الإشارة (RSSI) ، قاعدة البيانات، نموذج دورة الحياة على شكل "V" ، لغة النمذجة الموحدة (UML) ، triangulation، Fingerprinting

En français :

L'utilisation généralisée des appareils mobiles a favorisé l'émergence de nouveaux services numériques visant à améliorer le quotidien des individus et à atténuer les pressions engendrées par le rythme effréné de la société de consommation. Parmi ces besoins croissants figure la nécessité de disposer de systèmes efficaces de localisation à l'intérieur des structures telles que les universités, les hôpitaux, les aéroports ou les centres commerciaux, où l'inefficacité des systèmes GPS pose un véritable problème d'orientation, en particulier dans les situations critiques. Dans ce contexte, le projet de fin d'études consiste à étudier, concevoir et développer une application mobile permettant aux utilisateurs de se déplacer à l'intérieur de ces espaces clos, à l'aide d'un système de positionnement reposant sur des technologies alternatives telles que le Wi-Fi, le Bluetooth Low Energy (BLE), les codes QR et la réalité augmentée. Le système repose sur une méthode de collecte des puissances de signal dans des emplacements précis lors d'une phase d'apprentissage, ces données étant ensuite stockées dans une base de données pour être exploitées ultérieurement lors de la phase de localisation, avec l'intégration d'un algorithme d'apprentissage permettant d'estimer la position la plus probable. Le projet suit une méthodologie d'ingénierie fondée sur le cycle de vie en « V » et une modélisation UML pour analyser les besoins et concevoir le système. Le développement de l'application a été réalisé avec des technologies modernes telles que Laravel, AR.js et Google Maps. L'étude a démontré la faisabilité technique et économique de la solution, ainsi que sa capacité à s'adapter à différents environnements. Enfin, des perspectives d'amélioration ont été proposées, notamment l'intégration de l'intelligence artificielle pour affiner la précision du positionnement, tout en assurant la protection de la vie privée des utilisateurs.

Mots-clés : Localisation indoor, Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE) , QR Code, Réalité augmentée (AR), Signal RSSI, Base de données, Modèle en V, UML, Google Maps, Fingerprinting, triangulation.

En anglais :

The widespread use of mobile devices has led to the emergence of new digital services aimed at improving people's daily lives and reducing the pressures resulting from the fast pace of consumer society. Among these growing needs is the requirement for efficient indoor positioning systems within structures such as universities, hospitals, airports, and shopping centers, where the ineffectiveness of GPS creates a real challenge in user guidance, especially in critical situations. In this context, the graduation project involves studying, designing, and developing a mobile application that enables users to navigate within these enclosed spaces using a positioning system based on alternative technologies such as Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), QR codes, and augmented reality. The system relies on a method of collecting signal strength at specific locations during a learning phase, storing this data in a database to be later used for determining position, with a learning algorithm implemented to estimate the most probable location. The project follows an engineering methodology based on the "V" life cycle model and UML modeling to analyze requirements and design the system. The application was developed using modern technologies such as Laravel, AR.js, and Google Maps. The study demonstrated that the proposed solution is technically and economically feasible and adaptable to various environments. Finally, future perspectives include integrating artificial intelligence to enhance positioning accuracy while ensuring user privacy protection.

Keywords:

Indoor localization, Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), QR Code, Augmented Reality (AR), RSSI signal, Database, V-Model, UML, Google Maps. Fingerprinting, Triangulation.

Table de matière

Remerciements.....	02
Dédicace 1.....	03
Dédicace 2.....	04
Table des figures.....	05
Abréviations.....	06
Résumé AR	08
Résumé FR	09
Résumé EN.....	10
Introduction générale :.....	13
CHAPITRE 1 : Cadre et faisabilité du projet de localisation indoor	25
Introduction du chapitre 01:	15
1.1 Cadre du projet :	15
1.1.1 Problématique :	15
1.1.2 Travail demandé :	15
1.2 Étude de la faisabilité du projet :	16
1.2.1 Validation de l'idée retenue:.....	16
1.2.2 Étude de faisabilité technologique :	16
1.2.3 Étude de faisabilité économique :	17
1.3 Méthodologie et formalisme adopté :	18
1.4 Cycle de vie adopté :	18
1.5 Conclusion du chapitre 01 :	19
 CHAPITRE 2 : Enjeux et technologies de la localisation indoor	 31
Introduction du chapitre 02 :	21
2.1 Localisation INDOOR /OUTDOOR :	21
2.2 Géolocalisation INDOOR (définition et usage) :	22
2.2.1 Enjeux de localisation indoor :	23
2.2.1.1 Cartographie :	24
2.2.1.2 Précision du positionnement :	24

2.2.1.3 Infrastructures :	25
2.2.2 Technologies et méthodes de géolocalisation indoor :	26
2.2.3 Géolocalisation hybride :	33
2.2.3.1 Standard Wifi et localisation indoor :	34
2.2.3.2 Technique de fingerprinting :	35
2.2.3.3 Méthode de k-nearest point :	37
2.2.4 Algorithmes pour la géolocalisation indoor :	41
CHAPITRE 3 : Spécifications UML	54
3.1 Acteurs du système :	44
3.2 Spécification des besoins :	44
3.2.1 Besoins fonctionnels :	44
3.2.2 Besoins non fonctionnels :	44
3.3 Analyse des besoins :	46
3.3.1 Diagramme de cas d'utilisation principal :	46
3.3.2 Description de cas d'utilisation : prendre des mesures :	47
3.3.3 Description de cas d'utilisation : localiser :	47
3.3.4 Diagramme de collaboration : synchroniser :	47
CHAPITRE 4 : Conception et réalisation de l'application	59
4.1 Conception :	49
4.1.1 Architecture globale de la solution :	49
4.1.2 Conception de base de données :	49
4.2 Choix technique :	49
4.2.1 Choix du langage de programmation :	49
4.2.2 Choix de l'architecture d'application :	50
4.2.3 Environnement de travail :	50
4.2.3.1 Environnement matériel :	50
4.2.3.2 Environnement logiciel :	51
4.2.3.3 Choix des outils de travail :	51
4.3 Travail réalisé.	52

Conclusion :.....	60
Perspectives :.....	61
Références bibliographiques :	62

Introduction générale :

Contexte et problématique :

La localisation des individus dans les bâtiments publics est un problème stratégique actuel en de très nombreux secteurs, tels que le management, la sécurité, le marketing pour l'optimisation des services. Contrairement aux environnements externes où le GPS est devenu une norme imparable, les environnements fermés comme les grands centres commerciaux, les aéroports ou les hôpitaux rendent inefficace ce système à cause des obstacles physiques (murs, plafonds, interférences). Cette absence de précision entraîne des problèmes d'orientation, d'itinéraires imprécis, notamment dans les contextes d'urgence médicale, de secourisme.

Objectifs et hypothèses :

Face à ces limitations, le projet présent essaye de rechercher la viabilité de systèmes de géolocalisation indoor capables de compenser les défauts du GPS. L'objectif principal est de mettre au point une solution de géolocalisation intérieure précise, une solution techniquement possible pour différents types de lieux publics fermés. En supposant que grâce à l'interconnexion des technologies émergentes comme Bluetooth, Wifi, il est possible d'obtenir un système efficace de navigation intérieure répondant aux besoins particuliers des utilisateurs et des gestionnaires de ces locaux.

Méthodologie générale :

Notre mémoire est divisé en quatre chapitres.

Chapitre 01 : « Cadre et faisabilité du projet de localisation intérieure »

Ce chapitre présente le contexte général du projet, le problème à résoudre et les objectifs recherchés. Il aborde également la question de l'étude de faisabilité tant du point de vue technologique qu'économique et décrit la méthodologie et le cycle de vie adoptés pour l'exécution du projet.

Chapitre 02 : « Enjeux et technologies de la localisation indoor »

Le chapitre est consacré à l'étude des différentes technologies de géolocalisation dans les espaces intérieurs. Il compare les systèmes intérieurs/extérieurs, met en évidence les défis de la localisation intérieure (cartographie, précision, infrastructure) et décrit les méthodes et algorithmes hybrides utilisés dans ce domaine.

Chapitre 03 : « Spécifications UML »

Ce chapitre décrit les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles du système, énumère les parties prenantes impliquées et présente des diagrammes UML pour représenter des cas d'utilisation. Il s'agit d'une base pour la conception du système à créer.

Chapitre 04 : « Conception et réalisation de l'application »

C'est le dernier chapitre ; il décrit l'architecture globale de la solution ainsi que les choix techniques basés sur le matériel et les logiciels. Il décrit également la base de données, les outils utilisés et les différentes étapes du développement de l'application pour sa mise en œuvre.

CHAPTER 01 :

**Cadre et faisabilité du projet
de localisation intérieure.**

Introduction du chapitre 01 :

Ce chapitre constitue la première étape de notre projet et vise à établir les bases nécessaires à sa bonne compréhension et à son développement. Il commence par définir le cadre général du projet, en exposant la problématique de la localisation dans les environnements intérieurs et les objectifs à atteindre. Ensuite, une étude de faisabilité est réalisée pour s'assurer que l'idée retenue est techniquement et économiquement faisable. Ce chapitre traite également des méthodes et du formalisme utilisés pour organiser notre travail. Enfin, il expose en détail le cycle de vie sélectionné pour le projet, dans le but d'assurer une démarche cohérente et progressive.

1.1 Cadre du projet :

1.1.1 Problématique :

Si les systèmes satellitaires GPS sont aujourd'hui un point de référence nécessaire à l'extérieur, leur efficacité est fortement réduite dans les espaces intérieurs, en particulier dans les structures de grande taille tels que les universités, les hôpitaux ou les aéroports. Ceci est dû au fait les barrières physiques telles que les murs ou les plafonds empêchent la propagation des signaux satellites, il devient inexact voire impossible de connaître l'emplacement des itinéraires demandés par les visiteurs. Cela pose des problèmes pour guider les utilisateurs, surtout en cas d'urgence. Il est donc important de développer des solutions alternatives, n'utilisant pas le GPS, qui garantissent une localisation fiable et précise, adaptée aux spécificités de chaque espace intérieur.

1.1.2 Travail demandé :

Nous essayerons d'abord de faire le tour des diverses technologies qui existent (Wifi, Bluetooth, RFID, etc.) capables de localiser à l'intérieur des bâtiments publics. Ensuite, nous présenterons les cinq étapes pour concevoir et mettre en œuvre une solution de géolocalisation pour les espaces intérieurs :

- Analyser les besoins des utilisateurs dans les endroits spécifiés (centres commerciaux, hôpitaux, aéroports, etc.).
- Évaluer si la solution envisagée est réalisable sur le plan technologique et économique.
- Proposer une architecture fonctionnelle du système.
- Utiliser des outils UML pour modéliser les besoins.
- Créer un prototype fonctionnel qui prouve la validité du concept.

L'objectif final est de présenter une solution pratique, techniquement réalisable pour la navigation et la localisation indoor, pour le bénéfice à la fois des utilisateurs et des gestionnaires d'infrastructures.

1.2 Étude de la faisabilité du projet :

1.2.1 Validation de l'idée retenue:

Les spécialistes prévoient plus d'un million de déploiements de systèmes de géolocalisation indoor dans les différents domaines d'ici à 2030, avec les balises BLE ([Balise BLE émetteur miniature BLE diffusant un ID unique. Il permet la proximité des magasins de détail, la navigation interne et la détection des capacités analytiques. C'est facile et peu coûteux. Leurs introductions à grande échelle s'expliquent par leur utilité directe pour les concessionnaires \(campagnes publicitaires, magasins ergonomiques, analyse comportementale, etc.\)](#) comme technologie dominante. La croissance rapide touche plusieurs secteurs, notamment la restauration rapide et les supérettes, tandis que d'autres technologies comme les ultrasons et le Wifi continuent de jouer un rôle complémentaire [1].

Toutes les institutions à travers le monde tendent à améliorer la précision et à faciliter la mise en place d'un tel système, ce qui prouve le caractère innovant de notre idée.

1.2.2 Étude de faisabilité technologique :

Le développement d'une application de géolocalisation en intérieur repose sur la faisabilité technique de plusieurs éléments clés :

Capteurs embarqués : La plupart des smartphones modernes sont équipés de capteurs tels que l'accéléromètre, le gyroscope, les modules BLE (Bluetooth Low Energy) et les récepteurs Wi-Fi. Ces composants permettent l'implémentation de techniques comme la trilatération, le fingerprinting ou encore les mesures de temps d'arrivée (ToA) [2], [3].

Fusion de données : L'intégration de plusieurs sources de données (BLE, Wi-Fi, IMU) améliore considérablement la précision de localisation. Des algorithmes tels que les filtres de Kalman sont souvent utilisés pour combiner ces données de manière cohérente et en temps réel [3][4].

Précision atteinte : Des études expérimentales montrent que la précision des systèmes basés sur BLE varie généralement entre 2 et 4 mètres, et peut atteindre moins d'un mètre lorsqu'ils sont combinés à d'autres technologies comme l'IMU ou l'UWB [3][4].

Plateformes logicielles et compatibilité : Des outils comme Flutter, AR.js ou les SDKs Android/iOS facilitent l'intégration de cartes intérieures, de navigation assistée et même de réalité augmentée. La disponibilité de balises

BLE à faible coût et de plateformes cloud (Firebase, AWS) renforce la viabilité de ces solutions [5].

1.2.3 Étude de faisabilité économique :

L'analyse économique démontre que la solution de géolocalisation intérieure est financièrement accessible et génère une forte valeur ajoutée.

Coût du matériel :

- Les balises BLE (Bluetooth Low Energy) sont vendues entre 5 et 10 € l'unité, avec une longue durée de vie de plusieurs années, permettant une couverture efficace dans les environnements intérieurs [6].
- De plus, l'infrastructure Wi-Fi est souvent déjà installée dans les bâtiments publics (centres commerciaux, universités, hôpitaux), évitant des investissements supplémentaires [7].

Coût de développement logiciel :

- Les coûts sont principalement liés aux ressources humaines (développeurs, designers, testeurs) nécessaires à la création de l'application et de son interface d'administration.

Retour sur investissement :

- Diminution des frais de personnel dédié à l'orientation.
- Optimisation des flux de visiteurs.
- Amélioration de l'expérience utilisateur, ce qui, en contexte commercial, peut entraîner une augmentation des revenus [8].
L'accumulation de ces bénéfices rend le projet rentable à moyen terme.

Maintenance et pérennité:

- Les balises BLE offrent une robustesse notable et nécessitent peu de maintenance [6], [7].
- L'administration via un dashboard centralisé permet de surveiller la durée de vie des piles et d'anticiper leur remplacement à moindre coût.

1.3 Méthodologie et formalisme adopté :

Nous avons utilisé UML (Unified Modeling Language) pour définir et concevoir notre application. Il décrit les exigences en matière de documents et de systèmes ainsi que la conception des architectures logicielles. Mais nous ne présenterons que deux diagrammes, qui sont le diagramme de cas d'utilisation et le diagramme de collaboration.

1.4 Cycle de vie adopté :

Dans le cadre du développement de l'application de géolocalisation intérieure NaviAR, nous avons adopté un modèle en V comme cycle de vie logiciel. Ce choix s'explique par la nécessité d'assurer une traçabilité claire entre les phases de conception et celles de validation, dans un contexte où la fiabilité, la précision et la compatibilité technique sont critiques.

Le modèle en V se distingue par sa structure en deux axes principaux :

- l'axe de spécification et de conception (descendant)
- l'axe de validation et de vérification (ascendant)

Chaque phase de développement est associée à une phase de test correspondante. Cela garantit que chaque exigence définie en amont est rigoureusement vérifiée en aval. Le cycle inclut notamment :

1. **Analyse des besoins** : définition des fonctionnalités principales comme la localisation, l'affichage de la carte, ou la réalité augmentée.
2. **Spécifications fonctionnelles et techniques** : établissement des exigences du système, des capteurs nécessaires (BLE, caméra), et des plateformes ciblées (Android, Web).
3. **Conception technique (architecture logicielle)** : définition des modules (gestion des balises, affichage AR, interface utilisateur).
4. **Implémentation** : développement des composants et intégration dans un framework comme Laravel avec Vue.js.
5. **Tests unitaires et d'intégration** : vérification de chaque module individuellement et en interaction.
6. **Tests de validation** : comparaison du produit final aux exigences initiales.
7. **Déploiement et maintenance** : installation dans l'environnement réel, suivi des performances, mise à jour des données et du logiciel.

1.5 Conclusion du chapitre 01 :

Dans ce chapitre, nous avons posé les fondements du projet en identifiant clairement la problématique et les objectifs visés. À travers l'étude de faisabilité, nous avons confirmé que la solution envisagée est techniquement et économiquement réalisable. L'approche méthodologique, articulée autour du langage UML et du cycle en V, garantit une gestion rigoureuse du projet. Cette base solide nous permettra d'aborder sereinement les phases de conception et d'implémentation décrites dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 02 :

Enjeux et technologies de la localisation indoor

Introduction du chapitre 02 :

Le choix de la localisation géographique s'impose dans le quotidien des utilisateurs lorsqu'il s'agit de se mouvoir, de suivre un colis ou encore d'optimiser un trajet. Grâce au GPS, il est facile de connaître sa position lorsqu'on est à l'extérieur. En revanche, ce moteur est largement contourné lorsque l'on se positionne à l'intérieur d'un bâtiment, là où les murs font passer au deuxième plan les signaux GPS. C'est notamment l'objet de la géolocalisation indoor, qui requiert des techniques appropriées pour situer une personne ou un objet en intérieur.

Ce chapitre traite en première partie des différences entre la localisation extérieure et la localisation intérieure. Dans une deuxième partie, nous traiterons des difficultés spécifiques à la géolocalisation indoor, telles que la mise en place d'une cartographie précise, la nécessité d'un environnement adéquat ou la performance d'une localisation parfaite ; nous évoquerons aussi les différents types de techniques, notamment le Wifi, le Bluetooth, le fingerprint, sans oublier les algorithmes comme le k-nearest neighbors. Enfin, nous mettrons en avant les algorithmes destinés à la localisation indoor pour améliorer la qualité et la précision des systèmes.

2.1 Localisation INDOOR /OUTDOOR :

Nous connaissons tous les technologies de géolocalisation en extérieur comme le suivi par satellite (GPS...), sauf qu'aujourd'hui, les entreprises cherchent des solutions de positionnement intérieur qui fournissent une localisation précise des objets ou des personnes. Mais il est difficile pour les signaux radio émis par les satellites de passer à travers les murs.

Par conséquent, pour répondre à cette demande croissante et à ses exigences particulières, l'industrie du marché de l'Internet des objets industriel (IIoT) tend à offrir des systèmes de positionnement intérieur (IPS : Indoor Positioning System) avec des performances toujours plus élevées. Bon nombre de ces solutions reposent sur des technologies déjà existantes, mais l'ajout de blocs logiciels innovants permet d'offrir des systèmes de positionnement intérieur avec une précision accrue [9].



Figure 1 : IPS vs GPS

2.2 Géolocalisation INDOOR (définition et usage) :

❖ La définition de géolocalisation INDOOR :

La géolocalisation indoor est une technique qui permet de localiser en temps réel les consommateurs ou utilisateurs dans les grands espaces de vente ou de service (centres commerciaux, aéroports, hypermarchés, etc.).

La géolocalisation indoor peut permettre d'orienter le consommateur vers des boutiques en centres commerciaux, vers des rayons, des produits ou des services au sein d'une enseigne, de calculer des temps d'attente ou d'effectuer des études de comportement du consommateur.[10]



Figure 2 : IPS

❖ Usage de géolocalisation INDOOR :

Parmi ceux-ci, on peut citer :

Transports : Permettre à un voyageur de naviguer non seulement en extérieur, mais aussi à l'intérieur d'un lieu de type aéroport, gare ou station de métro.

Universités : L'application peut permettre aux étudiants de trouver des salles, des laboratoires et même le bureau administratif en spécifiant leur emplacement géographique.

Santé : Permettre au personnel de santé de retrouver des patients ou du matériel est un besoin souvent formulé. Concrètement, une application peut permettre la géolocalisation des nourrissons, des personnes souffrant d'Alzheimer ou des appareils spécialisés égarés.

Markéting : Il est possible de personnaliser des offres marketing, non seulement selon les données connues sur le client par la marque (carte de fidélité), mais aussi selon le contexte géographique d'un client en magasin.

Aide À La Navigation : Dans le cas d'une navigation allant de l'outdoor à l'indoor (ex : un client utilisant son application GPS pour se rendre de chez lui à un point d'intérêt précis situé à l'intérieur d'un centre commercial), celle-ci se doit d'être « sans coutures » : le mobile devra immédiatement détecter que l'utilisateur est rentré dans un bâtiment et passer de manière transparente en mode navigation intérieure.

Sites Industriels: Une fois un problème identifié sur un site industriel, une application mobile pourrait permettre de guider l'équipe technique mobile la plus proche vers la source du problème. Ensuite, une fonctionnalité d'aide à la résolution de problème type la réalité augmentée ou la télé-assistance pourrait prendre le relais si besoin. Les besoins ne manquent pas et la recherche d'une solution performante et optimale est une nécessité pour améliorer plusieurs services dans plusieurs domaines. [11].

2.2.1 Enjeux de localisation indoor :

La localisation en intérieur présente plusieurs enjeux techniques et stratégiques qu'il convient d'anticiper pour garantir une implémentation réussie :

1. Précision et fidélité des données :

Contrairement aux environnements extérieurs où le GPS est performant, les bâtiments présentent des obstacles physiques (murs, plafonds, meubles) provoquant des effets de multi-trajets, d'atténuation et de réflexions, réduisant la précision des signaux [12].

2. Robustesse face aux environnements dynamiques :

L'environnement intérieur est instable : les flux humains, les mouvements d'objets ou la modification des infrastructures peuvent impacter les performances de localisation. Il est donc essentiel d'utiliser des technologies adaptatives [13], [15].

3. Choix des technologies:

- Le Bluetooth Low Energy (BLE) est peu coûteux et économe en énergie, avec une précision allant de 2 à 4 mètres, mais une portée limitée (~20 m) [14], [16].

- Le Wi-Fi, déjà disponible dans la plupart des bâtiments publics, repose souvent sur la technique de fingerprinting, sensible aux interférences et nécessitant un long calibrage [14], [17].
- Des solutions hybrides intégrant BLE, UWB, IMU ou encore l'intelligence artificielle sont en plein essor pour améliorer l'efficacité globale [14], [15].
- La réalité augmentée (RA) constitue un outil complémentaire permettant non seulement de visualiser la position d'un utilisateur en temps réel, mais aussi de guider celui-ci dans un espace grâce à des superpositions interactives sur l'écran du smartphone. Combinée à une solution de positionnement indoor, la RA améliore significativement l'expérience utilisateur [12], [15].

4. Contraintes énergétiques et d'infrastructure :

L'utilisation des smartphones comme terminaux impose des limitations en termes d'autonomie énergétique et de compatibilité. Le déploiement de balises BLE ou UWB doit être optimisé pour couvrir efficacement les espaces sans surcoût [14], [16].

5. Confidentialité et sécurité :

Le suivi des déplacements en intérieur soulève des préoccupations liées à la vie privée. Il est indispensable d'implémenter des politiques de collecte de données transparentes, sécurisées et conformes au RGPD [15], [17].

2.2.1.1 Cartographie :

Une carte interactive, visible et compréhensible, est une exigence pour un système de localisation et de navigation performant. Le calcul de positionnement de l'utilisateur, de l'itinéraire et du plus court chemin nécessite des données spatiales correspondant aux structures des bâtiments et à la relation topologique entre ces différents composants.

2.2.1.2 Précision du positionnement :

La précision du positionnement en intérieur est l'un des défis majeurs pour le développement des systèmes de géolocalisation. Contrairement aux systèmes GPS, dont la précision peut atteindre 5 à 10 mètres en extérieur, les environnements clos nécessitent des marges d'erreur beaucoup plus faibles, souvent inférieures à 2 mètres, voire quelques dizaines de centimètres selon les cas d'usage [13].

Plusieurs technologies sont utilisées à cette fin, avec des performances variables :

- **Bluetooth Low Energy (BLE)** : cette technologie est largement répandue en raison de son faible coût et de sa facilité de déploiement. Elle offre une précision typique de 1,5 à 4 mètres, mais reste très sensible aux obstacles physiques et aux interférences [14], [16].
- **Le Wi-Fi fingerprinting** : permet d'atteindre une précision de 3 à 5 mètres en fonction de la densité des points d'accès et de la qualité de la phase de calibration. Toutefois, cette méthode demande un effort conséquent de collecte de données initiale, et elle peut être instable dans des environnements très dynamiques [15].
- **Ultra-Wideband (UWB)** : offre une précision exceptionnelle, allant de 10 à 30 centimètres. Bien que plus coûteuse, cette technologie est idéale pour les applications exigeant un suivi très fin, comme la logistique ou la chirurgie assistée [14], [18].
- **Les capteurs inertiels (IMU)** : combinés avec d'autres technologies via la fusion de capteurs, permettent de compenser les pertes de signal temporaires. Néanmoins, ils souffrent d'une dérive progressive s'ils ne sont pas corrigés périodiquement [15].

L'usage de techniques d'intelligence artificielle, en particulier les algorithmes d'apprentissage automatique, améliore continuellement les performances de localisation en intégrant les caractéristiques environnementales dans le modèle [19]. Cependant, la précision globale reste dépendante de nombreux facteurs : matériaux de construction, disposition des lieux, densité des équipements, et bruit électromagnétique ambiant.

2.2.1.3 Infrastructures :

La mise en œuvre efficace d'un système de localisation indoor repose fortement sur l'infrastructure disponible ou à déployer. Contrairement à la localisation en extérieur qui dépend principalement des satellites GPS, les environnements fermés requièrent un ensemble d'équipements spécifiques pour assurer la couverture, la précision et la stabilité du signal.

Parmi les infrastructures les plus couramment utilisées, on trouve :

- **Les balises BLE (Bluetooth Low Energy)** : elles constituent l'un des choix les plus populaires pour la localisation en intérieur en raison de leur faible coût, de leur autonomie prolongée et de leur facilité d'installation. Il

est estimé qu'une couverture efficace peut être obtenue avec une balise tous les 5 à 10 mètres dans les zones ouvertes [16], [14].

- **Les points d'accès Wi-Fi** : déjà présents dans de nombreux bâtiments tels que les universités, hôpitaux ou centres commerciaux, ils peuvent être réutilisés pour des systèmes de fingerprinting sans nécessiter de déploiement matériel supplémentaire. Cependant, leur couverture est souvent inégale, ce qui peut impacter la qualité du positionnement [14].
- **Les antennes UWB (Ultra-Wideband)** : elles offrent une très haute précision, mais nécessitent une infrastructure dédiée plus coûteuse, avec un positionnement optimal des ancres UWB dans les environnements critiques [18].
- **Les capteurs intégrés aux smartphones (gyroscopes, accéléromètres, magnétomètres)** : ils permettent une localisation relative via la fusion de capteurs, mais doivent être combinés à une infrastructure externe pour corriger les dérives et garantir la fiabilité du positionnement [14], [20].
- **Les plateformes logicielles** : des outils tels que Google Maps Indoor, Mapbox, ou des plateformes open-source comme OpenIndoorMap permettent d'intégrer facilement les données d'infrastructure dans les applications mobiles. En parallèle, les plateformes cloud comme Firebase ou AWS IoT facilitent la gestion des données en temps réel et le suivi des appareils [21].

Le choix de l'infrastructure dépend des objectifs de précision, du budget disponible et de la complexité de l'environnement physique. Une conception hybride combinant plusieurs technologies est souvent privilégiée pour maximiser la robustesse du système.

2.2.2 Technologies et méthodes de géolocalisation indoor :

1. RFID :

Largement utilisée dans la gestion des stocks, la localisation RFID repose sur des étiquettes équipées de puces émettant des signaux radio captés par des lecteurs. En mesurant la force du signal reçu et en utilisant la triangulation, on estime une position approximative en intérieur.

Avantages :

- **Sans ligne de vue** : les puces RFID peuvent être détectées même si elles ne sont pas directement visibles, ce qui les rend adaptées à diverses configurations.

- Lecture multiple : Plusieurs étiquettes peuvent être lues simultanément, ce qui peut être utile pour le suivi de plusieurs objets.
- Longue portée : Les systèmes RFID actifs ont une portée plus longue, ce qui peut être utile pour la surveillance à grande échelle.

Inconvénients :

- Précision limitée : La précision de la localisation est généralement plus faible par rapport à d'autres technologies plus avancées.
- Coût : La mise en place d'un système RFID peut être coûteuse en raison du besoin d'installer des lecteurs.
- Interférences : Les signaux RFID peuvent être perturbés par des obstacles métalliques ou d'autres sources d'interférences.

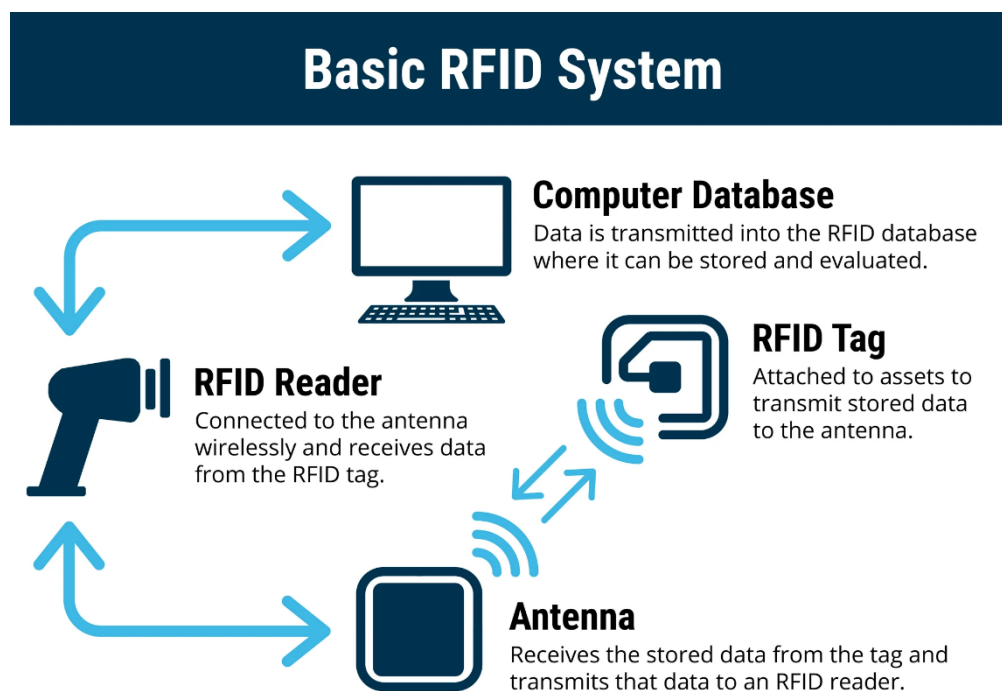


Figure 3 : la base de système RFID

2. Bluetooth :

La localisation indoor par Bluetooth fonctionne avec des balises BLE qui sont placées à des endroits stratégiques du bâtiment. Les appareils équipés de récepteurs BLE peuvent détecter ces balises et estimer leur position en fonction de la puissance du signal reçu.

Avantages :

- Consommation d'énergie réduite : BLE est conçu pour être économe en énergie, ce qui est bénéfique pour les appareils mobiles.
- Précision raisonnable : le Bluetooth offre une précision décente dans la localisation en combinant plusieurs balises.
- Large adoption : De nombreux appareils modernes prennent en charge BLE, ce qui facilite l'adoption de la technologie.

Inconvénients :

- Portée limitée : la portée de cette technologie est assez faible. Elle nécessite donc beaucoup de balises pour couvrir de grandes zones.
- Coût initial : la mise en place d'un réseau de balises BLE peut nécessiter un investissement initial, notamment pour les grandes surfaces.
- Interférences possibles : Comme pour toute technologie sans fil, les interférences peuvent affecter la qualité de la localisation.



Figure 4 : Logo de BLE

3. Wifi :

Cette méthode repose sur la détection des signaux Wifi émis par les points d'accès dans le bâtiment. En mesurant la force du signal reçu à partir de différents points d'accès, on peut trianguler la position approximative de l'appareil.

Avantages :

- Solution précise : En utilisant plusieurs points d'accès Wifi, la triangulation peut offrir une précision accrue dans la localisation.
- Infrastructure existante : La plupart des bâtiments sont déjà équipés de réseaux Wifi, ce qui peut faciliter la mise en place de systèmes de localisation.

- Une portée intéressante : Ces réseaux peuvent couvrir de grandes zones, ce qui est utile pour les espaces spacieux.

Inconvénients :

- Nécessite une couverture dense : Une densité élevée de points d'accès Wifi est nécessaire pour obtenir une localisation précise.
- Sensibilité aux interférences : Cela peut affecter la précision de la localisation indoor mais une couverture plus dense et des technologies bien maîtrisées pallient très bien à cette problématique aujourd'hui.[22]



Figure 5 : Logo de Wi-Fi

4. Le LiDAR (Light Detection And Ranging):

Fait partie de la grande famille des capteurs. Cette technologie permet de mesurer la distance entre un capteur et sa cible (un objet ou une personne) à l'aide de la lumière qu'elle émet, un laser. Si la technologie LiDAR n'est pas encore grandement répandue, elle tend à se développer dans divers secteurs et marchés, notamment celui du véhicule autonome [23]

Avantages et inconvénients de la technologie LiDAR

La technologie LiDAR présente de nombreux avantages, comme l'obtention d'informations sur le terrain dans les zones à végétation très dense. Rappelons que nous ne pouvons pas effectuer de photogrammétrie (technique de mesure qui permet de créer des modèles 3D à partir de photographies. Elle est utilisée pour déterminer la forme, les dimensions et la position d'un objet dans l'espace. En d'autres termes, elle reconstitue géométriquement des objets en trois dimensions à partir d'un ensemble d'images.) standard dans des zones telles que la jungle parce que les cimes et la végétation seront identifiées comme surface du terrain.

Le LiDAR est également un système laser très précis, car il a plus de capteurs de soutien tels que les IMUs (une unité de mesure inertielle ou IMU est un dispositif électronique qui mesure et signale la vitesse, l'orientation et les forces gravitationnelles d'un aéronef, en utilisant une combinaison d'accéléromètres et de gyroscopes). De même, le nuage de points

est généré très rapidement par rapport aux techniques de corrélation photogrammétrique. Nous pouvons dire que nous avons besoin de moins de ressources de post-traitement lorsque nous utilisons la technologie LiDAR.

L'inconvénient le plus notable du LiDAR est le coût élevé de l'équipement, de l'installation et de la mise en service. Bien que ces dernières années, les capteurs LiDAR de qualité topographique soient apparus à des prix très prometteurs. C'est le cas du capteur Livox L1 pour véhicules sans pilote, qui permet de nombreuses avancées dans la capture de données géo spatiales open source à des coûts très abordables [24].

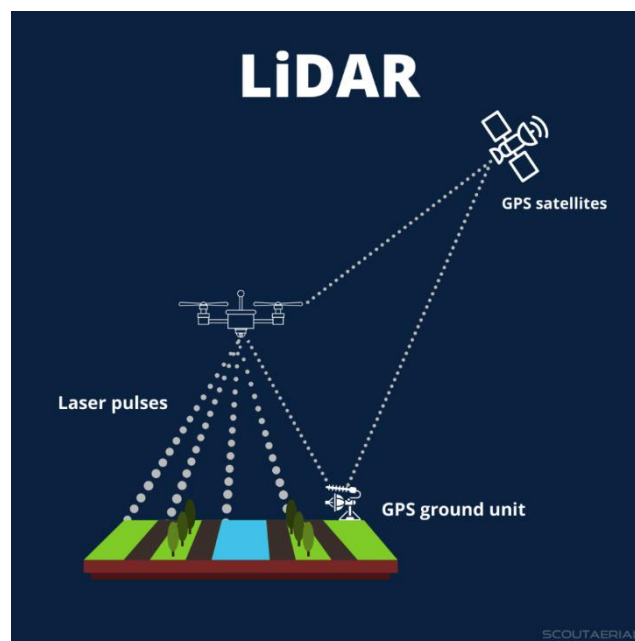


Figure 6: LiDAR

5. UWB:

L'UWB (Ultra Wide Band) est une technologie radio dédiée aux communications à courte portée et à large bande passante (>500 MHz) avec une très large densité spectrale (puissance maximale de $-41,3$ dBm/MHz) sur l'ensemble des fréquences.

Elle offre une couche physique alternative pour les réseaux personnels ou corporels qui fonctionne principalement dans la bande comprise entre 3,1 et 10,6 GHz, moins encombrée que la bande ISM (industrielle, scientifique et médicale).

Alors que d'autres technologies radio divisent la bande passante disponible en morceaux plus petits (en faveur d'un débit de données plus élevé) ou en utilisant plusieurs canaux de données en même temps, l'UWB consacre toute la bande

passante disponible à la transmission d'impulsions d'ondes radio très courtes (< 2 ns, environ 500 millions par seconde).

Avantages

L'utilisation d'impulsions courtes rend l'UWB quasi insensible aux évanouissements (fading) dus aux trajets multiples. Cette technique permet également un débit de données très élevé pour les appareils de communication, ou encore une haute précision pour les appareils de localisation et d'imagerie [26].

Inconvénients :

En dépit de son potentiel pour offrir une meilleure qualité audio, sa portée est limitée par rapport au Bluetooth, et son adoption nécessite que les appareils sources (smartphones, tablettes, etc.) soient compatibles avec cette technologie [10].

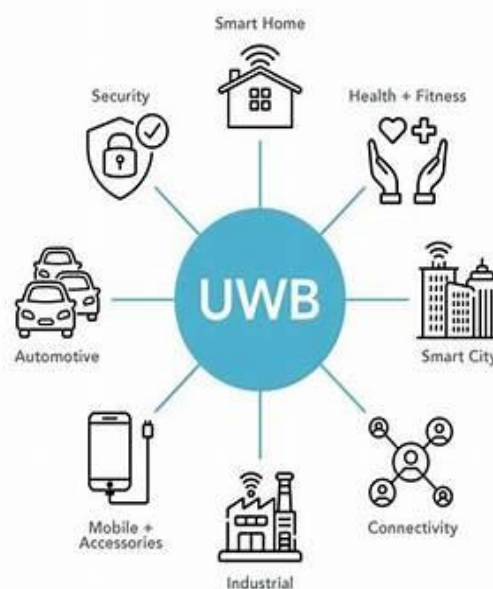


Figure 7: UWB

❖ Méthodes géométriques :

Elles utilisent les théorèmes géométriques sur les relations dans les triangles en particulier, nous citons :

1. La trilatération :

La trilatération consiste à utiliser uniquement les distances pour localiser l'objet cherché. Ce principe utilise le plus souvent le système de signal radio. Il se base sur la connaissance de la vitesse de propagation de l'onde. Les points

autour de celui que l'on cherche à connaître émettent une onde, à partir de ce moment, un chronomètre se déclenche. Lorsque l'objet inconnu reçoit l'onde, il la renvoie vers son émetteur. Quand celui-là la capte, il stoppe le chronomètre. Le calcul devient alors simple (en théorie) :

$$v = \frac{d}{t} \Leftrightarrow d = v * t$$

Où :

v : la vitesse, **d** : la distance, **t** : le temps.

Or c'est un aller-retour que l'onde fait, il suffit donc de diviser la distance obtenue et nous obtenons la distance entre le point inconnu et l'émetteur. Une fois les distances connues, il suffit de tracer des cercles de centres des points connus et de rayons qui sont égaux à la distance propre de chaque point à l'objet inconnu. Le point d'intersection de ces cercles indique l'endroit où se situe le point recherché (cible x).

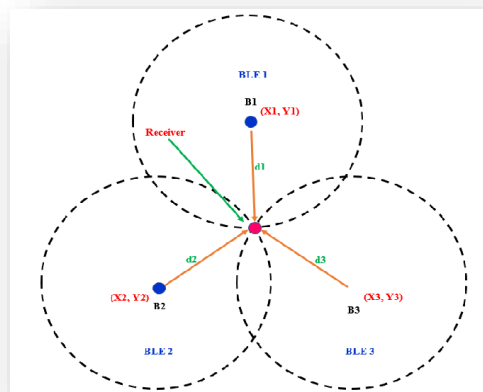


Figure 8: Trilatération technique

2. La triangulation :

Dans cette méthode, deux Points de Référence de coordonnées connues forment avec l'Objet Mobile (OM) un triangle. On utilise ensuite les propriétés géométriques des triangles pour calculer la position de l'Objet Mobile (OM) : la loi des sinus, le théorème de Pythagore, ...etc. Cette méthode utilise donc moins de Points de Référence (PR) que la méthode de trilatération mais nécessite la connaissance de plus d'informations liant les trois nœuds. Il est nécessaire de connaître les angles du triangle formé par les trois nœuds et la distance entre les points de référence.

Pour illustrer cette technique, basons-nous sur un exemple concret.

Soit un triangle ABC. Le point que nous cherchons est le point B. Nous connaissons AC, ainsi que les angles \hat{a} et \hat{c} .

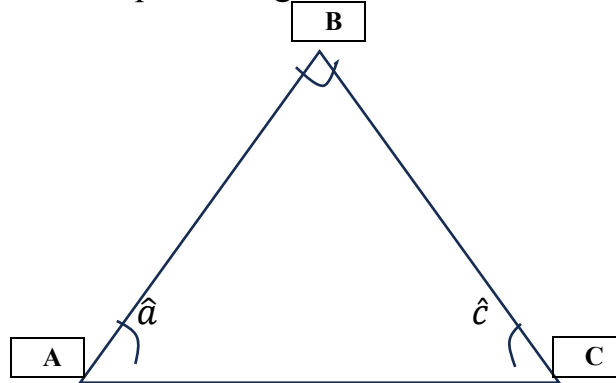


Figure 9: triangulation technique

L'angle peut être calculé, sachant que la somme des angles d'un triangle est égale à 180° , il suffit de faire $180-(a+c)$.

Ensuite, on utilise la loi des sinus:

$$\frac{AC}{\sin b} = \frac{AB}{\sin c} = \frac{BC}{\sin a}$$

Ainsi, grâce à deux produits en croix, nous connaissons les distances AB et BC.

Cette technique est utilisée surtout en télémétrie optique, notamment dans le domaine militaire, en l'absence de radars, à l'aide de télémètre. Elle permet d'évaluer des distances importantes, mais nécessite pour cela une distance assez grande entre les deux télémètres pour obtenir une précision accrue de la mesure des angles [26].

2.2.3 Géolocalisation hybride :

La géolocalisation hybride désigne l'utilisation combinée de plusieurs technologies de localisation afin d'exploiter les avantages de chacune et de pallier leurs limites individuelles. Cette approche est de plus en plus adoptée dans les environnements intérieurs complexes où la précision et la continuité du signal sont cruciales.

Par exemple, la combinaison de **Bluetooth Low Energy (BLE)** avec le **Wi-Fi fingerprinting** et les **capteurs inertiels (IMU)** permet de maintenir une localisation relativement précise même en cas de perturbation ou de perte temporaire de signal. Le **filtrage de Kalman** est souvent utilisé pour fusionner

ces différentes sources de données et améliorer la stabilité du positionnement [27], [14].

D'autres systèmes hybrides intègrent **Ultra-Wideband (UWB)** en complément du BLE. Le BLE est utilisé de façon continue pour son faible coût énergétique, tandis que l'UWB, bien plus précis, est activé périodiquement pour recalibrer la position estimée via un filtre de Kalman [28].

En environnement dense, une méthode hybride BLE/Wi-Fi a permis d'atteindre une précision moyenne de 1,21 mètre, grâce à l'optimisation des algorithmes de traitement et de fusion des signaux [27].

Par ailleurs, les **frameworks modernes** comme **ARCore** (Google) et **AR.js** permettent d'intégrer la **réalité augmentée** aux systèmes de géolocalisation, en superposant des éléments visuels interactifs sur l'environnement réel, ce qui améliore l'expérience utilisateur en guidage intérieur [29].

En somme, la géolocalisation hybride représente une solution technologique robuste, offrant à la fois précision, couverture et résilience, tout en restant économiquement viable dans de nombreux cas d'usage.

2.2.3.1 Standard Wifi et localisation indoor :

Ces dernières années, les systèmes de positionnement Wifi (WPS) ont trouvé de plus en plus d'applications dans de nombreux domaines. Ils sont utilisés non seulement à l'extérieur, mais aussi à l'intérieur des bâtiments où la navigation GPS ne peut pas fonctionner correctement en raison du blocage du signal, de la multiplicité des chemins et d'autres raisons. Le Wifi permet de localiser les objets et les personnes, ce qui aide à optimiser les processus commerciaux et à augmenter les bénéfices de l'entreprise.

Comment fonctionne le positionnement Indoor Wifi : méthodes techniques expliquées ?

Le système de positionnement intérieur sans fil fonctionne en définissant des coordonnées à l'aide de points d'accès Wifi qui transmettent des données spécifiques. En utilisant le RSSI (indicateur de force du signal reçu) et l'adresse MAC, le système peut définir l'emplacement actuel de l'appareil de l'utilisateur à l'aide de l'approche multilatération.

La précision des systèmes de positionnement intérieur utilisant le Wifi dépend du nombre de points d'accès, de la topologie du bâtiment et du type de

smartphone. Les smartphones modernes basés sur Android peuvent fournir un positionnement intérieur aussi précis que 2-3 m dans des conditions topologiques optimales.

Le système de localisation Wifi utilise toute l'infrastructure Wifi, qui comprend non seulement les routeurs Wifi, mais aussi les téléphones et les tablettes. En utilisant des points d'accès Wifi, le système peut facilement définir l'emplacement de tous les appareils alimentés par Wifi et surveiller leur mouvement à l'intérieur du bâtiment.

Les systèmes de positionnement intérieur (IPS) basés sur le Wifi utilisent plusieurs techniques de traitement du signal pour localiser des appareils dans des environnements intérieurs, et les plus importants sont :

- Indicateur de force du signal reçu (RSSI) : Cette méthode calcule les distances entre le dispositif et les points d'accès en fonction de la force du signal reçu. Une option économique avec un large support, il souffre en précision en raison de l'interférence et des facteurs environnementaux.
- Empreintes digitales : la plus précise des méthodes de positionnement Wifi. Le fingerprinting recueille des données sur les caractéristiques du signal (valeurs RSSI de plusieurs points d'accès) à des points de référence connus pendant une phase d'étalonnage. Ces mesures remplissent la base de données pour l'appariement futur des données en temps réel du signal pour le positionnement.
- Heure de vol (ToF) et temps de trajet aller-retour (RTT) : des systèmes plus avancés mesurent le temps nécessaire pour que les signaux Wifi se déplacent du dispositif au point d'accès et vice versa. Wifi RTT (dans le cadre du protocole IEEE 802.11mc) permet des mesures de distance très précises – souvent à une distance de 1 à 2 mètres – sans dépendre de la force du signal, ce qui en fait un outil idéal pour les applications exigeant de la précision. [30]

2.2.3.2 Technique de fingerprinting :

Le fingerprinting permet de créer une empreinte digitale unique pour chaque internaute. Il s'agit d'une technique très utile pour le marketing, le cyber sécurité ou encore la prévention de la fraude, mais elle soulève aussi des risques pour la confidentialité. Découvrez tout ce qu'il faut savoir !

À l'ère du numérique, la collecte et l'analyse de données personnelles occupent désormais une place centrale dans de nombreux domaines. C'est aussi bien le cas pour la publicité ciblée que pour la sécurité informatique.

Parmi les différentes techniques permettant de suivre et d'identifier les utilisateurs, l'une d'elles permet de créer une empreinte digitale unique à partir d'un ensemble d'informations issues de la configuration matérielle, logicielle et comportementale d'un individu en ligne : le fingerprinting.

Alors que les méthodes traditionnelles telles que les cookies deviennent de moins en moins fiables face aux dispositifs de blocage et aux préoccupations croissantes en matière de confidentialité, cette technique innovante s'impose comme une solide alternative.

Néanmoins, le fingerprinting suscite la controverse en raison de ses enjeux sur le plan éthique et réglementaire. Elle interroge le juste équilibre entre innovation technologique et protection de la vie privée...

Les différentes méthodes de fingerprinting :

Il existe plusieurs techniques de fingerprinting, chacune exploitant différents types de données pour constituer l'empreinte numérique d'un utilisateur.

Le Browser Fingerprinting consiste à recueillir un ensemble de paramètres directement depuis le navigateur web. Parmi les informations collectées, on retrouve les versions de logiciels, les configurations de langue, les paramètres d'affichage, ainsi que les extensions et plugins installés.

Cette approche est particulièrement prisée pour le suivi en ligne, car elle permet de contourner les limites imposées par le blocage des cookies.

Au-delà du navigateur, le Device Fingerprinting exploite les caractéristiques techniques de l'appareil utilisé (ordinateur, smartphone, tablette...).

Cela inclut des données sur le matériel (modèle, résolutions, capteurs) et le logiciel (système d'exploitation, configurations spécifiques). Cette méthode permet d'identifier l'appareil de manière plus globale, ce qui est utile pour la détection de fraudes ou pour renforcer la sécurité des transactions en ligne.

De son côté, le Canvas Fingerprinting utilise la manière dont le navigateur rend des images ou du texte via l'élément HTML5 canvas, pour générer une signature basée sur les particularités de l'affichage.

L'Audio Fingerprinting exploite quant à lui la manière dont les systèmes traitent le son, en analysant de légères variations dans la sortie audio pour établir une empreinte unique.

Ces méthodes sont particulièrement subtiles, car elles s'appuient sur des opérations normalement invisibles à l'utilisateur [31].

2.2.3.3 Méthode de k-nearest point :

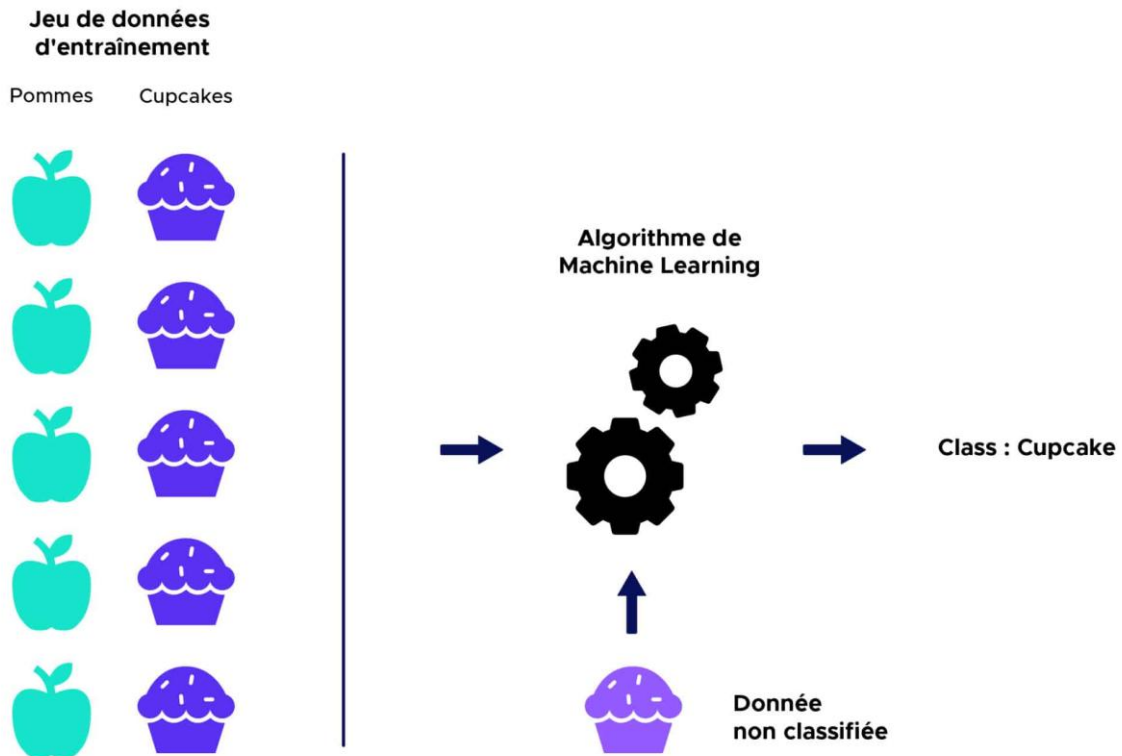
L'algorithme des **k** plus proches voisins ou K-nearest neighbors (kNN) est un algorithme de Machine Learning qui appartient à la classe des algorithmes d'apprentissage supervisé simple et facile à mettre en œuvre qui peut être utilisé pour résoudre les problèmes de classification et de régression.

KNN : Définition :

Avant de nous concentrer sur l'**algorithme KNN**, il est nécessaire de reprendre les bases. Qu'est-ce qu'un algorithme d'apprentissage supervisé ?

En [apprentissage supervisé](#), un algorithme reçoit un ensemble de données qui est étiqueté avec des valeurs de sorties correspondantes sur lequel il va pouvoir s'entraîner et définir un modèle de prédiction. Cet algorithme pourra par la suite être utilisé sur de nouvelles données afin de prédire leurs valeurs de sorties correspondantes.

Voici une illustration simplifiée :



L'intuition derrière l'**algorithme des K** plus proches voisins est l'une des plus simples de tous les algorithmes de Machine Learning supervisé :

- **Étape 1** : Sélectionnez le nombre K de voisins
- **Étape 2** : Calculez la distance

$$\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

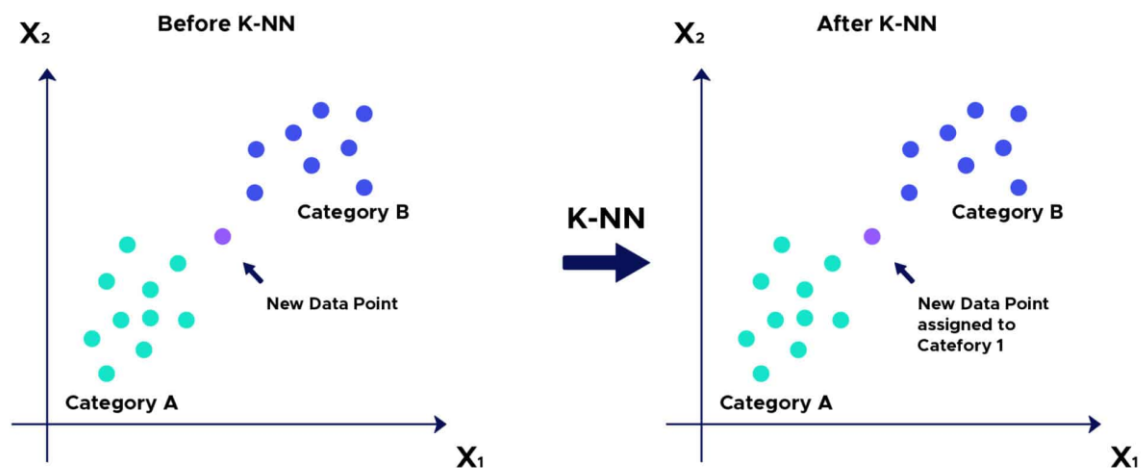
Manhattan

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Euclidienne

Du point non classifié aux autres points.

- **Étape 3** : Prenez les K voisins les plus proches selon la distance calculée.
- **Étape 4** : Parmi ces K voisins, comptez le nombre de points appartenant à chaque catégorie.
- **Étape 5** : Attribuez le nouveau point à la catégorie la plus présente parmi ces K voisins.
- **Étape 6** : Notre modèle est prêt :

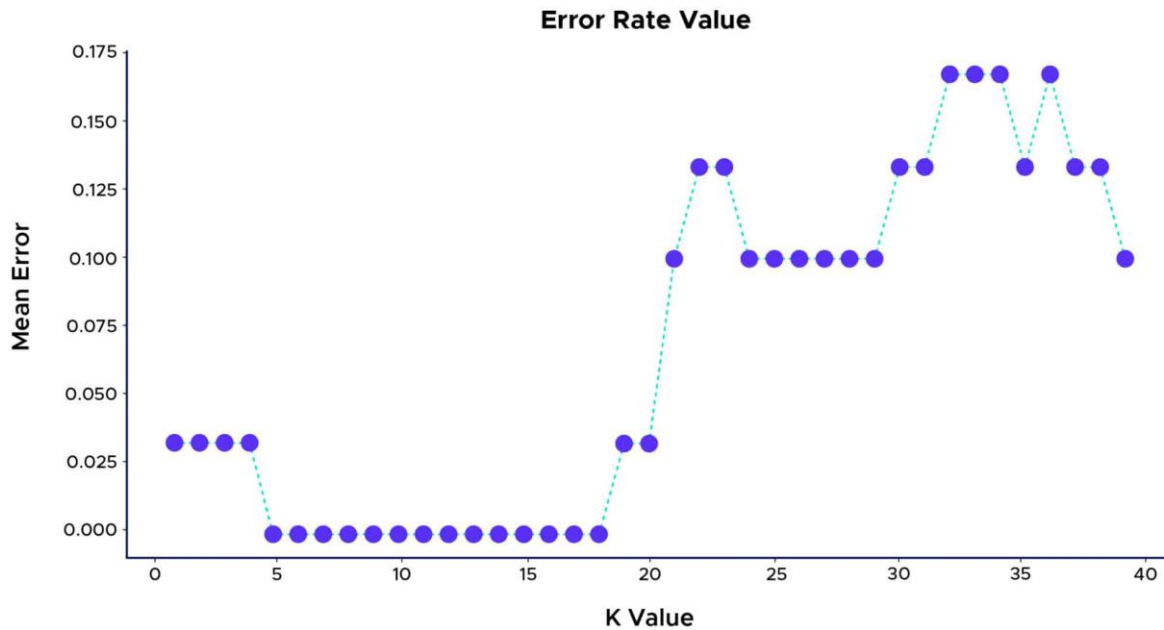


KNN : Exemple d'utilisation :

Nous pouvons à présent nous intéresser à un exemple d'utilisation de l'algorithme des K plus proches voisins. Grâce à la librairie [Scikit-Learn](https://scikit-learn.org/), nous pouvons importer la fonction `KNeighborsClassifier` que nous utiliserons sur le jeu de donnée IRIS.

	Sepal-length	Sepal-width	Petal-length	Petal-width	Class
0	5.1	3.5	1.4	0.2	Iris-setosa
1	4.9	3.0	1.4	0.2	Iris-setosa
2	4.7	3.2	1.3	0.2	Iris-setosa
3	4.6	3.1	1.5	0.2	Iris-setosa
4	5.0	3.6	1.4	0.2	Iris-setosa

Grâce à l'algorithme KNN, nous obtenons un excellent taux de bonne classification des plantes proches des 100%. On peut également s'intéresser à un moyen de choisir le K pour lequel la classification sera la meilleure. Une façon de le trouver consiste à tracer le graphique de la valeur K et le taux d'erreur correspondant pour l'ensemble de données :



Ainsi, nous pouvons voir que le meilleur taux de prédiction est obtenu pour un K entre 5 et 18. Au-dessus de cette valeur, on peut observer un phénomène nommé « Overfitting » ou Sur apprentissage en Français qui se produit lorsque les données d'apprentissage utilisées pour construire un modèle expliquent très voire « trop » bien les données mais ne parviennent pas à faire des prédictions utiles pour de nouvelles données.

Quelques applications :

- Il peut être utilisé dans des technologies comme l'OCR (Optical Character Recognizer), qui tente de détecter l'écriture manuscrite, les images et même les vidéos.
- Il peut être utilisé dans le domaine des notations de crédit. Il essaie de faire correspondre les caractéristiques d'un individu avec le groupe de personnes existantes afin de lui attribuer la cote de crédit. Il se verra attribuer la même note que celle accordée aux personnes correspondant à ses caractéristiques.
- Il est utilisé pour prédire si la banque doit accorder un prêt à un particulier. Il tentera d'évaluer si l'individu donné correspond aux critères des personnes qui avaient précédemment fait défaut ou ne fera pas défaut à son prêt.

Avantages :

- L'algorithme est simple et facile à mettre en œuvre. Il n'est pas nécessaire de créer un modèle, de régler plusieurs paramètres ou de formuler des hypothèses supplémentaires.
- L'algorithme est polyvalent. Il peut être utilisé pour la classification ou la régression.

Inconvénients :

- L'algorithme devient beaucoup plus lent à mesure que le nombre d'observation et de variables indépendantes augmente.

Étant l'un des algorithmes les plus simples de Machine Learning, il est hautement implémenté pour développer des systèmes basés sur l'apprentissage, intuitifs et intelligents qui pourraient effectuer et prendre de petites décisions tout seuls.

Cela rend les choses encore plus pratiques pour l'apprentissage et le développement et aide presque tous les types d'industries qui pourraient utiliser des systèmes, des solutions ou des services intelligents [32].

2.2.4 Algorithmes pour la géolocalisation indoor :

Les algorithmes sont au cœur des systèmes de localisation en intérieur. Leur rôle est de convertir les signaux ambigus et bruités (Wi-Fi, BLE, UWB, etc.) en estimations fiables de position. Plusieurs types d'algorithmes sont utilisés selon la technologie choisie et l'environnement d'usage.

1. Algorithmes de filtrage (Filtrage de Kalman) :

Le filtrage de Kalman est un algorithme récursif utilisé pour estimer la position à partir de données bruitées en tenant compte de l'évolution dynamique du système. Il est très utilisé dans les systèmes de localisation fusionnant les signaux RSSI (Wi-Fi ou BLE) et les données des capteurs inertiels (IMU) pour obtenir une localisation en temps réel plus stable [33]. Par exemple, une étude montre que la fusion BLE + IMU via Kalman permet de suivre précisément un utilisateur en mouvement dans un musée ou une usine [34].

2. Algorithmes d'apprentissage automatique (Machine Learning) :

Les algorithmes comme le k-Nearest Neighbors (k-NN) ou le Support Vector Machine (SVM) sont largement utilisés dans les méthodes de Wi-Fi fingerprinting. Ces approches permettent de classifier une position en fonction d'une base de données de signaux RSSI préalablement enregistrés [35]. Bien que

puissants, ces modèles exigent une phase de collecte de données conséquente et une mise à jour fréquente pour maintenir la précision [36].

3. Algorithmes de graphes (Dijkstra, A)* :

Lorsque le plan du bâtiment est disponible, les algorithmes de plus court chemin comme **Dijkstra** ou **A*** sont utilisés pour guider les utilisateurs d'un point à un autre. L'algorithme de Dijkstra calcule tous les chemins les plus courts depuis une position initiale, tandis que **A*** améliore la performance en intégrant une heuristique (comme la distance euclidienne) pour atteindre un objectif plus rapidement [37]. Ces algorithmes sont utilisés dans les applications de navigation indoor, notamment dans les aéroports, hôpitaux ou centres commerciaux [38].

4. Algorithmes de fusion de capteurs :

Les systèmes modernes de localisation indoor reposent souvent sur la fusion de plusieurs capteurs (BLE, IMU, Wi-Fi) pour compenser les faiblesses individuelles de chaque technologie. Des méthodes comme le filtre à particules (Particle Filter) sont utilisées pour représenter plusieurs hypothèses de position et les ajuster en temps réel selon les mesures entrantes [39]. D'autres approches incluent le filtre complémentaire, qui combine des signaux rapides (IMU) et stables (Wi-Fi) pour un compromis entre précision et réactivité [40].

5. Deep Learning (Réseaux de neurones convolutifs – CNN) :

Les techniques d'apprentissage profond, notamment les Convolutional Neural Networks (CNN), sont de plus en plus utilisées pour modéliser les variations complexes des signaux radio en intérieur, en particulier ceux issus des Channel State Information (CSI) du Wi-Fi. Ces modèles permettent une localisation dynamique, sans recalibrage fréquent, avec une précision pouvant atteindre 50 cm dans certains environnements [41]. Toutefois, leur déploiement est limité par le besoin de grandes quantités de données et de ressources de calcul [42].

CHAPITRE 3 :

Spécifications UML

3.1 Acteurs du système :

Utilisateur : La personne qui utilise l'application pour déterminer son emplacement dans la structure fermée.

Système : C'est une application mobile qui collecte, analyse et détermine l'emplacement en fonction du statut de l'utilisateur.

Administrateur : Est le chef d'un bâtiment public, université, centre commercial, entreprise, aéroport, hôpital... qui veut suivre les visiteurs, les localiser en utilisant notre application.

3.2 Spécification des besoins :

3.2.1 Besoins fonctionnels :

Les besoins fonctionnels doivent répondre aux exigences du futur système en termes de fonctionnalités. Ils constituent une sorte de promesse ou de contrat au comportement du système généré. De ce fait, la solution proposée doit répondre aux besoins fonctionnels suivants :

BF1 : Afficher une carte du bâtiment claire et facile à lire par un utilisateur.

BF2 : Permettre de positionner l'utilisateur par rapport au plan du bâtiment

BF3 : Permettre à l'utilisateur de chercher une destination et de naviguer en représentant le chemin optimal pour lui y arriver.

BF4 : Autoriser et annuler la carte : permet de reprendre la mise à jour automatique de la position.

BF5 : Permettre d'afficher les informations en cliquant sur les lieux du bâtiment visité : mon historique.

BF6 : Permettre à l'utilisateur d'évaluer la précision de positionnement.

BF7 : Permettre à l'utilisateur d'enrichir la base de données relative au plan du centre par des notifications de précision (évaluation, commentaires...).

BF8 : Permettre à l'administrateur de mettre en place la plateforme, de la maintenir et de consulter les statistiques des utilisateurs et ses avis sur l'application [10].

3.2.2 Besoins non fonctionnels :

Les besoins non fonctionnels peuvent être considérés comme des besoins fonctionnels spéciaux. Parfois, ils ne sont pas rattachés à un cas d'utilisation particulier, mais ils caractérisent tout le système (l'architecture, la sécurité, le

temps de réponse, etc.). Le système doit garantir les besoins opérationnels suivants :

1. Besoins matériels :

Le système doit s'exécuter de la même façon sur les différentes catégories de smartphones Android disponibles sur le marché.

2. Besoins de déploiement :

Le système doit :

- Assurer la facilité de la mise en place et du déploiement de l'application de localisation indoor.

3. Besoins de performance :

Le système devra répondre rapidement au besoin de l'utilisateur :

- Délai d'acquisition de la première position au lancement de l'application : < 5 secondes.
- Taux de rafraîchissement de la position : jusqu'à une fois par seconde. Pas de latence, rafraîchissement de la position en temps réel.

4. Précision :

La précision du système doit être bornée entre 2 et 3 mètres.

5. Besoins de disponibilité/fiabilité :

Le système doit :

- être disponible pour les utilisateurs lorsqu'ils le demandent, donc une utilisation 24/24 heures, 7/7.

6. Besoins de robustesse :

Le système doit

- être capable de s'adapter aux changements de l'environnement et à la nature de l'indoor (obstacles, murs, mobilités des acteurs, lumières, etc.).

7. Besoins de maintenance :

Le système doit être facile à installer et à maintenir.

8. Besoins de flexibilité :

Le système doit être souple pour une extension future.

9. L'ergonomie des interfaces :

Le module doit présenter une interface claire, ergonomique et intuitive.

3.3 Analyse des besoins :

Dans cette section, nous allons expliquer plus en détail les besoins identifiés auparavant en utilisant des diagrammes de cas d'utilisation. Ensuite, nous proposons des diagrammes de collaboration pour améliorer la compréhension du fonctionnement général de l'application.

3.3.1 Diagramme de cas d'utilisation principal :

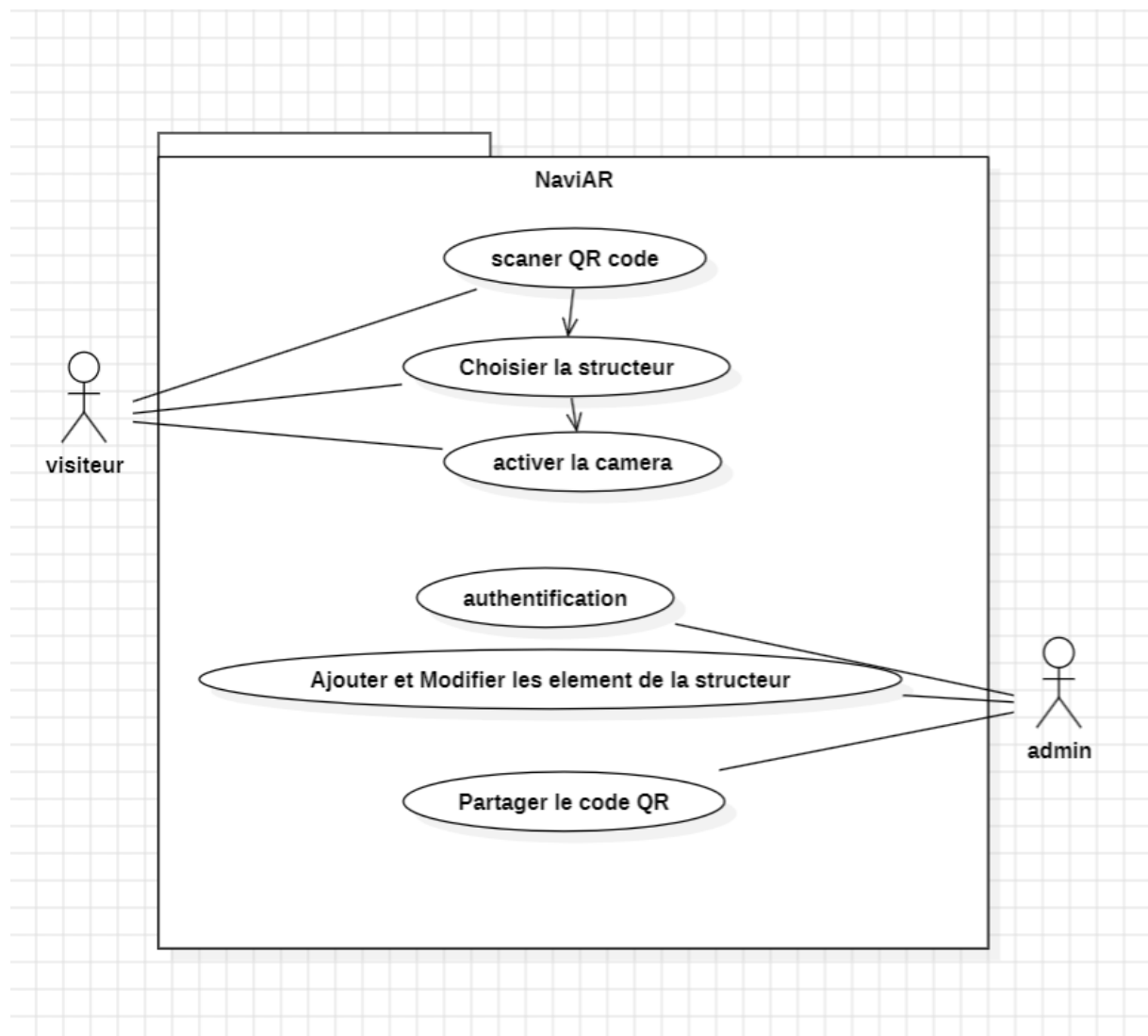


Figure 10 : Diagramme de Cas d'utilisation

3.3.2 Description de cas d'utilisation : prendre des mesures :

Dans ce scénario, l'utilisateur active la caméra AR. L'application mesure la position de l'utilisateur à l'aide du GPS et/ou de la vision par caméra, détecte les obstacles ou points de repère visuels, puis utilise ces mesures pour ajuster la navigation en temps réel.

3.3.3 Description de cas d'utilisation : localiser :

Ici, l'utilisateur ouvre l'application et permet l'accès à sa localisation. Le système détecte automatiquement sa position dans le bâtiment ou à l'entrée, puis affiche cette position sur une carte ou dans la vue AR avec précision.

3.3.4 Diagramme de collaboration : synchroniser :

Dans cette partie Ce illustre les échanges entre l'utilisateur, l'application mobile, le serveur, et la base de données. Lors de la synchronisation, les informations comme la position actuelle, le plan de l'étage, et le chemin calculé sont mises à jour. Le moteur de calcul sur le serveur applique l'algorithme de Dijkstra pour générer le trajet optimal, et renvoie les résultats à l'utilisateur de manière fluide.

CHAPITRE 04 :

Conception et réalisation de l'application

4.1 Conception :

4.1.1 Architecture globale de la solution :

L'application doit guider les utilisateurs à l'intérieur et à l'extérieur des structures publiques ou privées.

Il est basé sur une architecture hybride avec géolocalisation GPS pour les espaces extérieurs et la lecture du code QR pour les intérieurs, AR.J.

4.1.2 Conception de base de données :

Le modèle de données est basé sur plusieurs entités.

Structure : représente une structure (bâtiment, université, hôpital, etc.).

Unité : une partie de la structure, comme un département ou une salle.

Attribut : emplacement-ID, unité-ID, niveau.

Localisation : affiche la localisation spécifique sur l'appareil.

Attribut : Structure -id , unité -id, niveau -id

Chemin : chemin spécifique entre deux emplacements.

Attribut : emplacement d'identification, emplacement d'identification

Parcours (non conçu comme une entité dans une base de données) : représente de nombreux chemins entre deux points calculés dynamiquement via l'algorithme Dijkstra.

4.2 Choix technique :

4.2.1 Choix du langage de programmation :

Pour le développement de l'application, plusieurs langages et frameworks ont été utilisés selon les besoins spécifiques de chaque composant :

- **PHP avec Laravel** : Utilisés pour la partie backend de l'application. Laravel, un framework PHP moderne, a permis de structurer l'application serveur de manière efficace en offrant une architecture MVC, une gestion facilitée des routes, des contrôleurs et des bases de données via Eloquent ORM.
- **JavaScript** : Langage principal pour le développement de la partie frontend, notamment pour la gestion des interactions, de l'interface utilisateur et des fonctionnalités liées à la réalité augmentée avec AR.js.

- **HTML5/CSS3** : Utilisés pour la structuration et la mise en forme des pages Web, garantissant une interface responsive compatible avec les navigateurs mobiles.
- **Node.js** : Utilisé pour certains scripts, ainsi que pour l'installation et la gestion des dépendances via NPM.
- **JSON** : Format de données utilisé pour l'échange d'informations entre le frontend et le backend, notamment pour les itinéraires, la configuration des points d'intérêt, et les métadonnées liées à la réalité augmentée.

4.2.2 Choix de l'architecture d'application :

L'application repose sur une architecture client-serveur combinée à une approche Web-based :

- **Frontend** : Une application Web accessible via navigateur, exploitant les capacités WebXR pour la réalité augmentée. Elle communique avec les services backend pour récupérer les informations géographiques et les itinéraires.
- **Backend** : Un serveur basé sur Node.js, qui traite les requêtes de l'utilisateur, fournit les données des sites, départements, itinéraires, et génère les QR codes nécessaires à la navigation en intérieur.
- **Architecture modulaire** : Le code est organisé en modules selon les fonctionnalités (cartographie, AR, QR code, gestion des données), ce qui facilite la maintenance et l'évolutivité.

4.2.3 Environnement de travail :

4.2.3.1 Environnement matériel :

Le développement et les tests de l'application ont été réalisés sur plusieurs appareils afin de garantir sa compatibilité et sa performance. Le poste principal utilisé est un ordinateur portable **ASUS VivoBook X415EA**, équipé d'un processeur Intel Core i5-1135G7 (11e génération) cadencé à 2.40 GHz, de 8 Go de RAM, et fonctionnant sous Windows 11 Home 64 bits avec DirectX 12.

Un ordinateur portable **HP EliteBook 845 G7** afin de garantir sa compatibilité et ses performances. Cet appareil est équipé d'un processeur AMD Ryzen 7 PRO 4750U avec carte graphique intégrée Radeon Graphics (16 cœurs logiques) cadencé à environ 1,7 GHz, de 16 Go de mémoire RAM, et fonctionne sous Windows 11 Pro 64 bits (version 10.0, build 26100) avec DirectX 12.

Par ailleurs, plusieurs smartphones Android ont servi à tester la partie mobile de l'application, notamment l'affichage des itinéraires, la réalité augmentée (AR.js), et la lecture des QR codes. Ces tests ont été réalisés sur différents modèles, dont le **Samsung F13** et le **Redmi 9A**. Ces téléphones sont dotés d'appareils photo fonctionnels, de capteurs de position, et d'une compatibilité avec les technologies WebXR et AR via les navigateurs récents.

4.2.3.2 Environnement logiciel :

Les principaux outils logiciels utilisés comprennent :

- **Visual Studio Code** : Environnement de développement principal, léger et extensible, adapté au développement web et backend.
- **Node.js et NPM** : Pour le développement côté serveur, l'exécution de scripts JavaScript, et la gestion des dépendances.
- **Microsoft Edge** : Navigateur utilisé pour tester la compatibilité avec les technologies WebXR et pour l'affichage des fonctionnalités de réalité augmentée.
- **Laravel (PHP)** : Framework backend utilisé pour structurer l'application serveur, gérer les routes, les contrôleurs, et les bases de données.
- **Bibliothèques** :
 - **AR.js** : Pour intégrer des éléments de réalité augmentée dans l'application Web.
 - **Google Maps API** : Pour l'affichage des cartes, la géolocalisation et le calcul des itinéraires.
 - **qrcode.js** : Pour la génération et la lecture de QR codes, utiles pour la navigation intérieure.

4.2.3.3 Choix des outils de travail :

Dans le cadre du projet, plusieurs outils ont été sélectionnés pour faciliter la gestion, le développement et la validation des applications.

Les principaux outils utilisés sont:

GitHub: utilisé pour le codage source, la surveillance des versions, la coopération et l'hébergement de dépôt.

StarUML : Permet la modélisation et la création de diagrammes UML (cas d'utilisation, classes, séquences, etc.), facilitant la conception et la documentation du système.

Postman : Outil utilisé pour tester les API REST, effectuer des requêtes HTTP et valider les réponses du serveur.

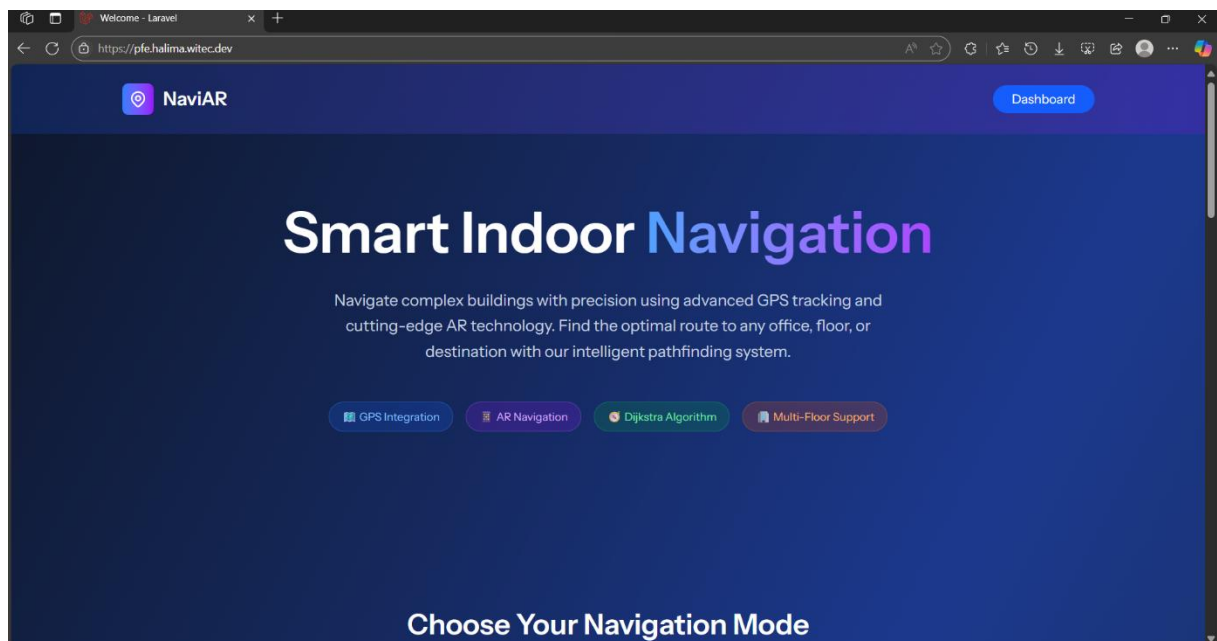
4.3 Travail réalisé.

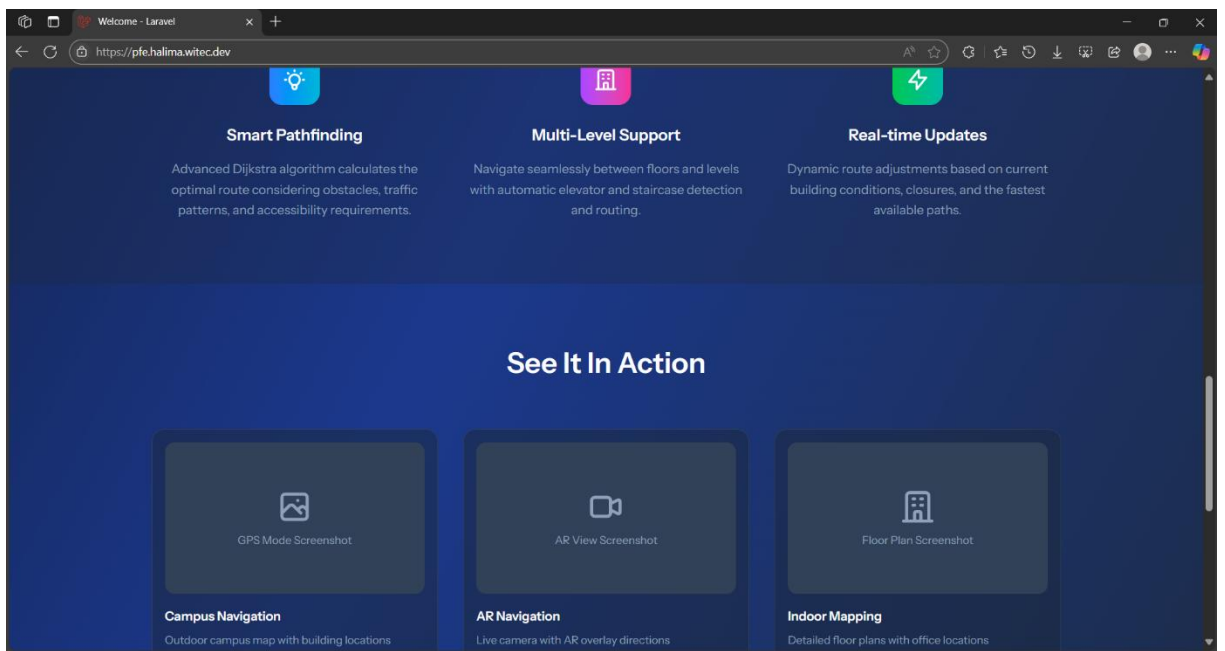
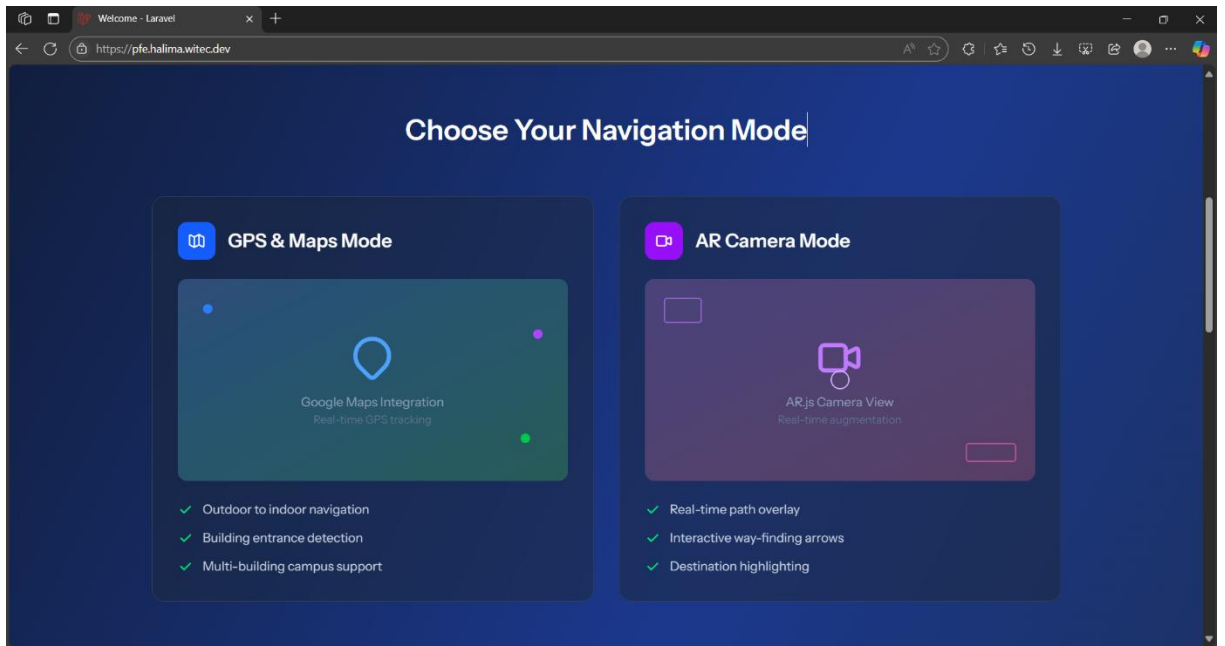
Partie extérieure :

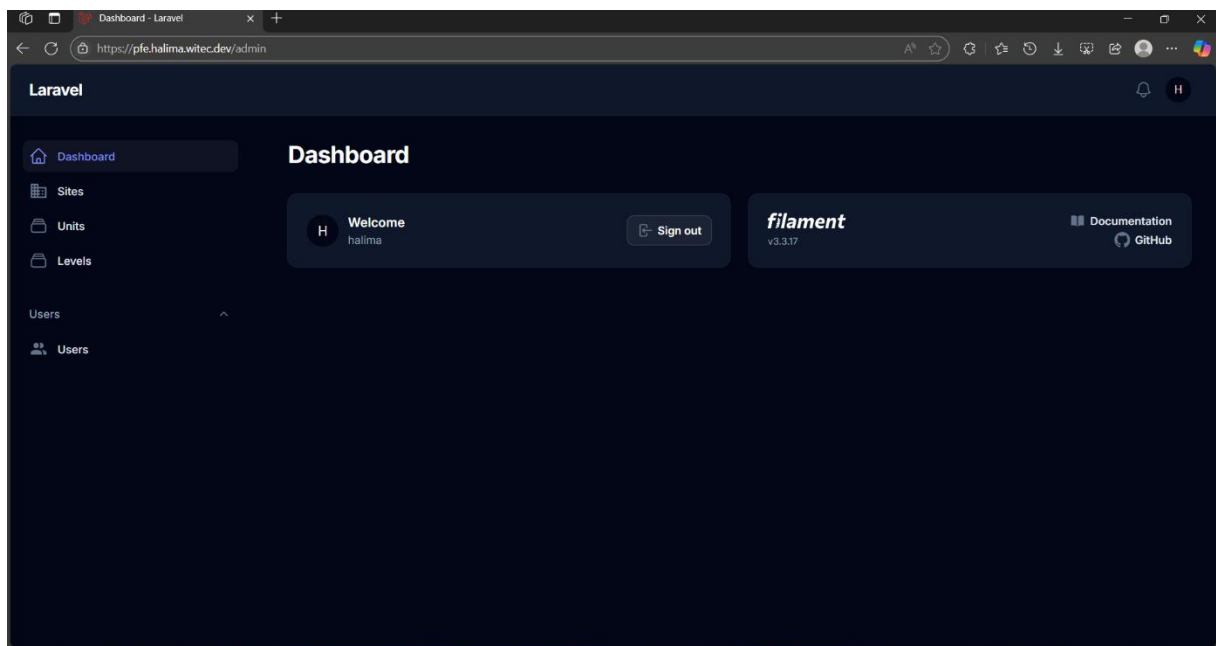
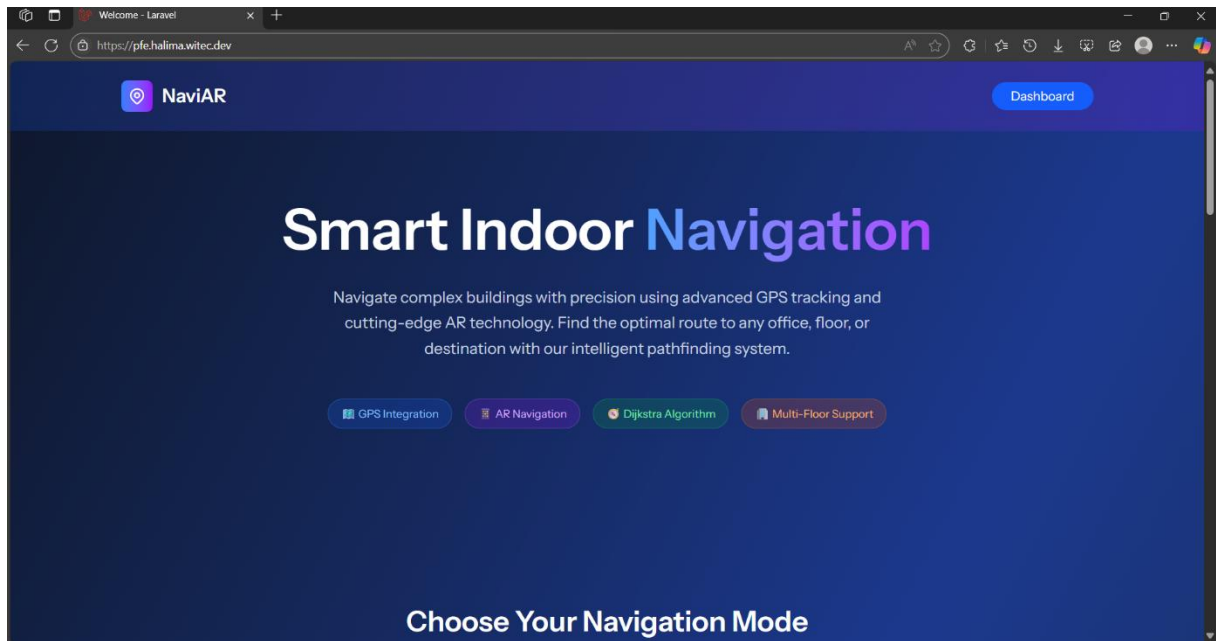
L'utilisateur choisit un site et une unité (département) sur Google Maps. Le chemin vers la destination est tracé sur la carte. Ensuite, ce chemin est projeté visuellement avec AR.js pour guider l'utilisateur.

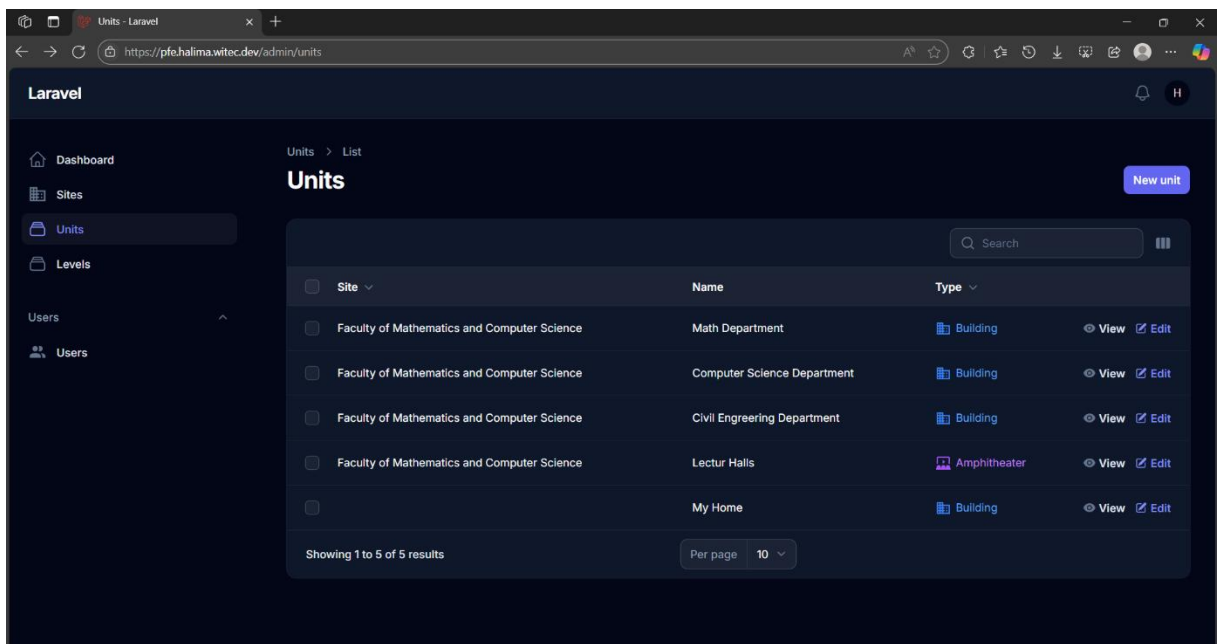
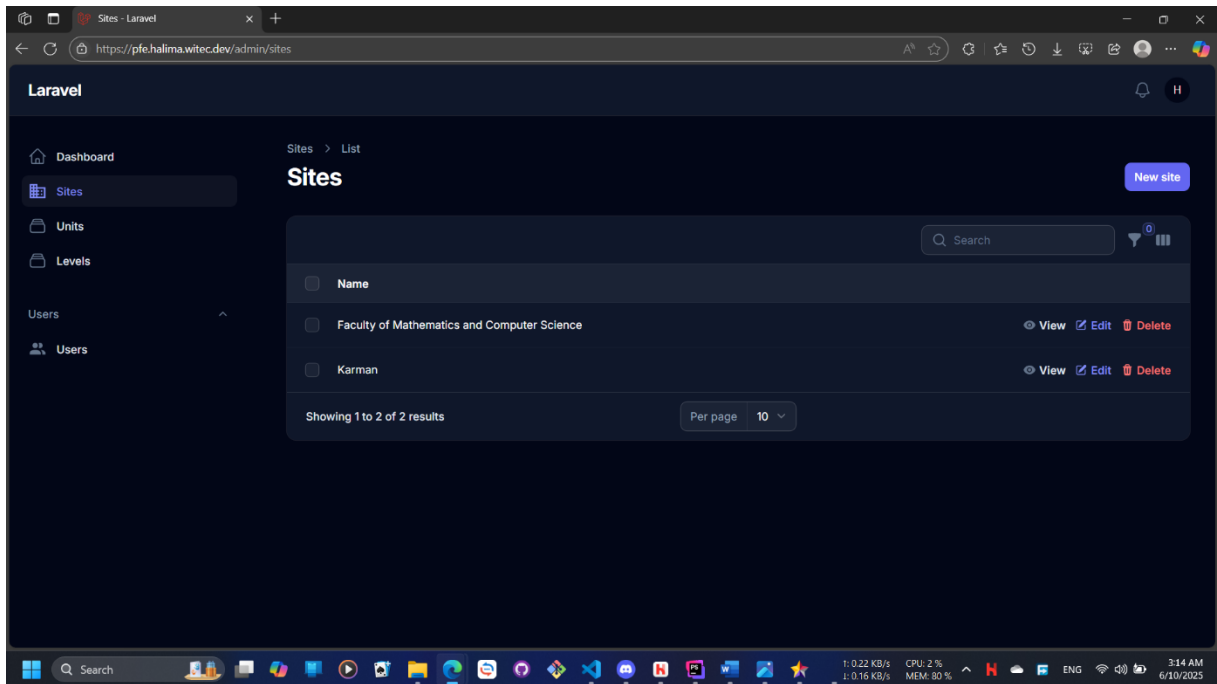
Partie intérieure :

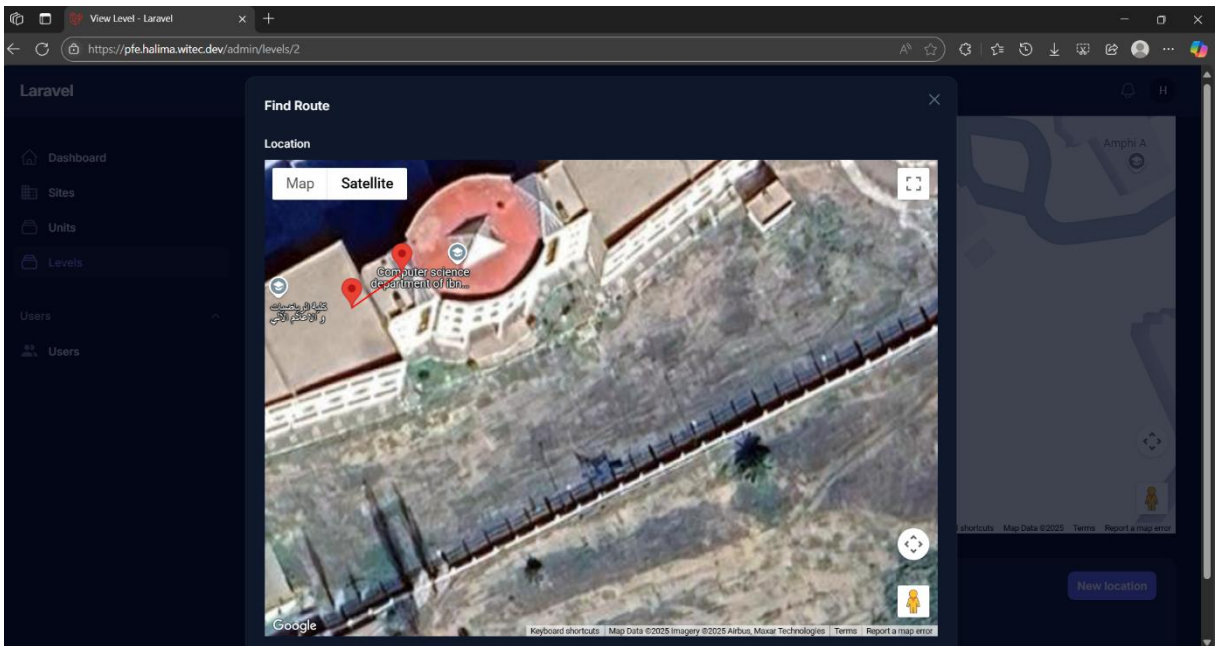
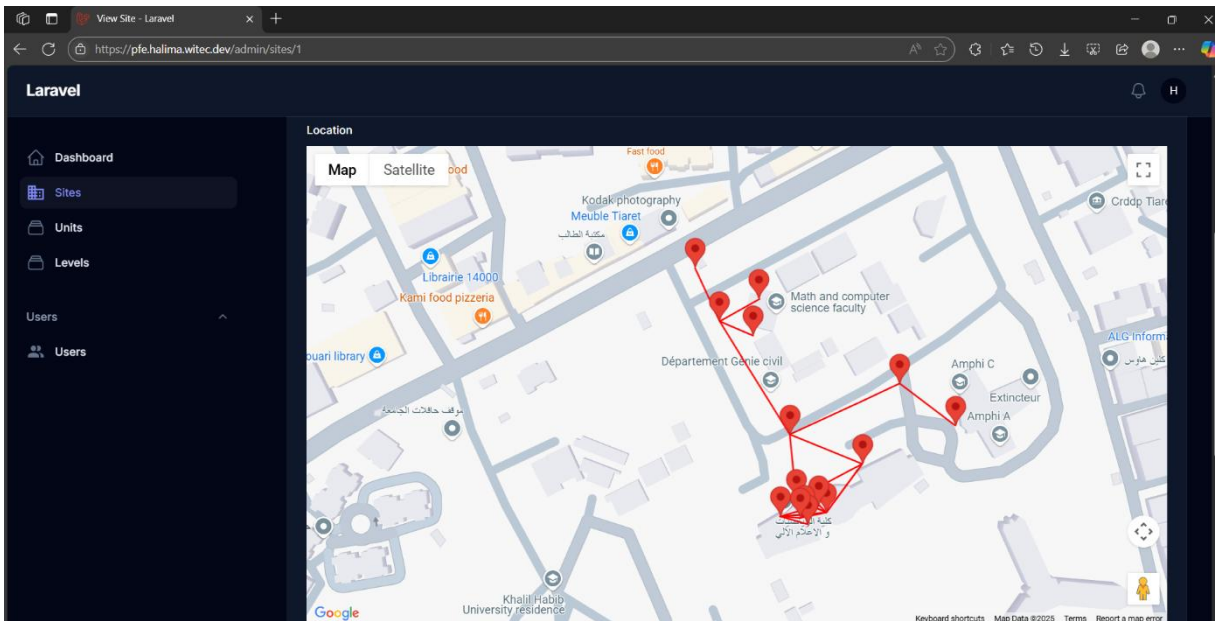
Des QR codes sont placés à chaque localisation interne. Lorsqu'un utilisateur scanne un QR code, la position est identifiée, le plan étage correspondant est affiché (avec zoom), et le chemin vers la destination choisie est calculé et affiché à la fois sur la carte et en réalité augmentée.

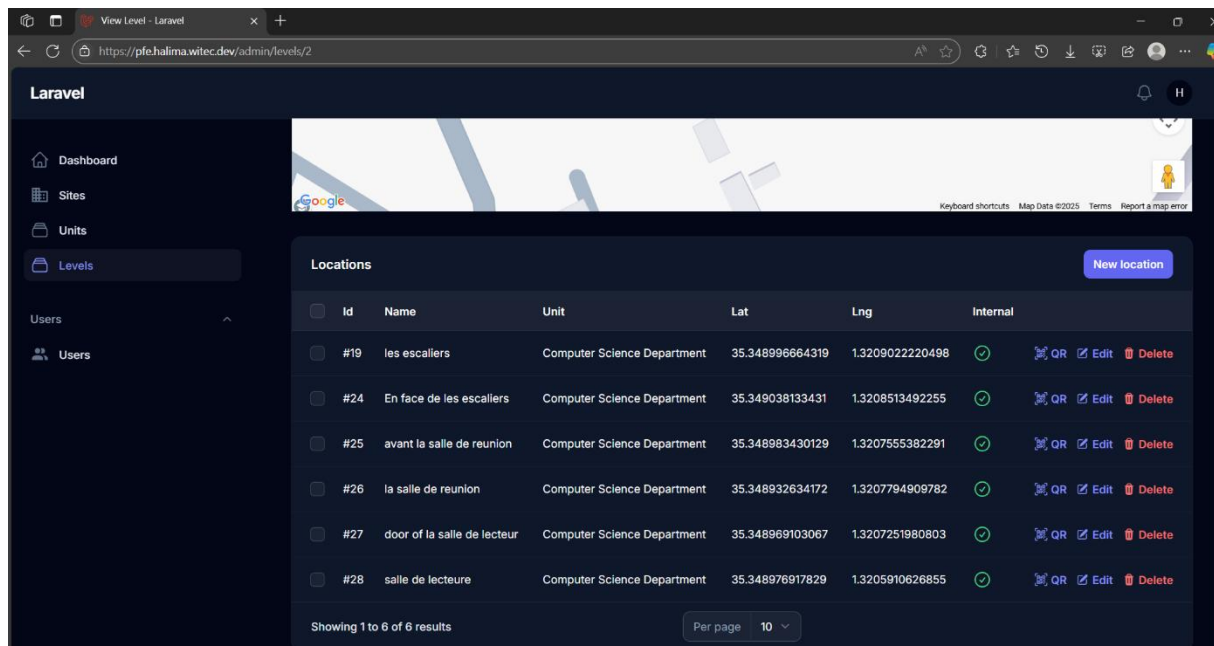
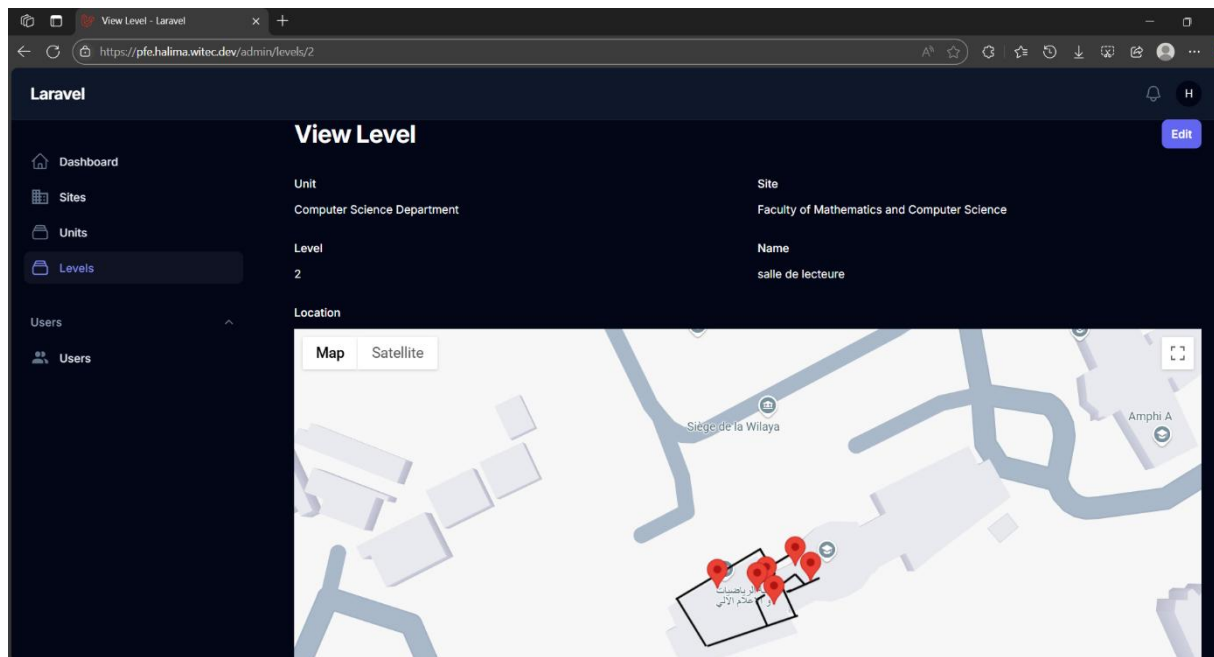




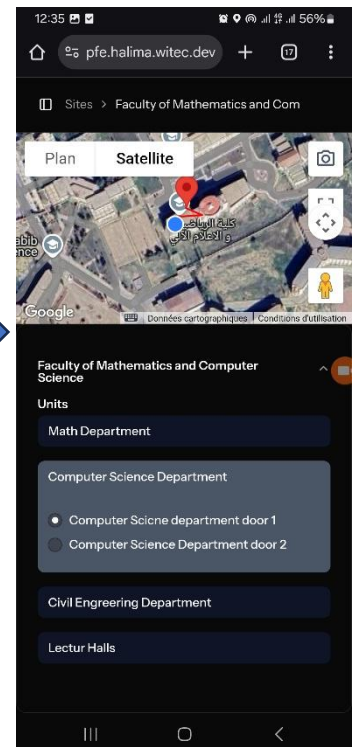
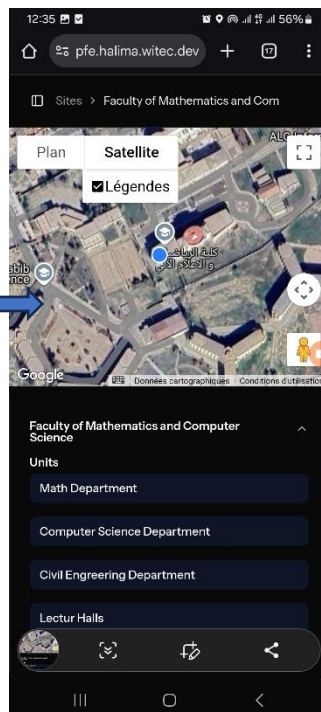
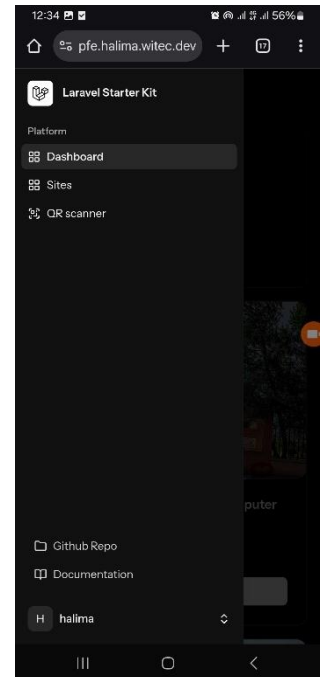
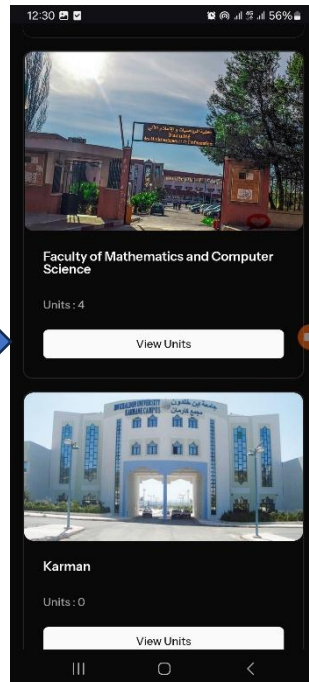


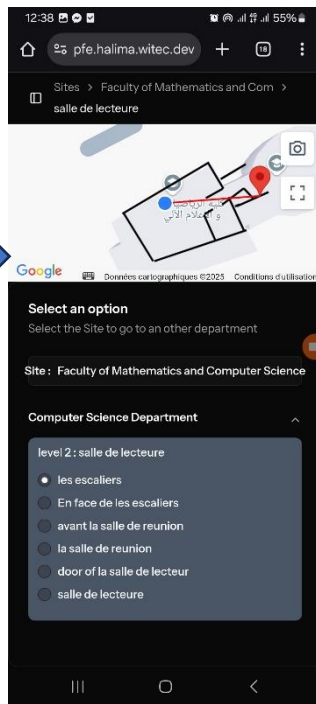
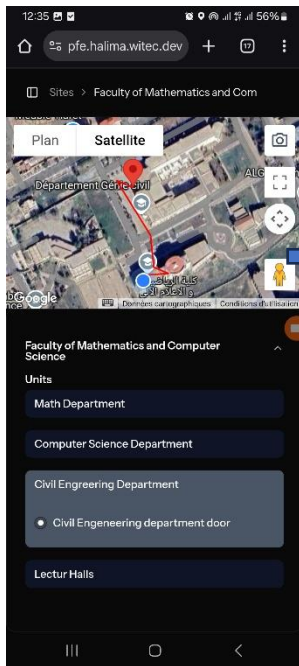






Couté visiteur :





CONCLUSION :

La localisation à l'intérieur des espaces publics couverts devient un enjeu stratégique, non seulement pour les utilisateurs, mais aussi pour les décideurs des infrastructures. Plus difficile à déployer que la géolocalisation en extérieur, qui repose principalement sur le GPS, la localisation indoor doit relever de grands défis techniques liés à la complexité des structures, à la densité des bâtiments et à l'absence de signaux satellites exploitables.

Dans ce mémoire, nous avons initié le projet en mettant en avant les problématiques concrètes auxquelles il répond : perte de repères dans de grands espaces, besoin d'aide à la mobilité, ou encore optimisation des services aux usagers. À travers une étude de faisabilité approfondie, nous avons démontré la pertinence de développer une solution de géolocalisation indoor basée sur des technologies accessibles telles que le Wifi, le Bluetooth Low Energy (BLE) ou encore la technique de fingerprinting.

La comparaison des technologies et techniques actuelles a permis de dresser une vue d'ensemble synthétique des différentes solutions envisageables. Les avantages et les limites de chaque méthode (trilatération, k-NN, filtres de Kalman...) ont été identifiés séparément, avec un intérêt croissant pour les approches hybrides et fondées sur l'intelligence artificielle.

Sur le plan pratique, nous avons conçu une application de localisation répondant à un ensemble de besoins fonctionnels, modélisés rigoureusement selon UML. La définition de l'architecture, le choix des technologies, la modélisation des cas d'usage et les tests de l'algorithme de positionnement confirment la faisabilité du projet dans un contexte réel.

Enfin, cette étude confirme que la géolocalisation indoor ne constitue pas seulement un défi théorique, mais représente une opportunité technologique réelle, riche en potentiel d'innovation dans les domaines du commerce, de la santé, du transport ou encore de la sécurité. Les perspectives d'amélioration se concentrent désormais sur l'optimisation des algorithmes, la réduction des coûts d'infrastructure et l'intégration de capteurs intelligents. Une orientation vers des solutions intelligentes, contextualisées et respectueuses de la vie privée pourrait représenter la prochaine étape de l'évolution de ces systèmes.

Perspectives :

1. Amélioration de la précision du positionnement :

Intégrer des capteurs inertiels (gyroscopes, accéléromètres) pour renforcer la précision dans les zones sans signal (ascenseurs, sous-sols).

2. Utilisation de l'intelligence artificielle :

Entraîner des modèles d'apprentissage automatique (Machine Learning) pour prédire plus précisément les positions à partir des données de signal (Wifi, BLE).

Appliquer le Deep Learning pour reconnaître automatiquement les modèles de mouvement des utilisateurs.

3. Extension à d'autres environnements complexes :

Adapter la solution aux hôpitaux, centres commerciaux, aéroports, musées ou encore entrepôts logistiques où la localisation est cruciale.

4. Respect de la vie privée et sécurité des données :

Offrir à l'utilisateur un contrôle total sur ses données de localisation (activation, suppression, historique).

5. Scalabilité et déploiement en temps réel :

Optimiser les performances pour supporter un grand nombre d'utilisateurs simultanés dans un grand bâtiment.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE :

1. ABI Research. (s.d.). *Site officiel*. <https://www.abiresearch.com>
2. Deng, Y., Ai, H., Deng, Z., Gao, W., & Shang, J. (2022). *An overview of indoor positioning and mapping technology standards*. *Standards*, 2(2), 157–183. [An Overview of Indoor Positioning and Mapping Technology Standards](#)
3. Esfahani, S. S., & Hoang, H.-T. T. (2020). *Real-Time Indoor Positioning Approach Using iBeacons and Smartphone Sensors*. *Applied Sciences*, 10(6), 2003. [Real-Time Indoor Positioning Approach Using iBeacons and Smartphone Sensors](#)
4. Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrami, S., Al-Ammar, M., & Al-Khalifa, H. S. (2023). *On Indoor Localization Using WiFi, BLE, UWB, and IMU Technologies*. *Sensors*, 23(20), 8598. [On Indoor Localization Using WiFi, BLE, UWB, and IMU Technologies](#)
5. Sharma, P., & Saini, H. (2023). *A Comprehensive Review of Indoor Localization Techniques and Applications in Various Sectors*. *Applied Sciences*, 15(3), 1544. [A Comprehensive Review of Indoor Localization Techniques and Applications in Various Sectors](#)
6. Yeh, S.-C., Wang, C.-H., Hsieh, C.-H., Chiou, Y.-S., & Cheng, T.-P. (2022). *Cost-effective fitting model for indoor positioning systems based on Bluetooth Low Energy*. *Sensors*, 22(16), 6007. <https://doi.org/10.3390/s22166007>
7. Palumbo, F., Barsocchi, P., & Chessa, S. (2023). *BLE-based indoor localization: Analysis of solutions for performance improvement*. *Sensors*, 23(6), 3052. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11154453/>
8. Vaishak, M. (2024, January 22). *The economics of indoor positioning: A deep dive into ROI analysis*. Medium. [The Economics of Indoor Positioning: A Deep Dive into ROI Analysis | by VAISHAK | Medium](#)
9. Ela Innovation. (s.d.). *Technologie BLE*. <https://elainnovation.com>
10. Definitions Marketing. (s.d.). *Site officiel*. <https://www.definitions-marketing.com>
11. Elaire, R. (2014). *Conception et développement d'une application de géolocalisation indoor* [Mémoire de fin d'études, École Nationale des Sciences de l'Informatique, Université de la Manouba].
12. Wikipedia contributors. (2025). *Indoor positioning system*. In Wikipedia. Retrieved June 9, 2025, from https://en.wikipedia.org/wiki/Indoor_positioning_system

13. Wikipedia contributors. (2025). *Système de positionnement en intérieur*. In Wikipedia. Retrieved June 9, 2025, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_de_positionnement_en_int%C3%A9rieur
14. Leitch, S. G., Ahmed, Q. Z., Abbas, W. B., Hafeez, M., Laziridis, P. I., Sureephong, P., & Alade, T. (2023). *On Indoor Localization Using WiFi, BLE, UWB, and IMU Technologies*. Sensors, 23(20), 8598. [On Indoor Localization Using WiFi, BLE, UWB, and IMU Technologies](#)
15. Li, J., Song, Y., Ma, Z., Liu, Y., & Chen, C. (2024). *A Review of Indoor Localization Methods Leveraging Smartphone Sensors and Spatial Context*. Sensors, 24(21), 6956. [A Review of Indoor Localization Methods Leveraging Smartphone Sensors and Spatial Context](#)
16. Palumbo, F., Barsocchi, P., & Chessa, S. (2023). *BLE-based indoor localization: Analysis of solutions for performance improvement*. Sensors, 23(6), 3052. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11154453/>
17. Khalili, A. M., Soliman, A.-H., Asaduzzaman, M., & Griffiths, A. (2019). *Wi-Fi Sensing: Applications and Challenges*. arXiv. [\[1901.00715\] Wi-Fi Sensing: Applications and Challenges](#)
18. Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). *A survey of indoor localization systems and technologies*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(3), 2568–2599. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2898796>
19. Youssef, M., & Agrawala, A. (2005). *The Horus WLAN location determination system*. Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services, 205–218. [The Horus WLAN location determination system | Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services](#)
20. Wang, J., Yang, K., & Shen, X. (2020). *Machine learning for indoor localization: A survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 22(1), 426–456. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2955369>
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8890473>
21. Google Developers. (2024). *Google Maps Platform Documentation*. <https://developers.google.com/maps/documentation>
22. Solustop. (s.d.). *Site officiel*. <https://www.solustop.com>
23. Clubic. (s.d.). *Article sur LiDAR*. <https://www.clubic.com>
24. MettaTec. (s.d.). *lidar-technology*. <https://mettatec.com>
25. Giga-Concept. (s.d.). *Balises BLE*. <https://www.giga-concept.fr>

26. CHABA, L., & TAMI, L. (2017). Localisation indoor [Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté de Génie Électrique et d'Informatique, Département d'Informatique]. Promotion 2016/2017.
27. Huang, K., He, K., & Du, X. (2019). *A Hybrid Method to Improve the BLE-Based Indoor Positioning in a Dense Bluetooth Environment*. *Sensors*, 19(2), 424. <https://doi.org/10.3390/s19020424>
28. Kolakowski, M. (2024). *Kalman filter based localization in hybrid BLE-UWB positioning system*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2404.02349>
29. Zhou, J., Li, Y., Huang, Y., & Zhao, Y. (2023). *An Indoor Location-Based Augmented Reality Framework (ILARF)*. *Sensors*, 23(3), 1370. <https://doi.org/10.3390/s23031370>
30. Navigine. (s.d.). *Site officiel*. <https://navigine.com>
31. • Datascientest. (s.d.). *Site officiel*. <https://datascientest.com>
32. DataScientest. (s.d.). *KNN : Algorithme K-Nearest Neighbors*. <https://datascientest.com/knn>
33. Welch, G., & Bishop, G. (2001). *An introduction to the Kalman filter*. University of North Carolina. [kalman_intro.pdf](#)
34. Röbesaat, J., Zhang, P., Abdelaal, M., & Theel, O. (2017). An improved BLE indoor localization with Kalman-based fusion: An experimental study. *Sensors*, 17(5), 951. [An Improved BLE Indoor Localization with Kalman-Based Fusion: An Experimental Study](#)
35. Subhan, F., Hasbullah, H., & Rozyyev, A. (2011). Indoor positioning in Bluetooth networks using fingerprinting and lateration approach. *2011 International Conference on Information Science and Applications*. [Considering Barrier Synchronization Overhead in Parallelizing Cryptographic Algorithms | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)
36. Torres-Sospedra, J., & Montoliu, R. (2020). Comprehensive analysis of indoor positioning datasets. *Data*, 5(4), 100. [Essential Variables for Environmental Monitoring: What Are the Possible Contributions of Earth Observation Data Cubes?](#)
37. Wikipedia contributors. (2025). *Dijkstra's algorithm*. In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra%27s_algorithm
38. Khatun, F., Mahmud, M., & Rashid, M. (2021). Indoor navigation using Dijkstra's algorithm: A case study. *International Journal of Computer Applications*, 174(22), 22–27. [Machine Learning - A New Trend in Web User Behavior Analysis](#)
39. Ma, L., Cao, N., Feng, X., Zhang, J., & Yan, J. (2022). Indoor Positioning Algorithm Based on Reconstructed Observation Model and Particle Filter. *ISPRS International Journal of*

Geo-Information, 11(1), 71. [Indoor Positioning Algorithm Based on Reconstructed Observation Model and Particle Filter](#)

40. Harle, R. (2013). A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3), 1281–1293. [A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore](#)
41. Wang, Y., Liu, Q., & Wang, X. (2017). CSI-based fingerprinting for indoor localization: A deep learning approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(1), 763–776. [CSI-Based Fingerprinting for Indoor Localization: A Deep Learning Approach | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore](#)
42. Li, P., Cui, H., Khan, A., et al. (2021). Deep Transfer Learning for WiFi Localization. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2103.05123>