



RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN - TIARET

MÉMOIRE

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 16/06/2025 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 de nous avoir donné la force et la patience pour 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 contribué 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, **Bouzeria Meddah** et **Bentaher Z.** 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 ici bas 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

ملخص

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

Résumé

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, Google Maps, Fingerprinting, Triangulation.

Abstract

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, Google Maps. Fingerprinting, Triangulation.

ملخص.....	I
Résumé	II
Abstract	III
Table de matière	IV
Abréviations	VIII
Table des figures.....	IX
PRÉFACE.....	1
Introduction générale.....	2
Chapitre 01 : Définitions, concepts fondamentaux et historique de la localisation indoor	
Introduction	5
1.1 Définition.....	6
1.1.2 Contexte général.....	6
1.1.3 Problématique centrale.....	7
1.1.4. Questions associées	7
1.1.5. Hypothèse de travail.....	7
1.1.6. Objectifs du mémoire	7
1.2. Les bénéfices de la localisation indoor	8
1.2.1. Amélioration de l'orientation et de la navigation.....	8
1.2.2. Optimisation des processus internes et de la logistique.....	8
1.2.3. Amélioration de la sécurité et de la sûreté	9
1.2.4. Accessibilité renforcée	9
1.2.5. Collecte et analyse de données spatiales.....	9
1.2.6. Expérience utilisateur augmentée	10
1.3. Domaines d'application de la localisation indoor.....	10
1.3.1. Secteur de la santé	10
1.3.2. Éducation et universités	11
1.3.3. Transports (gares, aéroports, métros).....	11
1.3.4. Industrie et logistique	11
1.3.5. Commerce et centres commerciaux	12

1.3.6. Bâtiments administratifs et smart buildings.....	12
1.3.7. Évènementiel et culture.....	12
1.4. Les différentes approches de la localisation indoor	13
1.4.1. Localisation par Wi-Fi.....	13
1.4.2. Bluetooth Low Energy (BLE).....	14
1.4.3. RFID (Radio-Frequency Identification).....	14
1.4.4. Capteurs inertiels (IMU)	15
1.4.5. UWB (Ultra Wide Band).....	18
1.4.6. Vision par ordinateur.....	18
1.4.7. Localisation basée sur le Machine Learning.....	18
1.5. Cartographie et Annotation d'un bâtiment à plusieurs niveaux.....	18
Conclusion.....	21

Chapitre 02 : Architecture d'un Système de Localisation Indoor

Introduction	23
2.1 Architecture logicielle d'un système de localisation indoor	23
2.1.1. Module de collecte de données	23
2.1.2. Module de traitement de la position.....	24
2.1.3. Base de données	25
2.1.4. Module de visualisation et d'interaction utilisateur	25
2.1.5. Communication et synchronisation.....	26
2.1.6. Services complémentaires	26
2.2 Algorithmes de localisation.....	26
2.2.1. Algorithmes géométriques.....	27
2.2.2. Algorithmes statistiques	28
2.2.3. Algorithmes d'apprentissage automatique (Machine Learning).....	29
2.2.4. Comparaison et choix de l'algorithme	30
2.3 Communication et transmission des données	30
2.3.1.. Enjeux de la communication.....	30
2.3.2. Protocoles de communication	31
2.3.3. Sécurité et confidentialité.....	31

2.3.4. Gestion de la connectivité	32
2.4. Intégration dans une application mobile	32
2.4.1. Accès aux capteurs du smartphone	32
2.4.2. Affichage et interaction	32
2.4.3. Traitement local ou distant	33
2.4.4. Gestion de la vie privée et des permissions	33
2.4.5. Expérience utilisateur	33
2.5. Exemple d'architecture d'un système hybride	33
2.5.1. Description de l'architecture globale	34
2.5.2. Scénario d'utilisation	34
2.5.3. Avantages du système hybride QR + IMU	35
2.5.4. Inconvénients et limitations	35
2.5.5. Perspectives d'amélioration	35
Conclusion	35

Chapitre 03 : Modélisation UML et spécifications du système

Introduction	38
3.1 Utilisateurs et parties prenantes du système	38
3.2 Description des besoins utilisateurs et système	38
3.2.1 Fonctions attendues de l'application	38
3.2.2 Besoins non fonctionnels	39
3.3 Identification et analyse des besoins du système	39
3.3.1 Diagramme de classe	39
3.3.2 Diagramme de cas d'utilisation	41
3.3.3 Diagramme d'activités	42
Conclusion	43

Chapitre 04 : Conception technique et développement de l'application

Introduction	45
4.1 Planification et structuration technique	45
4.1.1 Approche hybride de navigation et architecture système	45
4.1.2 Modélisation des données et structure de la base	46

Table de matière

4.2 Technologies et outils de développement.....	47
4.2.1 Langages et frameworks adoptés	47
4.2.2 Architecture client-serveur modulaire.....	47
4.2.3 Matériel et environnement de test	47
4.3 Phases de développement : du prototype à la démonstration.....	49
Conclusion.....	59
Conclusion générale	60
Références bibliographiques :	62

Abréviations

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

Table des figures

Numéro de figure	Le nom de figure	Page
1	Localisation indoor via une application	6
2	Localisation indoor basée sur Wi-Fi	13
3	Système de positionnement indoor basé sur BLE	14
4	Etapes du processus d'identification RFID	14
5	Architecture fonctionnelle du module	23
6	Technique de trilatération	26
7	Les K plus proches voisins (KNN)	28
8	Diagramme de classe	39
9	Diagramme de cas d'utilisation	40
10	Diagramme d'activité	41
11	Système de navigation QR et AR.js (intérieur/extérieur)	44
12	Interface d'accueil de l'application NaviAR	48
13	Tableau de bord de l'administrateur développé avec Laravel et Filament.	49
14	Interface de gestion des sites dans l'espace d'administration.	50
15	Interface de gestion des unités associées à un site spécifique.	51
16	Génération automatique d'itinéraires extérieurs entre unités avec Google Maps.	52
17	. Localisation des accès en vue satellite pour la navigation intérieure.	53
18	Visualisation des emplacements internes à l'étage 2 du bâtiment département informatique pour le guidage intérieur.	54
19	Liste des localisations internes avec génération de QR codes pour la navigation intérieure par scan.	55
20	Écran d'accueil de l'utilisateur sur mobile.	56
21	Liste des sites disponibles pour la navigation.	56
22	Affichage de la localisation de l'utilisateur et des départements sur carte Google.	56
23	Sélection précise de l'accès d'un département pour une navigation ciblée.	56
24	Choix du niveau à visiter dans le bâtiment pour activer la navigation intérieure.	56
25	Sélection d'un point et guidage interne sur plan.	56
26	Affichage en réalité augmentée d'un chemin dans un couloir intérieur pour assister la navigation.	57

PRÉFACE

Depuis plusieurs décennies, la transformation numérique a modifié en profondeur la manière dont les êtres humains interagissent avec leur environnement. Les systèmes de positionnement par satellite, tels que le GPS, ont révolutionné la mobilité, la logistique, et la géolocalisation dans les espaces extérieurs. Toutefois, cette même technologie s'avère inefficace dans les espaces clos comme les bâtiments, les centres commerciaux, les gares, les hôpitaux ou les aéroports, où le signal satellite est souvent altéré, voire inexistant. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail sur la **localisation indoor** ou localisation en intérieur.

Ce mémoire est né d'un double constat. D'une part, la mobilité des personnes à l'intérieur des bâtiments devient de plus en plus complexe à mesure que les structures se densifient et que les institutions (universités, hôpitaux, entreprises, etc.) deviennent des labyrinthes d'étages, de couloirs et de zones spécialisées. D'autre part, les progrès rapides en intelligence artificielle, en traitement du signal et en capteurs embarqués ouvrent des perspectives fascinantes pour rendre les espaces intérieurs « intelligents » et interactifs.

Le sujet de la **localisation indoor** ne se limite pas à un simple problème technique. Il interroge aussi la manière dont l'humain s'oriente, se déplace, accède à l'information et interagit avec son environnement. C'est un domaine qui mobilise à la fois l'ingénierie, les sciences informatiques, la physique des capteurs, mais aussi les sciences humaines, lorsqu'il s'agit d'ergonomie, de vie privée ou d'accessibilité.

À travers ce travail, l'objectif est de rappeler les fondements théoriques et pratiques d'un système de localisation indoor moderne, adaptable, et potentiellement applicable dans divers contextes. Il propose des solutions de localisation intérieure, de déplacements et de réservation d'espaces dans des structures complexes et fermées.

Introduction générale

Contexte général

Dans un monde où les villes sont surpeuplées, les infrastructures de plus en plus complexes et des embouteillages interminables, la gestion du temps et de l'énergie devient un véritable défi quotidien pour des millions de citoyens. Que ce soit dans le cadre professionnel, scolaire ou personnel, le temps perdu dans les déplacements impacte négativement la productivité, la qualité de vie, et engendre un stress chronique. Face à cette problématique grandissante, les outils numériques intelligents, portés par l'intelligence artificielle (IA), offrent des solutions concrètes pour optimiser les trajets, réduire la charge mentale et améliorer l'expérience urbaine.

La **géolocalisation** s'impose comme un pilier fondamental des technologies intelligentes. Alors que la **localisation outdoor**, dominée par le GPS, a atteint un niveau de maturité élevé, la **localisation en intérieur**, ou **localisation indoor**, reste un défi technologique non totalement résolu.

De nombreux environnements sollicités quotidiennement par des visiteurs non habitués – tels que les hôpitaux, les aéroports, les bâtiments gouvernementaux, les centres commerciaux, les foires nationales et internationales ou encore les universités – nécessitent des solutions précises pour se déplacer, localiser des individus ou des objets à leur intérieur. Les applications sont nombreuses : guidage de personnes en temps réel, assistance à la mobilité pour les personnes âgées ou en situation de handicap, logistique en entrepôt, sécurité des bâtiments, suivi de patients, interventions d'urgences ou encore expériences immersives en réalité augmentée.

Problématique

Le principal obstacle à la localisation indoor réside dans **l'absence ou l'instabilité du signal satellite dans les espaces clos**, rendant inopérantes les technologies traditionnelles comme le GPS. De plus, chaque bâtiment présente une configuration unique (structure physique, utilisations statiques ou dynamiques des locaux, matériaux de construction utilisés, obstacles), ce qui rend difficile une solution standard et nous force à des solutions spécifiques à chaque bâtiment.

Dès lors, la question centrale de ce travail peut être formulée ainsi :

Comment concevoir un système de localisation indoor fiable, précis et adaptable, en exploitant les technologies actuelles (capteurs, Wi-Fi, Bluetooth, vision par ordinateur, intelligence artificielle), tout en répondant aux contraintes d'un environnement réel ?

Objectifs :

Ce mémoire se donne pour objectif de :

- Présenter les différentes approches techniques de la localisation indoor (à base de signaux radio, capteurs inertiels, image, etc.) ;
- Étudier les avantages et limites de chaque méthode ;

- Proposer une approche, adaptée au contexte réel étudié, ici le déplacement extérieur et intérieur dans les **structures de l'université Ibn Khaldoun de Tiaret Algérie**.
- Évaluer la **faisabilité d'un prototype** ou d'une preuve de concept, en tenant compte des aspects techniques, ergonomiques et économiques.

Méthodologie :

Pour atteindre ces objectifs, un état de l'art a été fait afin d'identifier les méthodes existantes et leurs performances. Ensuite, une étude comparative succincte (selon le contexte du travail) des différentes approches a été réalisée. L'aspect pratique est également abordé, notamment à travers la conception et l'implémentation d'une application full stack de déplacements dans le département d'informatique.

Plan du mémoire

Ce mémoire est structuré comme suit :

Chapitre 01 : « Définitions, concepts fondamentaux et historique de la localisation indoor »

Ce chapitre introductif présente les notions fondamentales sur lesquelles repose la localisation indoor. Il s'agit de définir les notions de base, de montrer une approche historique sur l'évolution des systèmes de localisation indoor, de tirer les principales motivations de leur utilisation. Ce chapitre permet de comprendre les enjeux et les besoins de la localisation indoor.

Chapitre 02 : « Architecture d'un Système de Localisation Indoor »

Ce chapitre aborde comment construire un système de localisation indoor en présentant la structure générale, l'exposé des différentes technologies à disposition dans le domaine de la localisation indoor (Wi-Fi, Bluetooth, RFID, etc.), des architectures utilisées dans le domaine (capteur, serveurs, interfaces utilisateurs.) et la comparaison entre localisation indoor et localisation outdoor. On passe en revue les difficultés techniques inhérentes à la localisation indoor (précision, obstacles, coûts) et certains systèmes tentant d'allier plus particulièrement les solutions hybrides.

Chapitre 03 : « Modélisation UML et spécifications du système »

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 technique et développement 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.

CHAPITRE 01

**Définitions, concepts fondamentaux
et historique de la localisation indoor.**

Introduction

La géolocalisation en extérieur (outdoor) trouve ses origines dans les années 1970 avec la mise en place du Global Positioning System (GPS) par le département de la Défense des États-Unis. Le GPS reposait sur une constellation de satellites capables de transmettre des signaux horodatés à des récepteurs au sol. Ces derniers pouvaient alors trianguler leur position avec une précision de quelques mètres. Depuis l'année 2000, GPS est ouvert au public.

D'autres pays ont développé leurs propres systèmes : **GLONASS** (Russie), **Galileo** (Union européenne), **BeiDou** (Chine).

La géolocalisation en extérieur et en intérieur des infrastructures, couplées à des algorithmes prédictifs, joue un rôle central. En extérieur, les systèmes de navigation intelligents comme Google Maps ou Waze utilisent l'IA pour analyser en temps réel le trafic, proposer des itinéraires alternatifs et prévoir les temps de trajet avec une grande précision. Ces technologies permettent aux usagers d'éviter les bouchons, de réduire les détours inutiles et de planifier leurs déplacements de manière optimale.

Cependant, une part importante du temps est également perdue à **l'intérieur** des bâtiments complexes : hôpitaux, universités, aéroports, foires internationales, centres commerciaux, grandes entreprises, etc. La géolocalisation indoor, rendue possible grâce à des technologies comme le Wi-Fi fingerprinting, le Bluetooth Low Energy (BLE) ou les capteurs inertiels (des dispositifs qui mesurent l'accélération, la vitesse angulaire (rotation) et parfois l'orientation d'un objet en mouvement), permet de se repérer et de diriger efficacement à l'intérieur de ces espaces fermés.

L'IA peut alors recommander le chemin optimal vers une salle de réunion, un guichet, une sortie de secours, un stand ou un service particulier, réduisant ainsi les pertes de temps, la fatigue et la confusion.

Au-delà de la simple navigation, l'IA peut apprendre les habitudes de l'utilisateur, **anticiper** ses déplacements futurs, proposer des routines plus efficaces et même répartir les flux de personnes pour désengorger certains espaces à forte présence humaine (hadj, spectacles..). Dans les environnements professionnels ou universitaires, cela contribue à une meilleure organisation du temps de travail, à la réduction des retards, et à l'amélioration du bien-être global.

Ainsi, en combinant l'intelligence artificielle aux technologies de géolocalisation indoor/outdoor, il devient possible de répondre de manière innovante à un problème profondément enraciné dans les réalités urbaines modernes : **la perte de temps, d'énergie et la montée du stress liés aux déplacements quotidiens.**

Dans ce premier chapitre, nous donnons une introduction détaillée de la localisation en intérieur. Nous mettrons l'accent sur les définitions, les bénéfices attendus, les secteurs concernés, ainsi que les principales approches existantes. Enfin, nous mettrons en évidence la solution la plus simple et la plus économique à mettre en œuvre dans un environnement réel.

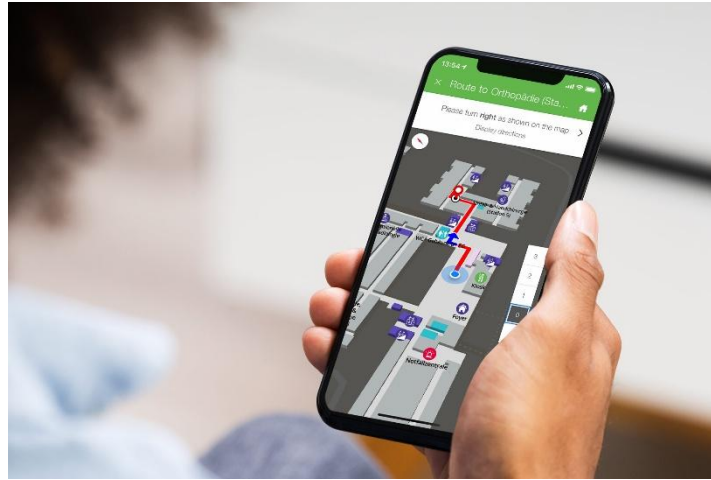


Figure 1: Localisation indoor via une application

1.1 Définition

La localisation indoor, regroupe l'ensemble des technologies et méthodes permettant de déterminer la position d'un individu, d'un objet ou d'un équipement au sein d'un espace clos, tel qu'un bâtiment, un entrepôt ou une infrastructure complexe. Contrairement au système de positionnement global (GPS), la localisation indoor fonctionne dans des environnements où les signaux satellites sont affaiblis ou bloqués par les murs et les structures internes. Elle vise à fournir une position précise, actualisée en temps réel ou en différé, afin de faciliter la navigation, le suivi ou l'analyse de mouvements au sein de l'espace ciblé[1].

1.1.2 Contexte général

À l'ère de la numérisation des services et des bâtiments intelligents, la **géolocalisation** ne se limite plus aux environnements extérieurs. Si les systèmes GPS ont largement démontré leur efficacité en milieu ouvert, ils deviennent **inopérants dès que l'on pénètre dans des structures fermées** : murs épais, béton armé, métaux, réseaux câblés denses et architecture complexe bloquent ou dégradent les signaux satellites.

C'est dans ce contexte que les **systèmes de localisation indoor** amènent des solutions innovantes pour guider, orienter, sécuriser et optimiser les activités dans des espaces clos tels que :

- les hôpitaux,
- les aéroports,
- les foires,

- les universités à plusieurs étages,
- les centres commerciaux,
- les usines,
- les bâtiments administratifs étendus...

Cependant, la mise en œuvre de la localisation indoor dans ces structures soulève de nombreux défis : **technologiques, organisationnels, financiers et ergonomiques.**

1.1.3 Problématique centrale

Comment concevoir et déployer un système de localisation indoor convivial, efficace, fiable et adaptable dans des structures complexes, tout en conciliant précision, facilité d'installation et d'utilisation, de coût et respect de la vie privée?

1.1.4. Questions associées

Pour répondre à cette problématique principale, plusieurs questions doivent être explorées :

- Quels sont les obstacles spécifiques à l'environnement complexe (multi-étages, interférences, densité humaine) étudié ?
- Quelles sont les technologies existantes (Wi-Fi, BLE, QR code, IMU, SLAM, RFID, etc.) et quelles sont leurs limites dans un bâtiment réel ?
- Comment évaluer et comparer les approches en termes de précision, coût de déploiement, consommation d'énergie et maintenance ?
- Quels choix techniques **permettent** une mise en œuvre simple, évolutive et facilement réutilisable par des **non-techniciens** ?
- Comment intégrer un système de localisation dans une application mobile adaptée à différents profils d'utilisateurs (administrateur, employé, visiteur) ?
- Quels enjeux éthiques et légaux soulève la collecte de données de position dans un cadre professionnel ou public ?

1.1.5. Hypothèse de travail

La combinaison de technologies légères, telles que les QR codes et les capteurs inertiels, associée à une interface mobile intuitive, permettrait de proposer une solution de localisation indoor robuste et accessible, adaptée aux besoins des utilisateurs dans les structures complexes, sans nécessiter une infrastructure coûteuse ou intrusive.

1.1.6. Objectifs du mémoire

- Identifier les approches de localisation indoor les plus adaptées à l'environnement du cas étudié.
- Concevoir une architecture logicielle et matérielle hybride, simple à déployer.
- Prototyper une **application mobile fonctionnelle**, intégrant des modules de guidage indoor.
- Évaluer le système dans un environnement réel ou simulé (notre département d'informatique).

- Proposer des **perspectives d'amélioration** vers des systèmes plus intelligents (machine Learning, auto-calibration, réalité augmentée).

1.2. Les bénéfices de la localisation indoor

La localisation indoor connaît une adoption croissante dans divers secteurs, car elle apporte des **avantages concrets et mesurables** tant pour les utilisateurs (visiteurs, clients, exposants, patients..) que pour les gestionnaires d'infrastructures. Ces bénéfices peuvent être classés en plusieurs catégories : amélioration de l'expérience utilisateur, optimisation des opérations internes, renforcement de la sécurité, et valorisation des données spatiales.

1.2.1. Amélioration de l'orientation et de la navigation

L'un des bénéfices les plus visibles de la localisation indoor est l'**aide à l'orientation** à l'intérieur d'espaces complexes : hôpitaux, universités, centres commerciaux, gares, aéroports, etc. surtout pour les visiteurs peu familiers et occasionnels.

- **Navigation interactive** : les utilisateurs peuvent visualiser leur position en temps réel sur une carte du bâtiment, chercher une destination (comptoir, stand, bureau, salle, service), et se faire guider étape par étape.
- **Réduction du stress** : notamment pour les visiteurs peu familiers des lieux, ce qui améliore leur satisfaction.
- **Gain de temps** : les déplacements deviennent plus fluides et plus rapides, ce qui est crucial dans les environnements sensibles comme les hôpitaux ou les centres de secours.

1.2.2. Optimisation des processus internes et de la logistique

Dans les entreprises, les hôpitaux ou les entrepôts, la localisation indoor permet une meilleure **gestion** des ressources humaines et matérielles.

- **Suivi des équipements** : localiser du matériel médical, des chariots, des véhicules ou des outils dans des environnements étendus ou exigus.
- **Optimisation des flux** : identifier les zones de congestion ou les parcours inefficaces afin de réorganiser l'espace ou les horaires.
- **Gestion optimale des salles** : savoir quelles pièces sont occupées, lesquelles sont libres, et pendant combien de temps.
- **Maintenance proactive** : La maintenance proactive est une stratégie qui vise à prévenir les pannes en identifiant et en résolvant les problèmes avant qu'ils ne surviennent. certaines applications permettent d'alerter les techniciens lorsqu'ils s'approchent d'un équipement nécessitant une vérification.

1.2.3. Amélioration de la sécurité et de la sûreté

La localisation indoor peut jouer un rôle clé dans la gestion des risques et la sécurité des personnes.

- **Suivi des déplacements** : dans les établissements sensibles (mines, usines, hôpitaux psychiatriques, prisons), la position des employés, des malades, des détenus ou des visiteurs peut être surveillée pour éviter les situations à risque.
- **Réponse d'urgence** : en cas d'incendie ou d'évacuation, il est possible d'identifier en temps réel les personnes restées dans les bâtiments.
- **Alertes de zone interdite** : les appareils ou les individus peuvent être avertis s'ils s'approchent d'un secteur restreint ou dangereux. Des exemples sont la sécurité des travailleurs isolés, la prévention des intrusions, la gestion des flux dans les lieux publics, etc.
- **Tranquillité pour les familles** : dans les hôpitaux ou maisons de retraite, le suivi de patients fragiles (ex : Alzheimer) réduit le risque de fugue ou de perte.

1.2.4. Accessibilité renforcée

Les personnes à mobilité réduite, malvoyantes ou sourdes peuvent bénéficier d'une accessibilité plus sécurisée à des bâtiments ou des institutions.

- **Itinéraires personnalisés** : chemins sans escaliers, avec ascenseurs ou rampes, adaptés à chaque profil utilisateur.
- **Navigation vocale** ou en braille via des applications mobiles spécifiques.
- **Interaction contextuelle** : signalement d'obstacles ou de points d'intérêt en fonction de la position.

1.2.5. Collecte et analyse de données spatiales

L'un des bénéfices indirects mais puissants de la localisation indoor est la **génération de données** exploitables pour l'analyse et la prise de décision.

- **Cartographie des flux** : visualisation des déplacements des usagers, des points chauds ou des zones peu utilisées.
- **Amélioration des services** : adapter les horaires d'ouverture, les ressources humaines ou les services selon les usages réels.
- **Analyse comportementale** : dans le commerce ou l'événementiel, observer les préférences de parcours pour optimiser l'aménagement ou la publicité.
- **Évaluation des performances** : comparer les flux avec les objectifs opérationnels.

1.2.6. Expérience utilisateur augmentée

Dans les environnements commerciaux ou culturels, la localisation indoor permet d'offrir une **expérience enrichie** :

- **Réalité augmentée** pour guider les utilisateurs ou afficher des informations contextuelles.
- **Parcours interactifs** dans les musées, foires ou salons, **Hadj et Omra** des lieux saints de l'Islam.
- **Personnalisation du service** : notifications, promotions, assistance ciblée selon la position.

La localisation indoor n'est pas un simple outil technique. Elle constitue un **levier stratégique** pour améliorer la performance, la sécurité et l'expérience au sein des espaces intérieurs complexes. Elle ouvre la voie à des **bâtiments intelligents** capables de réagir en temps réel aux besoins des occupants. Sa démocratisation et sa simplicité croissante d'implémentation en font une technologie clé pour les années à venir.

1.3. Domaines d'application de la localisation indoor

La localisation indoor s'impose comme une technologie **transversale**, utilisée dans de nombreux domaines où la **géolocalisation en temps réel** dans les espaces clos devient une nécessité. Ses applications couvrent aussi bien les environnements publics que privés, du domaine médical au commerce, en passant par l'éducation, l'industrie ou les transports.

1.3.1. Secteur de la santé

Dans les hôpitaux, cliniques et maisons de retraite, la localisation indoor permet :

- **Le suivi des patients** vulnérables (patients Alzheimer ou enfants hospitalisés), pour éviter les fugues ou les erreurs de transfert.
- **La géolocalisation du matériel médical** (brancards, fauteuils roulants, défibrillateurs), réduisant les temps de recherche.
- **L'optimisation des interventions médicales** : en localisant le personnel soignant, on peut leur attribuer les tâches en fonction de leur proximité.
- **L'assistance aux visiteurs**, grâce à des applications qui guident vers un service, une chambre ou un médecin.[2]

Exemple : Le CHU Mustapha Bacha d'Alger peut utiliser des balises Bluetooth pour localiser le matériel, le personnel médical, para médical ainsi que d'optimiser le parcours patient, visiteurs et matériel roulant.

1.3.2. Éducation et universités

Les grands campus universitaires ou établissements scolaires complexes bénéficient de systèmes de localisation pour :

- **Guider les étudiants** vers leurs salles de cours, surtout en début d'année ou lors des concours, dans des bâtiments inconnus ou lors des périodes d'examens suite à des mises à jours de planning de salles.
 - **Faciliter l'accès aux services** (bibliothèques, secrétariat, amphithéâtres).
 - **Réserver des salles disponibles** en fonction de la localisation.
 - **Analyser les flux** d'étudiants afin d'ajuster les emplois du temps ou les ressources.
 - **Guider** les participants aux **congrès** et **manifestations scientifiques**. [2]
- *Exemple* : Certaines universités américaines ont déployé des applications mobiles permettant aux étudiants de se repérer dans les bâtiments grâce à des QR codes et du Wi-Fi.

1.3.3. Transports (gares, aéroports, métros)

Les infrastructures de transport sont des lieux où la **densité humaine**, la **complexité spatiale** et la **limitation des temps** rendent la localisation indoor indispensable :

- **Navigation pour les passagers** (porte d'embarquement, quai, service, consignes, urgences, travaux occasionnels).
 - **Mise à jour dynamique des itinéraires** en fonction des retards ou fermetures.
 - **Guidage pour personnes handicapées** ou non-voyantes.
 - **Suivi des bagages ou des véhicules** internes (chariots à bagages, navettes). [2]
- *Exemple* : L'aéroport d'Amsterdam Schiphol utilise un système de localisation indoor combinant Wi-Fi, Bluetooth et balises fixes pour guider les passagers vers les portes d'embarquement.

1.3.4. Industrie et logistique

Dans les entrepôts, usines, ou centres logistiques, la localisation indoor permet :

- **Le suivi en temps réel des stocks et colis** dans les zones de stockage.
 - **L'optimisation des trajets des chariots élévateurs** ou robots autonomes (AGV).
 - **La sécurité des travailleurs**, en alertant lors de dépassement de zones interdites.
 - **La traçabilité des opérations** pour l'audit ou l'assurance qualité.
- *Exemple* : Amazon utilise un système de localisation très précis dans ses entrepôts pour piloter ses robots logistiques et coordonner les préparateurs de commandes.

1.3.5. Commerce et centres commerciaux

Les centres commerciaux, supermarchés et salons utilisent la localisation indoor pour :

- **Guider les clients** vers des boutiques ou produits spécifiques.
 - **Analyser les parcours** des clients dans les rayons pour optimiser l'agencement.
 - **Envoyer des promotions géolocalisées** à proximité d'un produit.
 - **Créer des expériences personnalisées** (réalité augmentée, visite virtuelle).
- *Exemple* : Carrefour a testé un système de navigation en rayon basé sur des balises BLE et une application mobile permettant aux clients de trouver un produit en magasin.

1.3.6. Bâtiments administratifs et smart buildings

Dans les grandes administrations ou entreprises :

- **Les visiteurs peuvent être guidés** dès leur arrivée pour se rendre à un bureau ou une salle de réunion.
 - **Les employés peuvent localiser leurs collègues**, réserver des salles ou accéder à des services internes.
 - **Les gestionnaires** peuvent visualiser l'occupation des locaux et adapter les ressources (éclairage, climatisation, ménage).
- *Exemple* : Des solutions intégrées dans les bâtiments intelligents permettent d'ajuster automatiquement les systèmes de chauffage et de lumière en fonction de la présence détectée.

1.3.7. Événementiel et culture

Dans les musées, foires, salons ou expositions, la localisation indoor enrichit l'expérience des visiteurs :

- **Guidage interactif** vers des stands, œuvres ou intervenants.
 - **Parcours personnalisés** selon les intérêts.
 - **Suivi des flux** pour réguler la fréquentation et éviter les encombrements.
- *Exemple* : Le Louvre utilise des balises BLE dans certaines expositions temporaires pour guider les visiteurs via leur smartphone avec des commentaires audio automatiques.

La localisation indoor s'intègre aujourd'hui dans presque **tous les secteurs d'activité**, du plus critique (santé, sécurité) au plus commercial (détail, événementiel). Elle répond à des besoins précis : **guidage, suivi, analyse, accessibilité, sécurité**, et s'inscrit pleinement dans la dynamique des bâtiments connectés et intelligents. Grâce à ses multiples applications, elle transforme la manière dont nous **interagissons avec les espaces clos** et participe à l'amélioration continue des services.

1.4. Les différentes approches de la localisation indoor

La localisation indoor repose sur un ensemble de technologies permettant d'estimer la position d'un utilisateur ou d'un objet à l'intérieur d'un bâtiment. Contrairement à la localisation GPS, inopérante en intérieur, ces technologies **exploitent des signaux alternatifs** (radio, visuels, capteurs) pour compenser l'absence de satellite. Plusieurs approches sont utilisées, seules ou combinées, chacune ayant des avantages et des limitations.

1.4.1. Localisation par Wi-Fi

Le Wi-Fi, basé sur la norme IEEE 802.11, est l'une des technologies de communication sans fil les plus largement déployées dans les bâtiments. En plus de son usage pour l'accès Internet, il peut être exploité pour la géolocalisation en intérieur. Cette capacité repose notamment sur l'analyse des trames de balisage (*beacon frames*) émises périodiquement par les points d'accès (généralement toutes les 100 ms). Ces trames, captées par les terminaux situés dans la zone de couverture, contiennent des informations telles que le SSID, l'horodatage, et d'autres métadonnées utiles.

Deux approches principales sont utilisées pour la localisation via Wi-Fi. La première, dite *fingerprinting*, consiste à comparer les puissances de signal reçues (RSSI) à une base de données préalablement construite, contenant les signatures radio mesurées à différents emplacements. La seconde approche repose sur des modèles de propagation qui estiment mathématiquement l'intensité du signal attendu selon la position. Toutefois, établir une corrélation directe entre puissance reçue et distance n'est pas trivial, car elle dépend de nombreux facteurs environnementaux. Dans certains cas, une combinaison des deux méthodes améliore la précision, notamment dans des environnements complexes comme les bâtiments multi-étages.

Les versions récentes du Wi-Fi, comme la norme 802.11be (Wi-Fi 7), permettent des débits théoriques allant jusqu'à 46 Gb/s, une portée accrue (environ 70 mètres) et une meilleure gestion des interférences. Ces avancées technologiques ouvrent la voie à des applications exigeantes telles que la réalité augmentée ou virtuelle en temps réel, tout en renforçant la fiabilité des systèmes de localisation indoor.[3]

- **Avantages** : infrastructure déjà existante dans de nombreux bâtiments ; déploiement rapide.
- **Inconvénients** : précision variable (2 à 5 mètres) ; sensible aux interférences et à l'environnement (murs, objets métalliques).
- **Utilisation type** : localisation de visiteurs dans un centre commercial, d'étudiants dans un campus, visiteurs d'une foire, de Hadj perdus [4].



Figure 2: Localisation indoor basée sur Wi-Fi

1.4.2. Bluetooth Low Energy (BLE)

Le BLE repose sur des **balises (beacons)** placées dans le bâtiment, émettant un signal périodique que les smartphones peuvent capter. La position est déterminée via **la puissance du signal (RSSI)** ou par **trilatération** entre plusieurs balises. Les versions les plus récentes peuvent atteindre des distances allant jusqu'à 200 mètres en champ libre. Cependant, la portée réelle peut varier en fonction de facteurs tels que les obstacles physiques, les interférences électromagnétiques et la qualité des appareils.

- **Avantages** : faible consommation énergétique ; bon compromis coût/précision (1 à 3 mètres).
- **Inconvénients** : nécessite l'installation de balises ; les signaux peuvent être perturbés.
- **Utilisation type** : musées, hôpitaux, salons pour guider les visiteurs ou déclencher des contenus contextuels [5].



Figure 3: Systèmes de positionnement indoor basés sur BLE

1.4.3. RFID (Radio-Frequency Identification)

La RFID fonctionne avec des **étiquettes électroniques (tags)** et des **lecteurs**. Il existe des **tags passifs** (sans batterie) et **actifs** (avec alimentation), utilisés pour détecter la présence ou la position d'objets ou de personnes dans une zone définie.

- **Avantages** : très utile pour le suivi d'actifs ou de matériel; précision de détection fiable dans une petite zone.
- **Inconvénients** : localisation souvent binaire (présent / non présent) ; infrastructure dédiée requise.
- **Utilisation type** : logistique hospitalière (suivi des brancards, lits, matériels) ou industriel (inventaire en entrepôt) [6].



Figure 4: Étapes du processus d'identification RFID

1.4.4. Capteurs inertiels (IMU)

Les smartphones modernes embarquent plusieurs capteurs permettant de mesurer les mouvements et l'orientation du téléphone dans l'espace. Les plus couramment utilisés dans les systèmes de localisation, en particulier indoor, sont les **accéléromètres**, **gyroscopes**, **magnétomètres**. Ces capteurs permettent de suivre les mouvements du téléphone (distance, direction, inclinaison).

L'accéléromètre :

Est un capteur qui mesure l'accélération linéaire d'un objet sur les trois axes (X, Y, Z). Il détecte les **changements de vitesse** ou de **direction** du smartphone.

Fonctionnement :

- Il repose souvent sur des microsystèmes électromécaniques (MEMS).
- Le capteur détecte le déplacement d'une masse suspendue à l'intérieur du téléphone lorsqu'il est soumis à une accélération.
- Il mesure aussi l'accélération due à la gravité, ce qui permet de savoir si l'appareil est en position verticale, horizontale, inclinée, etc.

Applications :

- Détection de mouvement (pas, marche, course).
- Suivi de l'activité physique.

- Dead reckoning : estimation de la position à partir des mouvements.
- Orientation de l'écran (portrait/paysage).

Limites :

- Sensible au bruit.
- Biais accumulés avec le temps (drift).
- Ne fournit pas d'information sur la rotation.

Le gyroscope :

Mesure la vitesse angulaire, c'est-à-dire **la vitesse de rotation** du téléphone autour des trois axes (roulis, tangage, lacet).

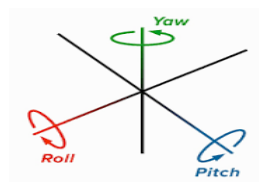


Figure 5 Roulis, tangage, lacet trois angles de rotation

Fonctionnement :

- Basé lui aussi sur des MEMS.
- Il détecte la rotation grâce à l'effet de Coriolis, produit par les mouvements de masses internes soumises à une rotation.
- Il **complète les données de l'accéléromètre** pour donner une vision dynamique de l'orientation du smartphone.

Applications :

- Calcul précis de la direction et de l'orientation.
- Amélioration du suivi de trajectoire indoor.
- Applications de réalité augmentée ou de réalité virtuelle.
- Stabilisation des caméras et des jeux 3D.

Limites :

- Dérive (drift) cumulative au fil du temps.
- Doit souvent être corrigé ou couplé à d'autres capteurs.

Le magnétomètre :

Mesure les champs magnétiques autour du smartphone, en particulier celui de la Terre, pour déterminer **l'orientation absolue par rapport au nord magnétique**.

Fonctionnement :

- Il détecte l'intensité et la direction des lignes de champ magnétique.
- Fonctionne comme une boussole électronique.
- Il est souvent combiné avec les deux autres capteurs pour un meilleur calcul de l'orientation absolue.

Applications :

- Détermination de l'orientation du téléphone par rapport au nord.
- Navigation indoor/outdoor (surtout dans les systèmes SLAM ou de cartographie).
- Aide à la calibration de l'orientation pour les jeux ou la réalité augmentée.

Limites :

- Très sensible aux interférences électromagnétiques (présentes dans les bâtiments).

Doit être calibré régulièrement pour rester fiable.

- **Avantages** : fonctionne sans infrastructure externe ; utile là où aucun signal n'est disponible.
- **Inconvénients** : accumulation d'erreurs sur la distance (dérive) ; nécessite des points de recalibrage (QR code, Wi-Fi, etc.).
- **Utilisation type** : suivi de trajet à partir d'un point de départ connu (ex : un visiteur scanne un QR code à l'entrée d'un bâtiment).

En pratique, ces trois capteurs sont souvent intégrés dans une **unité de mesure inertielle (IMU)**. Leur **fusion algorithmique** permet d'obtenir des mesures plus fiables et robustes :

Capteur	Mesure	Utilité principale
Accéléromètre	Accélération linéaire (X, Y, Z)	Détection de mouvement / activité
Gyroscope	Vitesse angulaire (rotation)	Orientation dynamique / direction
Magnétomètre	Champ magnétique (direction nord)	Orientation absolue / calibration

Grâce à cette fusion, il est possible de :

- Réaliser une **navigation sans GPS (dead reckoning)**.
- Suivre précisément une **trajectoire à l'intérieur d'un bâtiment**.
- Créer des **systèmes de cartographie et de localisation** fiables même sans signal Wi-Fi ou satellite.

Exemple d'utilisation pour la localisation indoor

Lorsque le GPS est inopérant (ex. : à l'intérieur d'un hôpital ou d'une usine), ces capteurs peuvent être utilisés pour :

1. Détecter les pas de l'utilisateur (**accéléromètre**).
2. Estimer la direction du déplacement (**gyroscope + magnétomètre**).

3. Mettre à jour la position à chaque pas (**technique de dead reckoning**).
4. **Corriger la dérive** en fusionnant avec d'autres signaux (WiFi, beacons, vision).[7]

1.4.5. UWB (Ultra Wide Band)

L'UWB est une technologie radio à très large bande permettant de mesurer le **temps de vol des signaux** entre un émetteur et un récepteur. Elle offre une **précision de localisation exceptionnelle (10 à 30 cm)**.

- **Avantages** : très grande précision ; faible interférence.
- **Inconvénients** : coût élevé ; nécessite une installation spécialisée.
- **Utilisation type** : localisation de robots dans une usine, systèmes de sécurité de haute précision.[6][8]

1.4.6. Vision par ordinateur

Cette approche utilise des **caméras** pour reconnaître des repères visuels (codes QR, marqueurs AR, éléments architecturaux) ou reconstruire l'environnement en 3D via des algorithmes comme le **SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)**.

- **Avantages** : précision élevée dans des environnements visuellement riches ; permet une navigation autonome.
- **Inconvénients** : dépend des conditions lumineuses ; gourmande en énergie et en calculs.
- **Utilisation type** : applications de réalité augmentée, robots de service, guidage dans un musée [9].

1.4.7. Localisation basée sur le Machine Learning

Les systèmes de localisation utilisent, de plus en plus, des **algorithmes d'apprentissage automatique (machine Learning)** pour estimer la position à partir de signaux complexes ou multi-sources. Par exemple, un réseau de neurones peut être entraîné à reconnaître des configurations de signaux Wi-Fi ou BLE propres à une zone précise.

- **Avantages** : capacité à s'adapter à des environnements dynamiques ; amélioration progressive avec l'usage.
- **Inconvénients** : nécessite une phase d'apprentissage et une base de données bien structurée.
- **Utilisation type** : systèmes intelligents dans des universités, centres commerciaux ou entrepôts connectés [10].

1.5. Cartographie et Annotation d'un bâtiment à plusieurs niveaux

La cartographie indoor est une étape essentielle dans la mise en œuvre d'un système de localisation en intérieur. Grâce à l'évolution technologique des smartphones, en particulier les iPhones récents, il est désormais possible de **générer des cartes précises d'espaces clos** à l'aide des capteurs embarqués. Cette méthode permet de modéliser les bâtiments à plusieurs niveaux de manière **autonome et peu coûteuse**, sans recourir à des équipements spécialisés.

Les capteurs comme l'IMU, le LiDAR, les caméras et l'altimètre barométrique jouent un rôle fondamental dans ce processus.

➤ Capteurs disponibles sur l'iPhone

Les capteurs d'iPhones peuvent être exploités dans une approche de cartographie mobile :

- **IMU (accéléromètre, gyroscope, magnétomètre)** : permet de détecter les déplacements, les changements d'orientation et de direction. Utile pour tracer le chemin emprunté et détecter les virages et montées d'escalier.
- **Altimètre barométrique** : permet de **détecter les changements d'altitude**, essentiels pour identifier les transitions entre étages.
- **Caméras** : utilisées pour la vision par ordinateur, la détection des éléments architecturaux (portes, murs, couloirs) ou encore la lecture de QR codes.
- **LiDAR (Light Detection and Ranging)** : disponible sur les modèles « Pro » d'iPhone, ce capteur permet de générer une **carte 3D très précise** de l'environnement intérieur.
- **Microphone**: peut aider à reconnaître certains environnements par leur ambiance sonore.
- **Bluetooth/Wi-Fi** : enregistre la présence de points d'accès ou de balises pour enrichir la carte avec des références de recalibrage.

➤ Processus de confection de la carte :

La création d'une carte indoor se déroule généralement en plusieurs étapes, où l'utilisateur se déplace physiquement dans le bâtiment en tenant son iPhone :

Parcours des différentes zones

L'utilisateur effectue un **trajet balisé ou libre** à travers les couloirs, escaliers, ascenseurs et salles. L'IMU trace les mouvements, le baromètre détecte les étages, et le LiDAR scanne les volumes et structures.

Reconnaissance des transitions d'étage

Le passage d'un niveau à un autre est automatiquement détecté par l'analyse combinée des données du gyroscope (**inclinaison**) et du baromètre (**variation de pression**). On peut aussi utiliser des **repères visuels** comme des panneaux ou QR codes placés aux entrées d'étage.

Génération de la carte 2D/3D

Les données sont ensuite fusionnées dans une application compatible (comme celles utilisant ARKit d'Apple, ou IndoorAtlas) pour **reconstituer une carte du bâtiment** :

- murs,
- pièces,
- portes,
- objets volumineux (meubles, guichets),
- escaliers et ascenseurs,
- corridors et sorties.

Cette carte peut être visualisée sur mobile, convertie en plan vectoriel, ou exportée vers une base de données de navigation.

➤ **Annotation des espaces**

Une fois la carte structurée, elle est enrichie avec des **annotations sémantiques** :

Nommage et catégorisation des pièces

Chaque zone peut être étiquetée avec son nom et sa fonction :

- « Salle de lecture »,
- « Bureau du chef département »,
- « Salle des séminaires »,
- « Accueil visiteurs ».

Définition des points d'intérêt

Des **points d'intérêt (POI)** sont ajoutés :

- ascenseurs, issues de secours, tableaux d'affichage, QR codes de recalibrage.

Zones d'accès restreint

Certaines zones peuvent être marquées comme :

- interdites au public,
- réservées au personnel,
- zones dangereuses (ex : locaux électriques ou techniques).

➤ **Itinéraires privilégiés**

Des **chemins optimisés** peuvent être prédéfinis :

- parcours pour PMR (personnes à mobilité réduite),
- chemin d'évacuation rapide,
- itinéraires courts entre services.

L'annotation peut se faire manuellement via une interface d'édition sur mobile ou desktop, ou partiellement automatiquement via des algorithmes de reconnaissance visuelle ou une base de données de configuration.

Grâce à l'exploitation des capteurs embarqués dans les iPhones, il est désormais possible de concevoir des **cartes indoor multi-étages détaillées, annotées et dynamiques**, directement depuis un appareil mobile. Cette approche permet de démocratiser la création de systèmes de localisation indoor en supprimant la dépendance aux équipements lourds et coûteux. Elle offre également une **grande flexibilité de mise à jour**, car les cartes peuvent être rééditées à tout moment selon les besoins opérationnels ou architecturaux [11], [12].

Conclusion

Aucune méthode ne répond seule à tous les critères (précision, coût, autonomie, simplicité). C'est pourquoi les systèmes modernes combinent souvent plusieurs approches pour compenser leurs limites. Le choix dépendra du **contexte d'usage**, du **budget**, et du **niveau de précision** attendu. L'intégration de l'intelligence artificielle tend à généraliser des **systèmes hybrides intelligents**, capables de s'adapter automatiquement à leur environnement.

CHAPITRE 02

Architecture d'un Système de Localisation Indoor.

Introduction

Après avoir exploré les principales approches de la localisation indoor dans le chapitre précédent, ce deuxième chapitre vise à approfondir l'étude de leur **architecture fonctionnelle**. L'objectif est de comprendre comment les différents composants (capteurs, dispositifs mobiles, logiciels, réseaux, etc.) interagissent pour fournir un service de localisation fiable et efficace.

Nous nous intéresserons aux couches techniques qui constituent une solution de localisation indoor complète : de la **collecte des données** jusqu'à la **présentation de la position à l'utilisateur final**, en passant par le **traitement** et l'**algorithme de positionnement**.

2.1 Architecture logicielle d'un système de localisation indoor

Un système de localisation indoor repose non seulement sur des capteurs et une infrastructure matérielle, mais aussi sur une **architecture logicielle robuste et modulaire**. Cette architecture permet de traiter les données en temps réel, d'estimer la position avec précision, de stocker les données, et d'interagir avec les utilisateurs via des interfaces intuitives.

Une bonne architecture logicielle est **scalable**, **sécurisée** et **capable** de s'adapter à différents environnements (bâtiment scolaire, hôpital, centre commercial, etc.). Elle est généralement divisée en plusieurs modules fonctionnels interconnectés.

2.1.1. Module de collecte de données

Ce module agit comme la **porte d'entrée** du système. Il récupère les informations issues des capteurs embarqués dans le smartphone (IMU, Wi-Fi, BLE, caméra, etc.) ou de l'infrastructure externe (balises, QR codes, serveurs).

Fonctionnalités :

- Accès aux capteurs matériels via les API Android/iOS.
- Filtrage initial des données brutes (ex : lissage du RSSI, suppression des bruits).
- Encodage et envoi sécurisé des données vers le module de traitement ou le serveur.

Exemples :

- Collecte des signaux Wi-Fi toutes les secondes.
- Lecture des QR codes via la caméra.
- Suivi inertiel par l'IMU.

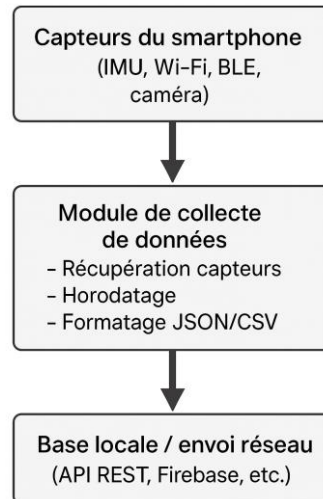


Figure 6: Architecture fonctionnelle du module

2.1.2. Module de traitement de la position

C'est le cœur algorithmique du système. Il transforme les données brutes en coordonnées spatiales dans le plan du bâtiment.

Algorithmes utilisés :

- **Fingerprinting** : comparaison avec une base d'empreintes Wi-Fi ou BLE.
- **Trilatération/Multilatération** : estimation à partir de distances.
- **Dead reckoning** : estimation du déplacement à partir d'un point initial.
- **SLAM** : localisation et cartographie simultanées.
- **Machine Learning** : classification et régression de position.

Il peut être nécessaire d'ajouter les traitements suivants pour augmenter la précision :

- **Fusion de capteurs** (ex : filtre de Kalman).
- **Gestion des erreurs** et recalibrage.
- **Estimation de l'incertitude**.

Exécution :

- Soit **localement** sur l'appareil (edge computing : par un objet connecté proche de la source des données. Cela permet de réduire la latence, d'améliorer la réactivité et de minimiser la dépendance au cloud centralisé),
- Soit **à distance** via un serveur ou le cloud (plus puissant mais dépendant de la connexion).

2.1.3. Base de données

La base de données joue un rôle central dans le stockage des informations :

Types de données stockées :

- Empreintes radio (Wi-Fi/BLE) pour le fingerprinting,
- Plans numériques du bâtiment (format vectoriel ou raster) :
 - Métadonnées : noms des salles, numéros d'étage, dimensions, connexions.
 - Coordonnées spatiales : chaque élément (salle, porte, escalier) est un objet géolocalisé dans un repère local (X, Y, Z).
 - Données vectorielles (GeoJSON, WKT) ou 3D (GLTF/OBJ).
- Localisation des balises, QR codes ou tags RFID,
- Historique des positions utilisateurs,
- Données d'usage pour l'analyse (fréquentation, parcours, etc.).

Technologies possibles :

- Base SQL (PostgreSQL, MySQL) pour les données structurées.
- Base NoSQL (MongoDB, Firebase) pour les données en temps réel et non structurées.
- Base SQL/PostgreSQL + PostGIS : pour données spatiales 2D/3D.
- MongoDB : pour des structures JSON semi-structurées.
- Cloud Firestore / Supabase / Firebase Realtime DB
- Stockage local pour mode offline.

2.1.4. Module de visualisation et d'interaction utilisateur

C'est l'interface **visible** par l'utilisateur. Ce module reçoit la position estimée et l'affiche sur un plan interactif avec éventuellement des fonctionnalités supplémentaires.

Fonctions typiques :

- Affichage de la position sur une carte du bâtiment,
- Guidage pas-à-pas (navigation indoor),
- Recherche de destinations (salle, bureau, collègue),
- Notification ou alerte contextuelle (ex : sortie d'une zone autorisée),
- Mode exploration ou simulation.

Technologies d'affichage :

- Moteurs de cartographie : Leaflet, Mapbox, OpenStreetMap.
- Réalité augmentée pour un guidage visuel.
- Intégration Flutter, React Native ou Swift pour l'application mobile.
- 2D : Leaflet + GeoJSON, ou Flutter + CustomPainter.
- 3D : three.js (WebGL), Unity3D Web Player, CesiumJS (si géoréférencé).
- Mapbox GL JS : bibliothèque **JavaScript** open source qui permet d'afficher et d'interagir avec des **cartes vectorielles** dynamiques dans un navigateur web. Elle est conçue pour la **visualisation de cartes hautement personnalisables** en 2D et 3D, directement rendues via **WebGL** (Graphics Library pour le web).

2.1.5. Communication et synchronisation

Ce module assure la **liaison entre les modules** et permet la mise à jour des données en temps réel.

Protocoles utilisés :

- **HTTP/REST** : pour les appels d'API.
- **WebSocket** : pour les flux en direct (position, alertes).
- **MQTT** : pour les architectures IoT.
- **Firebase** : pour la synchronisation mobile-cloud.

Exigences :

- Faible latence pour les applications temps réel.
- Chiffrement des données personnelles (ex : HTTPS, SSL/TLS).
- Authentification et gestion des droits (rôle utilisateur, accès aux données).

2.1.6. Services complémentaires

Ces services complètent l'architecture de base :

- **Mise à jour automatique** des plans et balises.
- **Historique des parcours** pour analyse et optimisation.
- **Système d'administration** : ajout de nouvelles salles, mise à jour des balises, gestion des utilisateurs.
- **Diagnostic et logs** pour le débogage et la maintenance.

L'architecture logicielle d'un système de localisation indoor repose sur une **interaction fluide** entre la collecte, le traitement, le stockage et la visualisation des données. Sa conception modulaire permet de **faciliter le développement, l'évolution et la maintenance** du système.

Cette architecture doit être pensée en fonction de la **technologie choisie** (Wi-Fi, BLE, inertiel, etc.), mais aussi du **contexte d'usage** (application médicale, éducative, logistique...). Dans le prochain chapitre, nous verrons comment implémenter concrètement un tel système au sein d'une structure fermée.

2.2 Algorithmes de localisation

Les algorithmes de localisation jouent un rôle central dans tout système indoor : ce sont eux qui transforment les **données brutes des capteurs** en une **position estimée dans l'espace**. Leur complexité varie selon la technologie utilisée (Wi-Fi, BLE, UWB, IMU, etc.), la précision attendue, les contraintes de calcul, et le niveau d'autonomie du système.

On peut regrouper les algorithmes de localisation en trois grandes familles : **géométriques**, **statistiques** et **intelligents (machine Learning)**.

2.2.1. Algorithmes géométriques

Ces méthodes reposent sur des principes mathématiques liés à la **géométrie euclidienne** pour calculer la position d'un objet à partir de mesures de distance ou d'angle.

A. Trilatération :

Elle consiste à estimer la position d'un point inconnu en mesurant la **distance** qui le sépare d'au moins **trois balises connues** (dans un plan 2D).

- Utilisée avec le **Wi-Fi** (RSSI), le **BLE** ou l'**UWB**.
- Repose sur la formule :

Limites : La précision dépend fortement de l'environnement (réflexions, interférences) et de la fiabilité des distances mesurées.[13]

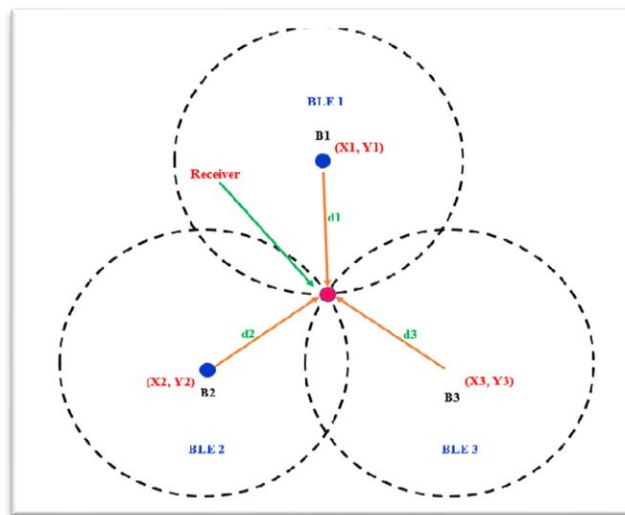


Figure 7: Technique de trilatération

B. Triangulation :

Utilise les **angles** entre les balises et l'utilisateur, plutôt que les distances. Cette méthode est surtout utilisée avec des capteurs de type **antennes directionnelles** ou **vision**.[13]

Multilatération (TDoA, ToF)

Estimation basée sur le **temps de propagation** des signaux.

- Exemple : avec l'**UWB**, la position est calculée en mesurant le **temps de vol** (Time of Flight) des ondes.
- Très précise, mais nécessite des **horloges synchronisées** et une **infrastructure coûteuse** [6].

2.2.2. Algorithmes statistiques

Ces méthodes utilisent la **probabilité**, les **moyennes** et l'**historique** pour estimer la position de l'utilisateur à partir d'un ensemble de données partiellement incertaines.

A. Fingerprinting (empreinte de signaux) :

Méthode très répandue avec le Wi-Fi et le BLE. Elle repose sur deux phases :

- **Phase d'apprentissage** : on mesure les niveaux de signaux (RSSI) en différents points du bâtiment pour créer une **base de données d'empreintes**.
- **Phase d'estimation** : la position de l'utilisateur est déterminée en comparant les signaux qu'il reçoit avec ceux de la base.[14]

Avantages :

- Assez précise (2 à 4 mètres).
- Fonctionne même dans des environnements complexes.

Inconvénients :

- Nécessite une **calibration manuelle longue**.
- La performance se dégrade si l'agencement du bâtiment est modifié (murs, mobilier).

B. Filtre de Kalman :

Algorithme récursif utilisé pour **suivre une position dans le temps**. Il prédit la position suivante à partir de la précédente et ajuste cette prédiction avec les nouvelles mesures.

- Très utilisé dans la **fusion de capteurs** (ex : inertiel + Wi-Fi).
- Offre une localisation fluide et corrigée.[15]

C. Filtre de particules :

Approche plus robuste mais plus coûteuse en calcul. Simule plusieurs hypothèses (particules) sur la position, puis élimine celles qui sont incompatibles avec les mesures.

- Plus adapté aux environnements **non linéaires** ou très bruités.
- Utilisé dans les systèmes **SLAM** (Simultaneous Localization and Mapping) [6].

2.2.3. Algorithmes d'apprentissage automatique

L'intelligence artificielle permet d'apprendre des **modèles complexes** de positionnement à partir de grandes quantités de données.

A. K-Nearest Neighbors (K-NN):

Méthode simple : on compare le vecteur de signaux actuel avec ceux de la base d'apprentissage, et on prend la moyenne des positions des K plus proches voisins.

- Facile à implémenter.
- Fonctionne bien pour les petites zones.[16]

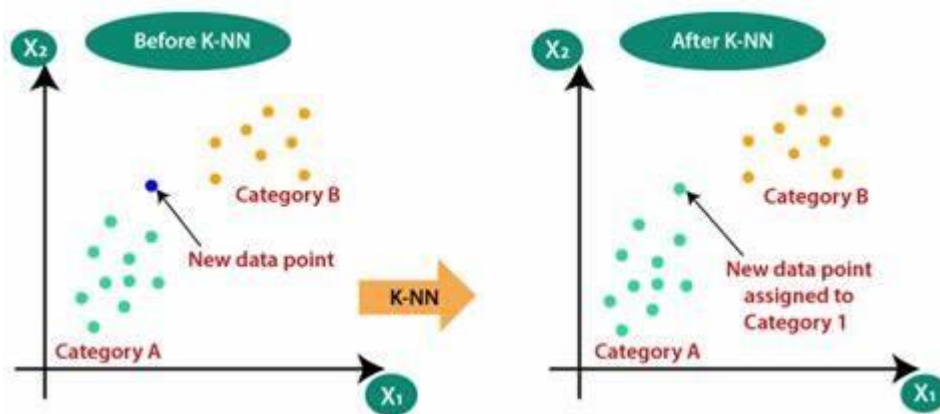


Figure 8: K plus proches voisins (K-NN)

B. Support Vector Machine (SVM) :

Utilisé pour **classer** les positions dans des zones prédéfinies (pièces, couloirs...). Efficace si la segmentation spatiale est pertinente. Le **SVM en localisation indoor** permet de **prédire la position d'un utilisateur** à partir de mesures capteurs, soit en **classant dans une zone** (pièces, couloirs...), soit en **prédiction directe (x, y)** avec un SVR (Support Vector Regression). C'est une solution efficace et adaptée pour des environnements bien cartographiés.

C. Réseaux de neurones (DNN, CNN, RNN) :

Les réseaux profonds peuvent apprendre une **relation complexe non linéaire** entre des données d'entrées qui sont des signaux (Wi-Fi, BLE, etc.) et des sorties attendues qui peuvent être des positions ou zones d'un bâtiment.

- Nécessite beaucoup de données et de puissance de calcul.
- Très bon potentiel en termes de précision (1 à 2 mètres).

Réseau	Utilisé pour...	Exemple d'entrée	Sortie attendue
DNN	prédire position ou zone	RSSI, capteurs	x, y ou étiquette
CNN	exploiter spatialité des signaux	image RSSI, plan	position ou heatmap
RNN	suivre un utilisateur en déplacement	RSSI ou IMU en série	trajectoire

D. Forêts aléatoires (Random Forest) :

Approche basée sur l'agrégation de plusieurs arbres de décision. Stable et robuste, bien adaptée aux données bruitées comme les RSSI [17].

2.2.4. Comparaison et choix de l'algorithme

Méthode	Précision	Infrastructure requise	Calcul	Usage recommandé
Trilatération	Moyenne (3-5 m)	Balises connues	Faible	BLE, Wi-Fi avec RSSI
Fingerprinting	Bonne (2-4 m)	Base d'empreintes	Moyen	Wi-Fi, BLE
Kalman	Très bonne (1-2 m)	Capteurs IMU	Moyen	Fusion inertiel + autre
K-NN / SVM	Moyenne à bonne	Données d'entraînement	Moyen	Petits environnements connus
Réseaux de neurones	Excellente (1 m)	Beaucoup de données	Élevé	Systèmes industriels / complexes
Random Forest	Bonne	Peu de données	Moyen	Wi-Fi, BLE

Le choix d'un algorithme de localisation dépend de plusieurs critères : la **précision** souhaitée, le **type de capteur utilisé**, les **ressources disponibles** (base d'apprentissage, puissance de calcul), et l'**environnement** (complexité architecturale, mobilité).

Dans la pratique, on opte souvent pour une **approche hybride**, combinant plusieurs algorithmes pour compenser les défauts des uns par les qualités des autres. Par exemple, un système inertiel avec recalibrage par fingerprinting Wi-Fi, ou une fusion SLAM + vision + BLE pour les environnements complexes.

2.3 Communication et transmission des données

La transmission des données est un élément central dans l'architecture d'un système de localisation indoor. Elle permet d'assurer la **circulation fluide de l'information** entre les capteurs, le module de traitement, la base de données, et l'interface utilisateur. Cette communication peut être locale, distante, ou hybride, selon que le traitement des données s'effectue sur le terminal ou sur un serveur distant.

2.3.1. Enjeux de la communication

Un bon système de transmission doit répondre aux critères suivants :

- **Faible latence** : essentielle pour la localisation en temps réel (guidage, alertes).
- **Fiabilité** : transmission continue et robuste même en cas de coupure réseau.
- **Sécurité** : protection des données personnelles (positions, identités).
- **Optimisation énergétique** : limitation des échanges pour préserver la batterie des appareils mobiles.

2.3.2. Protocoles de communication

Les systèmes de localisation indoor utilisent plusieurs types de protocoles selon les besoins :

➤ HTTP/REST :

Utilisé pour les échanges classiques entre l'application mobile et le serveur. Il permet d'envoyer des requêtes (GET/POST) pour récupérer ou enregistrer des données (ex : plan du bâtiment, historique de positions).

- **Avantages** : standard, facile à intégrer, sécurisé (HTTPS).
- **Limites** : pas conçu pour la communication en temps réel.

➤ WebSocket :

Protocole bidirectionnel idéal pour des échanges continus entre le client et le serveur. Utilisé pour les mises à jour en temps réel de la position, le suivi collaboratif ou les alertes immédiates.

- **Avantages** : faible latence, communication persistante.
- **Limites** : nécessite un serveur WebSocket dédié.

➤ MQTT (Message Queuing Telemetry Transport):

Protocole léger, très utilisé dans les architectures **IoT**. Il permet une communication **publish/subscribe** entre les composants (capteurs, mobile, serveur) avec très peu de données.

- **Avantages** : très faible bande passante, idéal pour les capteurs.
- **Limites** : nécessite un broker MQTT.

➤ Firebase Realtime / Firestore:

Services cloud proposés par Google, utilisés dans les applications mobiles pour la synchronisation instantanée des données (ex : position d'un utilisateur, état d'une salle).

2.3.3. Sécurité et confidentialité

La communication doit être protégée contre :

- L'interception (chiffrement avec TLS/SSL).
- L'usurpation d'identité (authentification par jeton).
- L'accès non autorisé (gestion des rôles utilisateurs).

L'usage d'un protocole sécurisé comme HTTPS ou WebSocket sécurisé (WSS) est indispensable pour **protéger la vie privée** des utilisateurs, notamment dans les lieux sensibles (hôpitaux, écoles).

2.3.4. Gestion de la connectivité

- En mode **offline**, certaines données (plans, empreintes) peuvent être préchargées et utilisées localement.
- En mode **hybride**, les données de localisation sont traitées localement, puis synchronisées dès qu'une connexion est disponible.
- Le système doit être capable de **gérer les pertes de signal** et de **retransmettre** les données manquantes.

La communication dans un système de localisation indoor ne se limite pas à l'échange de données ; elle conditionne la **performance**, la **réactivité**, et la **sécurité** de l'ensemble du système. Le choix des protocoles dépend du type d'usage (temps réel ou non), des contraintes réseau, et de l'architecture du système (locale, distante ou hybride). Une bonne gestion de cette couche permet d'offrir une expérience fluide et fiable à l'utilisateur final.

2.4. Intégration dans une application mobile

L'application mobile représente **l'interface principale entre l'utilisateur et le système de localisation indoor**. Elle permet non seulement de visualiser sa position dans le bâtiment, mais aussi d'interagir avec les services proposés : navigation, recherche de salles, notifications, sécurité, etc. L'intégration d'un système de localisation dans une application mobile requiert une conception technique rigoureuse et une attention particulière à l'ergonomie.

2.4.1. Accès aux capteurs du smartphone

L'application doit pouvoir accéder aux **capteurs embarqués** tels que :

- **IMU** (accéléromètre, gyroscope, magnétomètre) pour le suivi inertiel.
- **Wi-Fi** et **Bluetooth** pour la détection de points d'accès ou balises BLE.
- **Caméra** pour le scan de QR codes ou l'analyse visuelle (SLAM).
- **NFC/RFID** si l'environnement le permet.

L'accès à ces capteurs passe par les API fournies par le système d'exploitation (Android, iOS) et nécessite les **autorisations explicites** de l'utilisateur.

2.4.2. Affichage et interaction

L'application propose une interface graphique où l'utilisateur peut :

- Visualiser sa **position actuelle** sur un plan interactif.
- Sélectionner une **destination** (salle, service, personne).
- Suivre un **itinéraire guidé** (texte, flèches, ou réalité augmentée).
- Recevoir des **notifications contextuelles** (proximité d'un point d'intérêt, alerte de sécurité).

L'intégration peut se faire à l'aide de bibliothèques de cartographie telles que **Mapbox**, **Leaflet**, ou des frameworks 3D comme **ARCore** ou **ARKit** pour la réalité augmentée.

2.4.3. Traitement local ou distant

L'application peut :

- Traiter les données **localement** (algorithmes embarqués sur l'appareil, utile en mode offline).
- Communiquer avec un **serveur distant** pour récupérer les plans, positions de balises, et envoyer les données collectées.
- Adopter un **mode hybride** : traitement partiel local, avec synchronisation dès que la connexion est disponible.

2.4.4. Gestion de la vie privée et des permissions

L'application doit respecter les **règlements de protection des données** (ex. RGPD). Cela implique :

- Une **demande explicite d'autorisation** pour la géolocalisation, la caméra ou le Bluetooth.
- L'anonymisation ou le chiffrement des données transmises.
- La possibilité pour l'utilisateur de **désactiver le suivi** à tout moment.

2.4.5. Expérience utilisateur

Une application de localisation indoor efficace doit être :

- **Simple d'utilisation**, même pour un visiteur non familier avec l'environnement.
- **Rapide et fluide**, avec des temps de réponse courts.
- **Adaptée à différents rôles** : visiteur, employé, administrateur.
- Dotée de **modes d'accessibilité** (voix, contraste, taille de police) pour les personnes à besoins spécifiques.

L'intégration d'un système de localisation indoor dans une application mobile ne se limite pas à l'affichage d'une position : elle nécessite une **synergie entre le matériel, les algorithmes, la communication, et l'interface utilisateur**. Une bonne application mobile doit offrir une **expérience intuitive**, tout en assurant la **sécurité**, la **précision** et la **performance** du service de localisation.

2.5. Exemple d'architecture d'un système hybride

Les systèmes hybrides combinent plusieurs technologies de localisation afin de tirer parti des avantages de chacune tout en compensant leurs limites. Une des architectures les plus simples à déployer dans un environnement sans infrastructure radio consiste à associer :

- des **QR codes** (ou balises visuelles) placés stratégiquement dans le bâtiment ;
- et les **capteurs inertiels** (IMU) embarqués dans les smartphones.

Cette architecture ne nécessite ni réseau Wi-Fi, ni Bluetooth, ni matériel spécialisé. Elle s'appuie sur des composants déjà disponibles : la caméra du téléphone et ses capteurs de mouvement.

2.5.1. Description de l'architecture globale

L'architecture se compose de **quatre niveaux fonctionnels** :

Niveau 1 : Infrastructure physique

- QR codes placés à des emplacements stratégiques : entrées, intersections, points de recalibrage.
- Chaque QR code encode une information unique : identifiant, coordonnées XY sur le plan, orientation locale.

Niveau 2 : Dispositif utilisateur (smartphone)

- Capteurs IMU : accéléromètre, gyroscope, magnétomètre.
- Caméra : pour scanner les QR codes.
- Application mobile : interface utilisateur, traitement inertiel, visualisation.

Niveau 3 : Traitement local

- Lecture du QR code pour initialiser la position.
- Algorithme de **Dead reckoning** : estimation de la trajectoire en temps réel à partir de la position initiale.
- Recalibrage à chaque nouveau QR code rencontré.

Niveau 4 : Stockage et synchronisation

- Carte du bâtiment stockée localement ou téléchargée depuis un serveur.
- Historique de navigation enregistré localement ou envoyé au serveur pour analyse (optionnel).
- Base de données des QR codes, mise à jour par un administrateur via une interface web.

2.5.2. Scénario d'utilisation

1. L'utilisateur entre dans un bâtiment et **scanne un QR code** placé à l'entrée.
 - L'application récupère les **coordonnées de départ** et la **direction initiale**.
2. En se déplaçant, les **capteurs IMU** du téléphone suivent les mouvements de l'utilisateur.
 - Chaque pas détecté met à jour la position estimée.

- Les virages sont détectés grâce au gyroscope et au magnétomètre.
- 3. À un point de recalibrage, l'utilisateur scanne un **nouveau QR code**.
 - L'application **corrige la trajectoire** et réinitialise la position.
- 4. À tout moment, l'utilisateur peut consulter :
 - sa **position actuelle** sur un plan interactif ;
 - des **itinéraires** vers une salle ou un service ;
 - des **informations contextuelles** (ex. disponibilité de salles, directions).

2.5.3. Avantages du système hybride QR + IMU

Critère	Avantage
Coût	Très faible : pas de balises électroniques, uniquement des QR codes imprimés.
Simplicité	Déploiement rapide : pas de câblage, pas de configuration réseau.
Autonomie	Fonctionne offline , utile dans les bâtiments sans couverture réseau.
Précision relative	Bonne précision sur de courtes distances, corrigée régulièrement par QR.
Sécurité	Pas de transmission radio : peu d'exposition aux attaques extérieures.

2.5.4. Inconvénients et limitations

- La précision dépend fortement du **comportement de marche** de l'utilisateur.
- Le **drift inertiel** (erreur cumulative) nécessite un recalibrage fréquent (tous les 10–15 mètres).
- L'utilisateur doit être **formé** à scanner les QR codes régulièrement.
- Les **obstacles visuels** ou l'éclairage peuvent gêner le scan.[18]

2.5.5. Perspectives d'amélioration

Pour améliorer ce type d'architecture, on peut :

- Ajouter une **analyse visuelle** (SLAM) pour corriger la trajectoire entre deux QR codes.
- Coupler avec des **balises BLE** pour un recalibrage passif (sans interaction).
- Intégrer un système de **détection automatique des QR codes** via la caméra en continu.
- Exploiter le **machine Learning** pour ajuster dynamiquement le modèle de mouvement selon l'utilisateur (taille des pas, rythme, comportement).

L'architecture hybride QR code + IMU constitue une solution **pratique, économique et accessible** pour les déploiements indoor dans des structures fermées. Elle convient particulièrement aux environnements où l'ajout de matériel électronique est difficile ou coûteux. Malgré ses limites, cette approche permet de fournir un service de localisation fiable, surtout si elle est renforcée par des recalibrages fréquents et des algorithmes de traitement intelligents. C'est une solution idéale pour un **prototype fonctionnel** ou un **projet pilote** de localisation indoor.

Conclusion

Ce chapitre a présenté l'architecture complète d'un système de localisation indoor, depuis les composants matériels jusqu'à l'intégration mobile. Il montre qu'un tel système repose sur la collaboration de plusieurs couches techniques (capteurs, algorithmes, communication, interface) pour offrir une expérience fiable à l'utilisateur.

La diversité des approches disponibles permet de concevoir des systèmes adaptés à divers contextes et budgets. Dans les chapitres suivants, nous étudierons comment déployer une telle solution dans une structure fermée réelle, en détaillant les étapes de conception, de collecte de données et d'expérimentation.

CHAPITRE 3

Modélisation UML et spécifications du système

Introduction

Dans ce chapitre, nous établirons les spécifications fonctionnelles et non fonctionnelles de l'application de localisation en intérieur en recourant à la méthode UML (Langage de Modélisation Unifié). Notre objectif est de préciser les exigences du système en déterminant les intervenants concernés et en détaillant leurs relations avec l'application. Nous allons employer des diagrammes UML comme le diagramme de cas d'utilisation et le diagramme de classes pour illustrer visuellement le comportement prévu du système et sa configuration interne. Cette phase est essentielle pour garantir une compréhension partagée parmi tous les intervenants et pour orienter de manière efficace la phase de conception.

3.1 Utilisateurs et parties prenantes du système

Visiteur: Toute personne faisant usage de l'application pour se positionner dans un espace clos (bâtiment, campus, etc.).

Employé : Personnel d'une entité de type organisation (université, entreprise, hôpital, etc.) ayant accès à l'application pour localiser des salles, se repérer dans le bâtiment, ou accéder aux disponibilités d'espaces.

Administrateur : Responsable d'un bâtiment public (université, centre commercial, entreprise, aéroport, hôpital, etc.) désireux de gérer les points d'intérêt, les flux de visiteurs et d'actualiser les données via l'application.

Système : L'application mobile, qui collecte, analyse et fournit des renseignements de localisation au regard du profil de l'utilisateur (visiteur, employé, administrateur...).

3.2 Description des besoins utilisateurs et système

3.2.1 Fonctions attendues de l'application

Les besoins fonctionnels incluent l'ensemble des fonctions fondamentales que le système doit réaliser pour satisfaire les exigences de l'utilisateur final. Ils définissent la manière dont doit se comporter et réagir l'application. Ils constituent ainsi la référence indispensable pour le développement et la validation de la solution.

Les besoins fonctionnels que nous avons identifiés sont :

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

BF2 : Permettre de positionner le visiteur par rapport au plan du bâtiment.

BF3 : Permettre au visiteur 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

BF6 : Donner à l'administrateur la possibilité d'ajouter ou de modifier les plans du bâtiment, ainsi que de gérer les QR codes associés aux points d'accès ou de localisation.

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 :

- **Besoins matériels** : Le système doit s'exécuter de la même façon sur les différentes catégories de smartphones Android disponibles sur le marché.
- **Besoins de déploiement** : Le système doit :
 - Assurer la facilité de la mise en place et du déploiement de l'application de localisation indoor.

- **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.
 - **Précision** : La précision du système doit être bornée entre 2 et 3 mètres.
 - **Besoins de disponibilité/fiabilité** : Le système doit :
 - être disponible pour les utilisateurs lorsqu'ils le demandent, donc une utilisation 24/24 heures, 7/7.
 - **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.).
 - **Besoins de maintenance** : Le système doit être facile à installer et à maintenir.
 - **Besoins de flexibilité** : Le système doit être souple pour une extension future.
 - **L'ergonomie des interfaces** : Le module doit présenter une interface claire, ergonomique et intuitive.

3.3 Identification et analyse des besoins du système

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 classe

Ce diagramme montre la structure statique du système : les classes, leurs attributs, leurs méthodes et les relations entre elles.

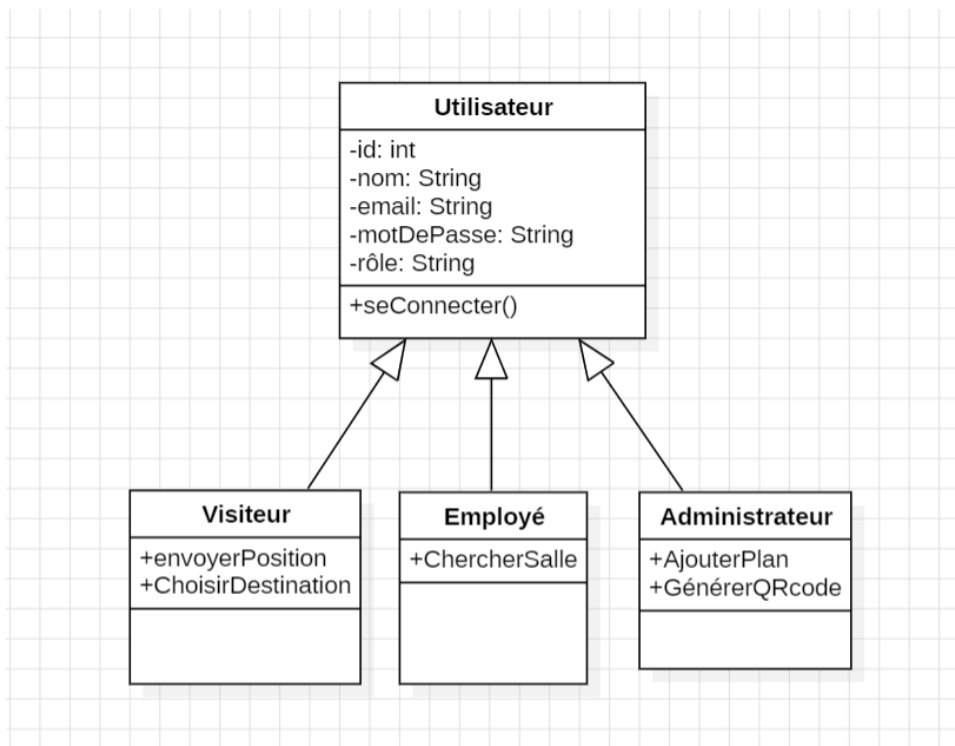


Figure 9: Diagramme de Classe

3.3.2 Diagramme de cas d'utilisation

Ce diagramme illustre les interactions entre les différents types d'utilisateurs et les principales fonctionnalités du système.

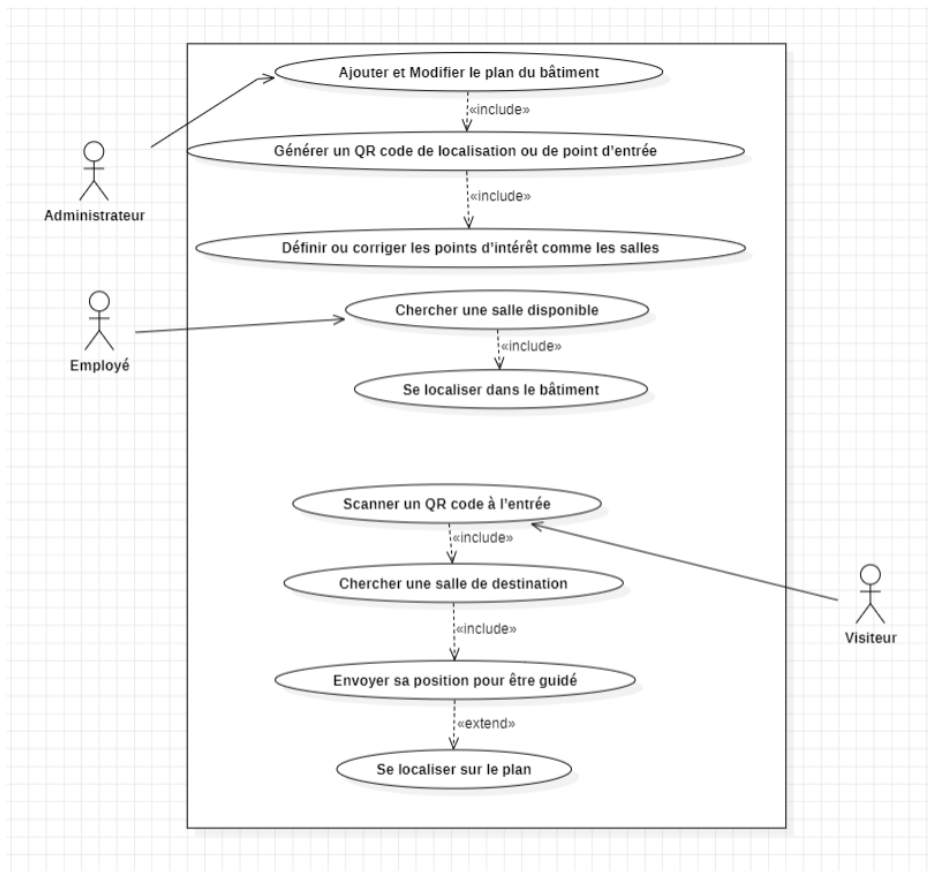


Figure 10: Diagramme de Cas d'utilisation

3.3.3 Diagramme d'activités

Lorsque le visiteur pénètre dans le bâtiment, son premier acte consiste à scanner un QR code dont l'emplacement est signalé à l'entrée. Ce scan permet de participer au démarrage du système de navigation intégré à l'application. Dès lors, le système est capable de déterminer la position de départ du visiteur automatiquement au moyen des informations du QR code, comme des coordonnées GPS ou d'autres informations de localisation précises. L'utilisateur saisi alors sa destination sur l'interface de l'application, qui produit alors un chemin optimal représenté sous la forme d'une carte numérique du bâtiment. La navigation est rendue interactive grâce à la réalité augmentée (AR), qui permet d'accompagner le visiteur jusqu'à sa destination en temps réel.

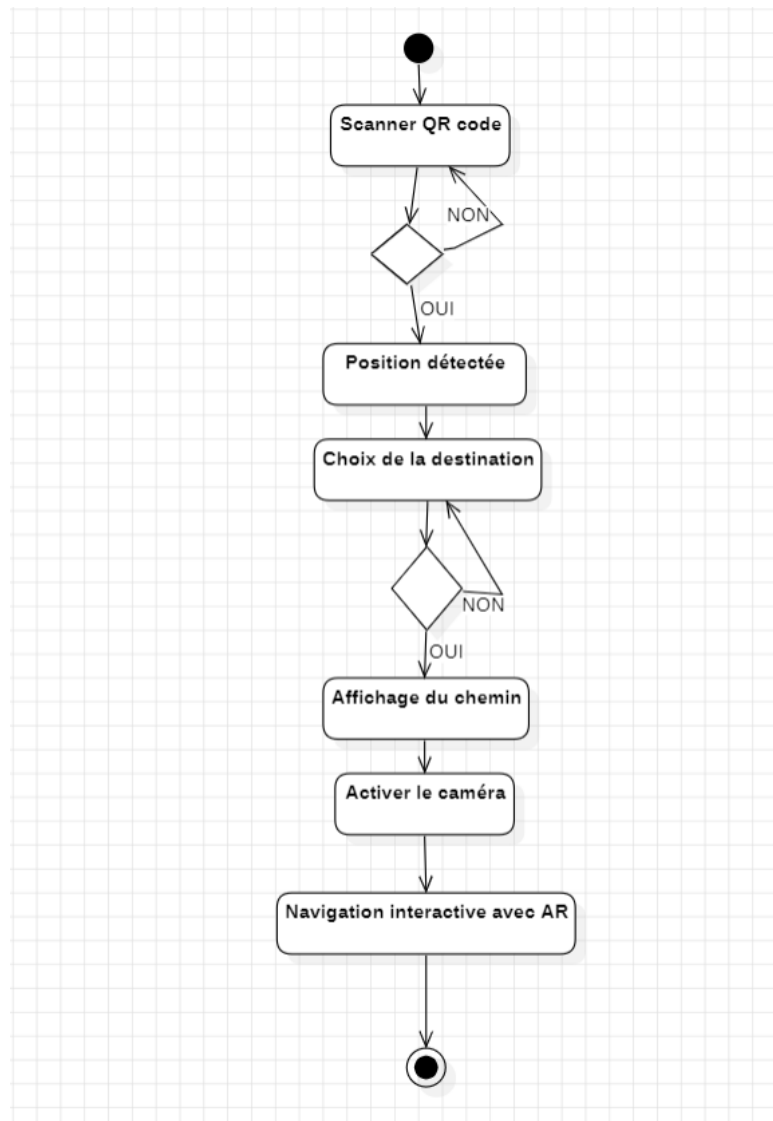


Figure 11: Diagramme d'activité

Conclusion

Les différents diagrammes exploitant spécialement la notation UML nous ont permis de structurer clairement les exigences du système de localisations en intérieur. En identifiant les acteurs et en les représentant à l'aide du diagramme de cas d'utilisation, nous avons su clairement cerner les fonctionnalités principales attendues. Le diagramme de classes, quant à lui, a permis de poser les bases de la structure logique du système, et de suivre logiquement vers la phase de conception technique. D'une part, la structure de l'application a été rationalisée, tandis que d'autre part le fonctionnement des processus métier a été rendu plus visible par l'ajout du diagramme d'activité qui permet de suivre le déroulement dynamique des différentes étapes d'un scénario de navigation à l'aide du QR code, donc d'orienter de manière plus pertinente le fonctionnement système attendu.

CHAPITRE 04

Conception technique et développement de l'application

Introduction

Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre technique du système de navigation intelligent. Après avoir défini les besoins fonctionnels et les objectifs de l'application, nous abordons ici la phase de concrétisation technique du projet.

Nous décrivons d'abord l'architecture hybride adoptée, combinant la géolocalisation GPS pour les espaces extérieurs et les QR codes pour les environnements intérieurs. Ensuite, nous détaillons la modélisation de la base de données, les choix technologiques et les langages utilisés. Enfin, nous présentons l'environnement matériel et logiciel ayant permis le développement, ainsi que les outils de travail sélectionnés pour assurer la gestion, la modélisation et la validation de l'application. Ce chapitre illustre ainsi la transition de la conception à la réalisation concrète de l'application.

4.1 Planification et structuration technique

4.1.1 Approche hybride de navigation et architecture système

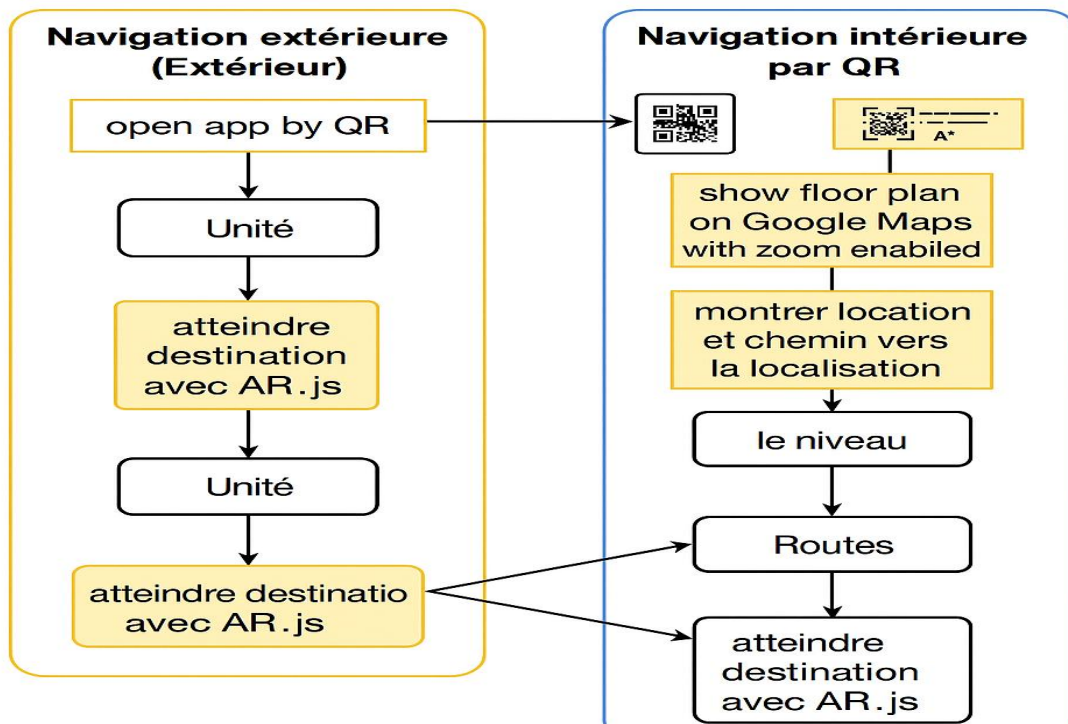


Figure 12: Système de navigation QR et AR.js (intérieur/extérieur)

Ce schéma illustre le processus complet de navigation hybride proposé par l'application, en combinant la navigation extérieure (en plein air) et la navigation intérieure (dans les bâtiments), tout en intégrant les technologies QR et AR.js.

Navigation extérieure (Extérieure) :

L'utilisateur commence par **ouvrir l'application via un code QR** placé à l'entrée du site. Ensuite, il sélectionne une **unité** (comme un bâtiment ou un département). L'application

calcule et affiche le chemin vers cette unité en utilisant Google Maps. Une fois proche de l'entrée du bâtiment, l'utilisateur est guidé visuellement grâce à **AR.js** pour atteindre la destination extérieure. Ensuite, une **deuxième sélection de l'unité** peut être faite pour entrer dans le bâtiment et continuer la navigation.

Navigation intérieure (Intérieure) :

Dès que l'utilisateur est à l'intérieur, il **scanne un QR code** placé dans la structure. Cela déclenche l'affichage du **plan de l'étage (floor plan)** sur Google Maps avec la fonction de zoom activée. Ensuite, l'application affiche la **position actuelle** et le **chemin vers la destination** souhaitée. L'utilisateur sélectionne le **niveau (étage)**, puis le système calcule l'**itinéraire (route)** à suivre. Finalement, l'utilisateur atteint la **destination intérieure** grâce à une visualisation **en réalité augmentée (AR.js)**, lui offrant une orientation précise étape par étape.

Connexion entre les deux parties:

La navigation intérieure commence automatiquement **après l'arrivée à l'unité extérieure**. Ainsi, le passage d'un environnement extérieur à intérieur est fluide et entièrement assisté par les QR codes et la technologie AR.

Ce diagramme représente donc un système de navigation intelligent, combinant géolocalisation, reconnaissance visuelle et réalité augmentée pour offrir une expérience de guidage complète à l'utilisateur.

4.1.2 Modélisation des données et structure de la base

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 Technologies et outils de développement

4.2.1 Langages et frameworks adoptés

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 Architecture client-serveur modulaire

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 Matériel et environnement de test

➤ Configuration matérielle utilisée pour le développement et les tests

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.

➤ Outils et plateformes logicielles adoptés

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.

➤ Outils de gestion, de modélisation et de validation

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 Phases de développement : du prototype à la démonstration

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.

Administrateur :

Page d'accueil de l'application NaviAR :

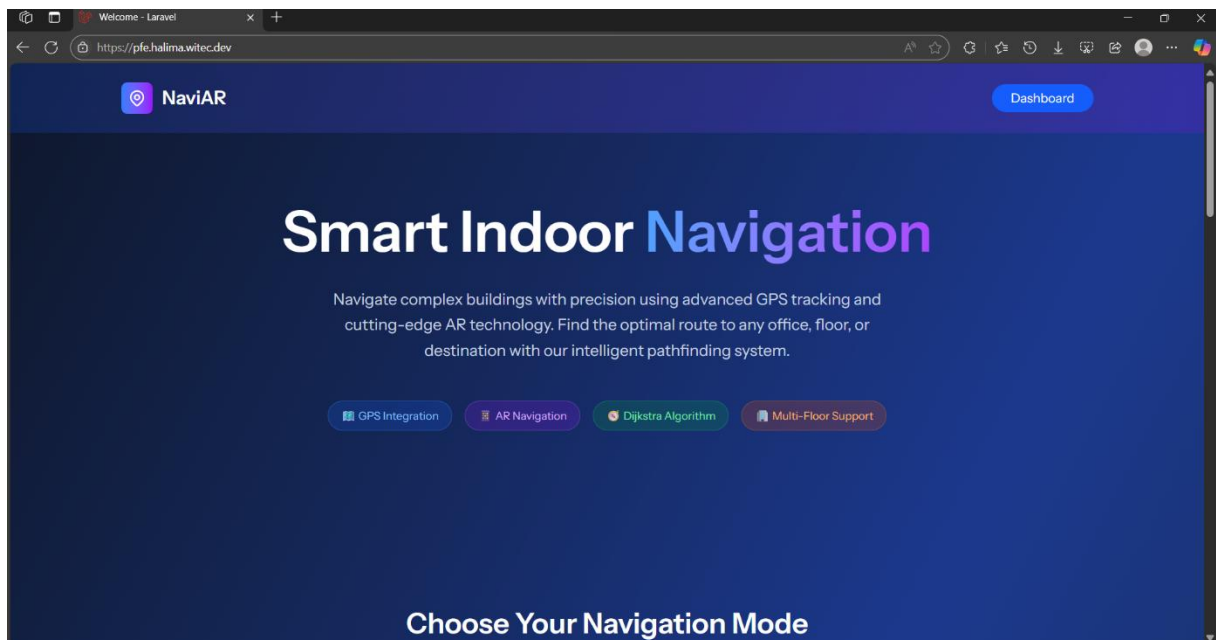


Figure 13: Interface d'accueil de l'application NaviAR

Cette capture montre la page d'accueil principale de l'application web *NaviAR*. Elle introduit les fonctionnalités clés de l'application de navigation intelligente dans les bâtiments complexes.

Parmi les technologies et fonctionnalités mises en avant, on retrouve :

- GPS Integration : pour la navigation extérieure.
- AR Navigation : utilisation de la réalité augmentée pour le guidage visuel.
- Dijkstra Algorithm : algorithme utilisé pour calculer le chemin le plus optimal.
- Multi-Floor Support : prise en charge de plusieurs étages dans les bâtiments.

Cette page permet aux utilisateurs de comprendre immédiatement la finalité de l'application et les outils techniques sur lesquels elle repose.

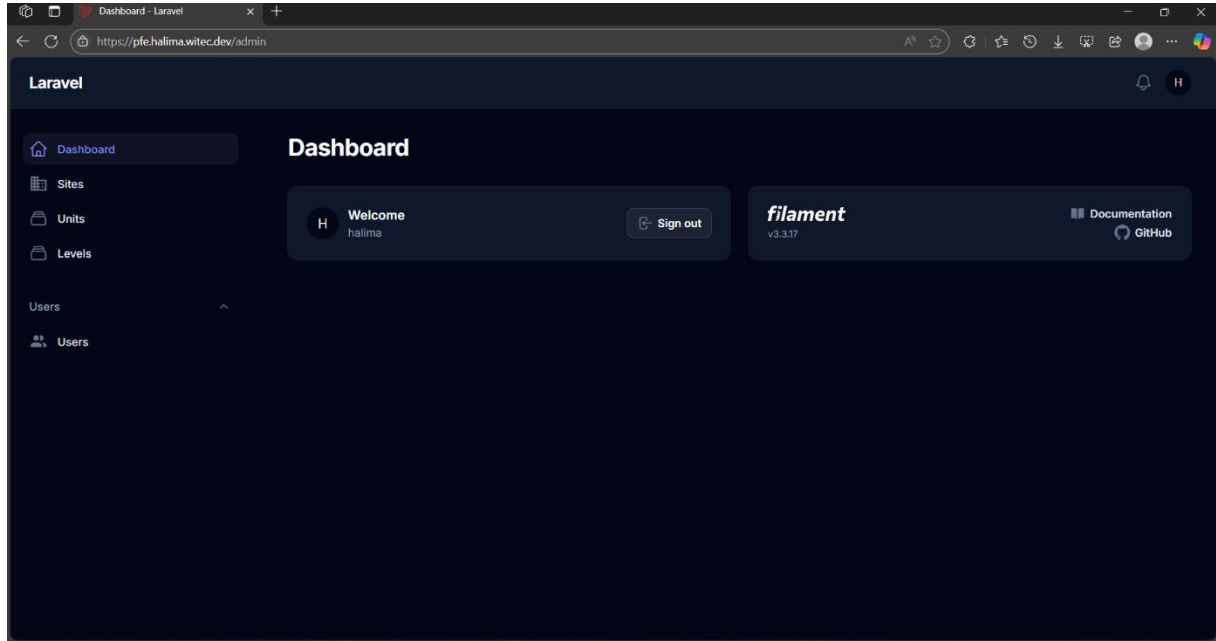


Figure 14: Tableau de bord de l'administrateur développé avec Laravel et Filament.

L'interface permet de gérer les différentes entités essentielles de l'application :

- Sites : les structures ou bâtiments à géolocaliser (ex : université, hôpital...).
- Unités : les départements ou sections internes de chaque site.
- Levels : les différents étages des bâtiments.
- Users : les utilisateurs enregistrés dans le système (visiteurs, employés, administrateurs).

Le tableau de bord offre une vue claire et centralisée pour contrôler et configurer le système. L'interface affiche aussi le nom de l'utilisateur connecté (Halima), ainsi qu'un bouton de déconnexion sécurisé.

Gestion des sites géographiques dans NaviAR :

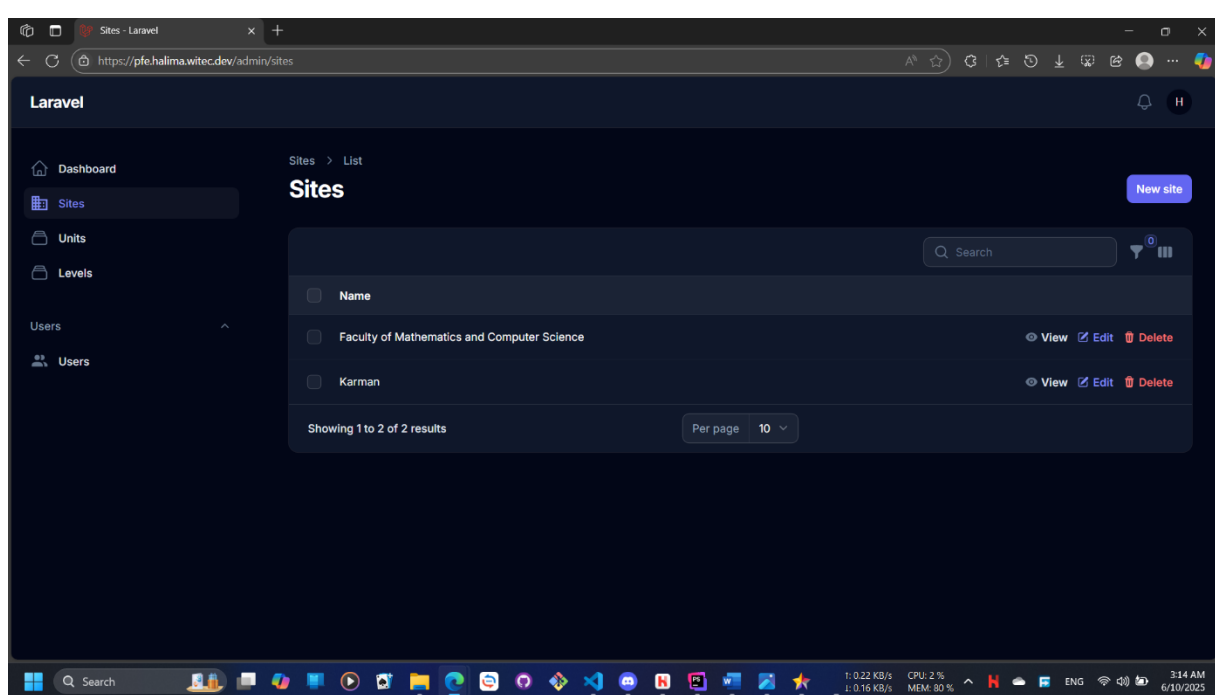


Figure 15: Interface de gestion des sites dans l'espace d'administration.

Cette capture d'écran présente l'interface d'administration dédiée à la gestion des sites géographiques dans l'application NaviAR. Un site représente une entité physique comme une faculté, un bâtiment ou un campus (ex. : *Faculty of Mathematics and Computer Science*, *Karman*).

L'administrateur peut:

- Visualiser les sites enregistrés.
- Ajouter un nouveau site avec le bouton "New site".
- Modifier (Edit) ou supprimer (Delete) un site existant.
- Chercher des sites à l'aide de la barre de recherche.

Cette fonctionnalité est essentielle pour organiser la navigation dans plusieurs structures ou établissements à partir d'une seule plateforme centralisée.

Gestion des unités d'un site dans l'application NaviAR :

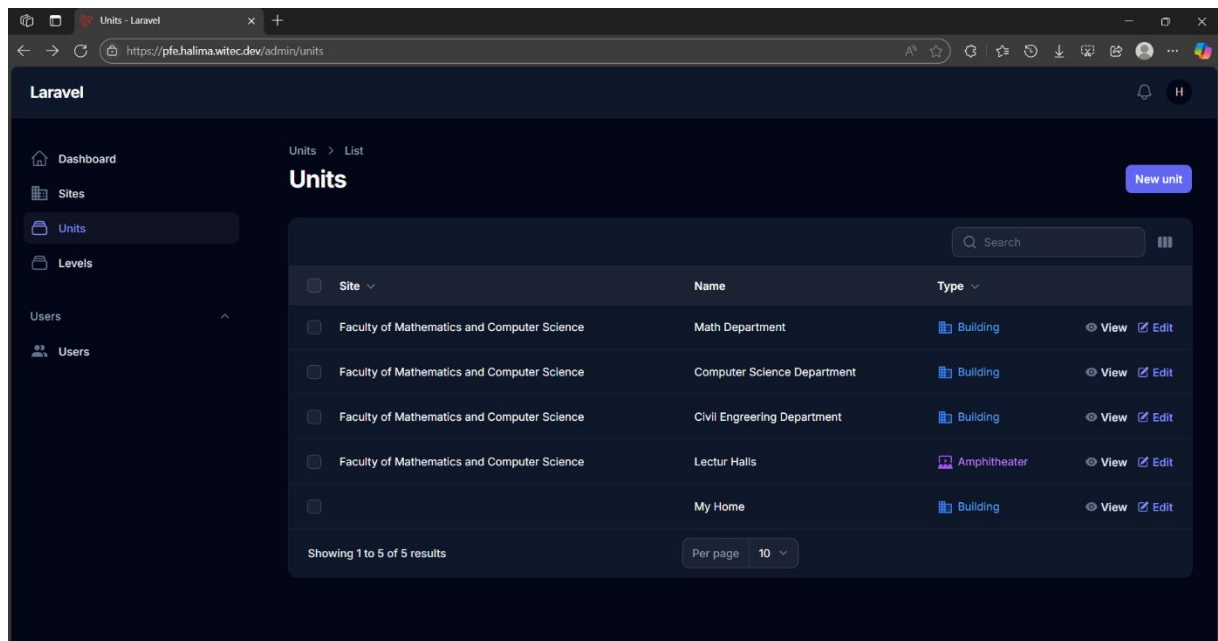


Figure 16: Interface de gestion des unités associées à un site spécifique.

Cette capture d'écran présente la gestion des unités (ou sous-sections) rattachées à un site sélectionné (par exemple une faculté ou un campus).

Chaque unité représente une entité physique spécifique à l'intérieur du site, comme :

- Un département académique (ex. : *Math Department*, *Computer Science Department*),
- Un bâtiment administratif ou un amphithéâtre (*Lectur Halls*).

Les colonnes affichent :

- Le nom de l'unité
- Le type d'unité (bâtiment, amphithéâtre, etc.)
- Les actions associées : affichage, modification ou suppression.

Un bouton "New unit" permet d'ajouter une nouvelle unité au site.

Cette organisation modulaire facilite la navigation dans des structures complexes en divisant chaque site en unités clairement identifiées.

Affichage du chemin extérieur sur carte Google Maps :

Cette image montre l'affichage d'un parcours extérieur entre plusieurs points d'intérêt dans le

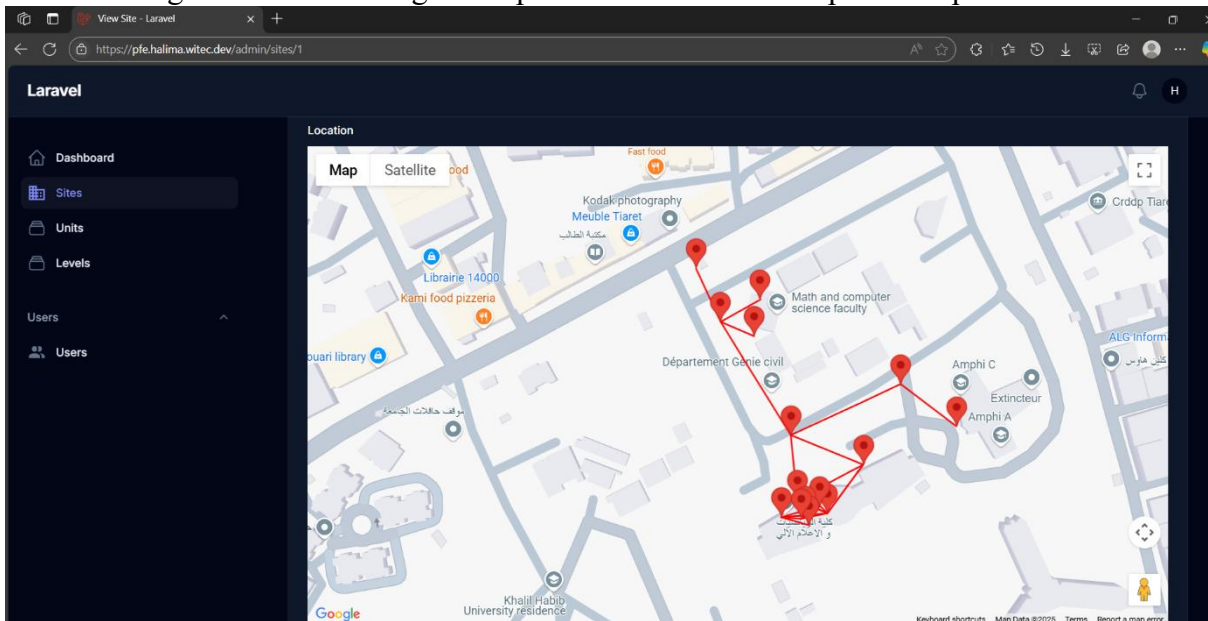


Figure 17: Génération automatique d'itinéraires extérieurs entre unités avec Google Maps.

site universitaire. Les marqueurs rouges représentent des emplacements clés, et les lignes rouges relient ces points pour indiquer le chemin optimal à suivre à l'extérieur du bâtiment.

Vue satellite des localisations extérieures :

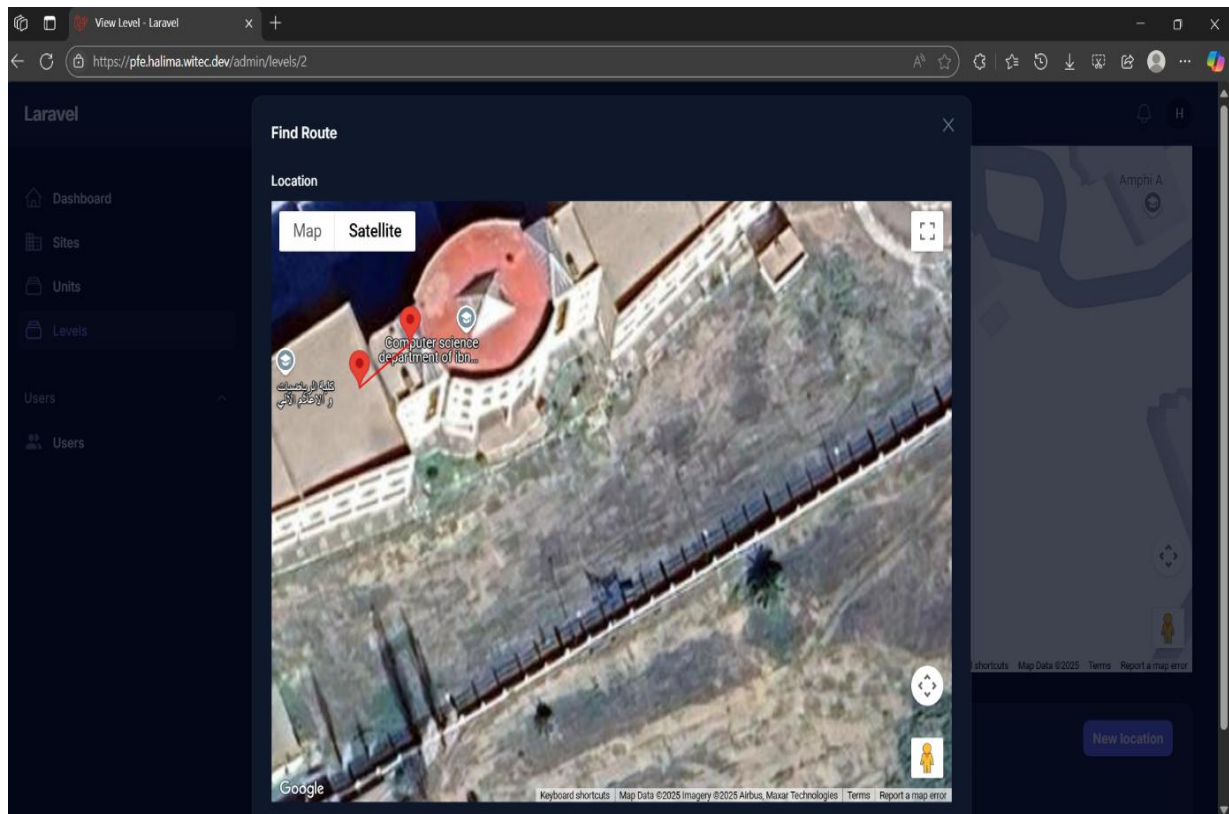


Figure 18: Localisation des accès en vue satellite pour la navigation intérieure

Cette capture présente une vue satellite détaillée d'un bâtiment, où les marqueurs indiquent les emplacements extérieurs associés à l'unité « Computer Science Department ». Cette vue facilite la précision des points GPS avant d'entrer dans la navigation intérieure.

Affichage d'un étage avec ses emplacements internes :

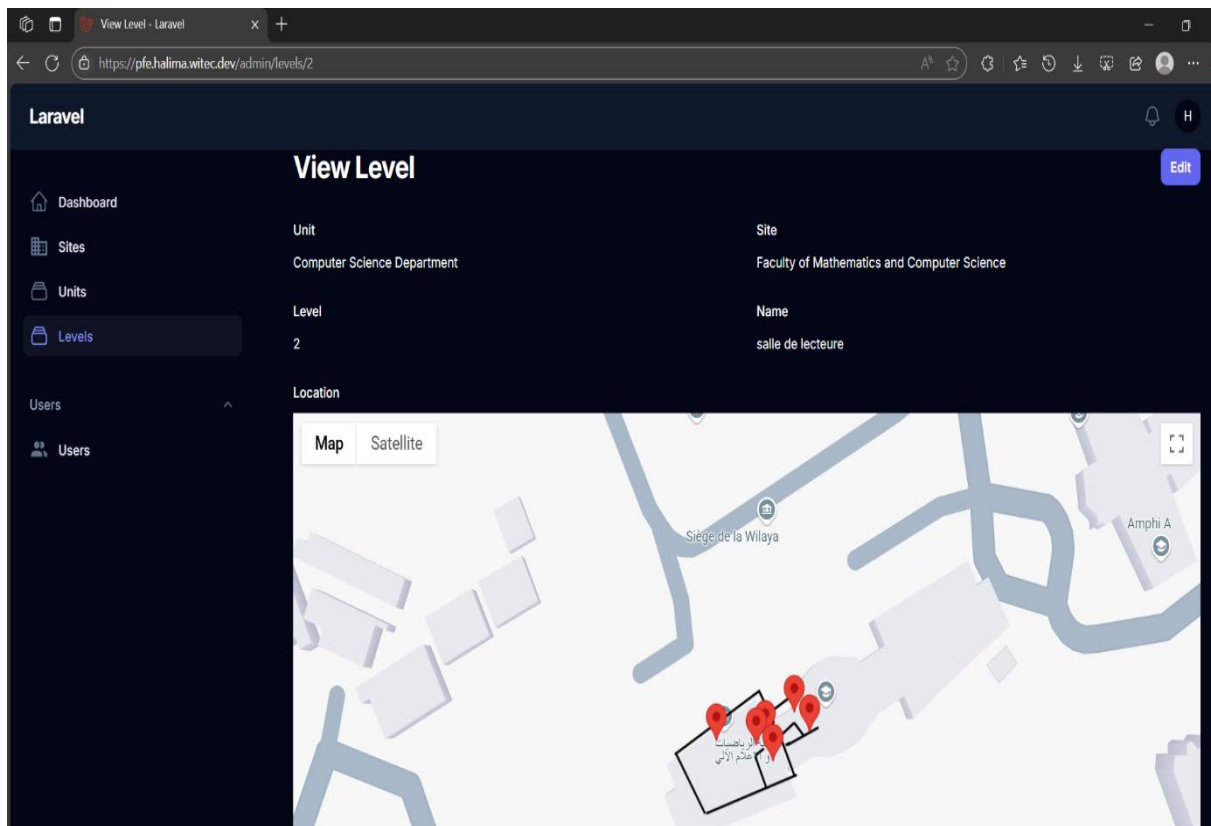
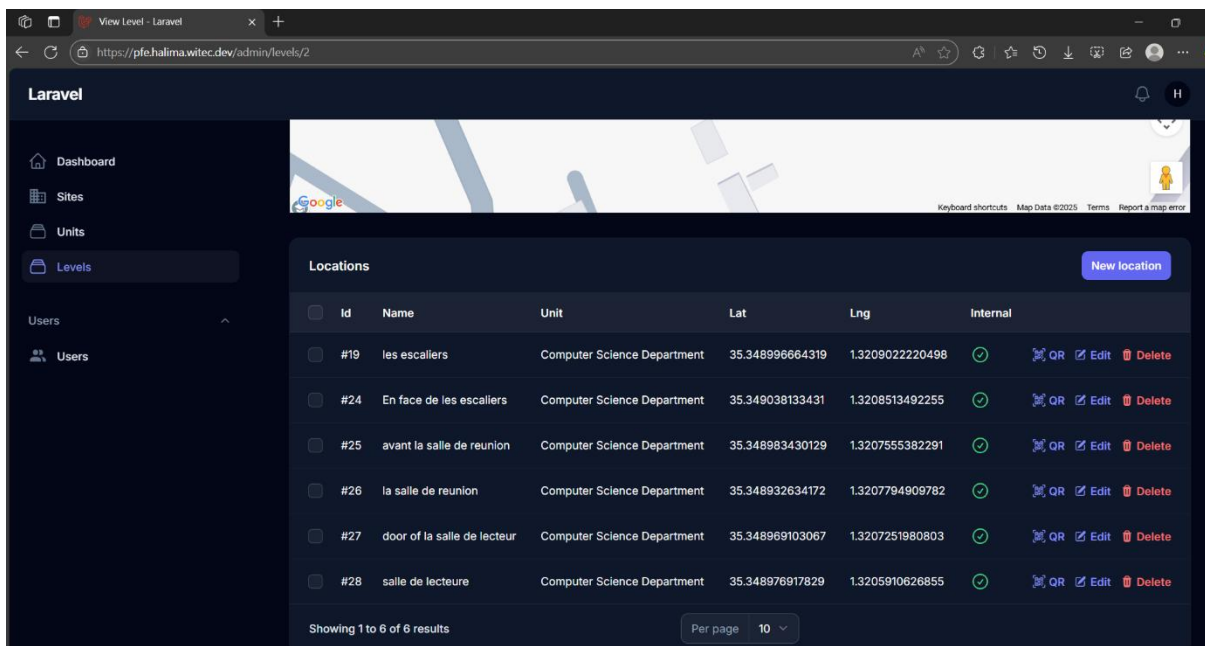


Figure 19: Visualisation des emplacements internes à l'étage 2 d'un bâtiment universitaire pour le guidage intérieur.

Cette image affiche le niveau 2 du département d'informatique. Les points rouges représentent différentes localisations à l'intérieur de cet étage (ex. : salles, escaliers). L'administrateur peut les visualiser pour configurer la navigation intérieure étage par étage.

Gestion des points de localisation internes par étage :



<input type="checkbox"/>	Id	Name	Unit	Lat	Lng	Internal	
<input type="checkbox"/>	#19	les escaliers	Computer Science Department	35.348996664319	1.3209022220498	<input checked="" type="checkbox"/>	QR Edit Delete
<input type="checkbox"/>	#24	En face de les escaliers	Computer Science Department	35.349038133431	1.3208513492255	<input checked="" type="checkbox"/>	QR Edit Delete
<input type="checkbox"/>	#25	avant la salle de reunion	Computer Science Department	35.348983430129	1.3207555382291	<input checked="" type="checkbox"/>	QR Edit Delete
<input type="checkbox"/>	#26	la salle de reunion	Computer Science Department	35.348932634172	1.3207794909782	<input checked="" type="checkbox"/>	QR Edit Delete
<input type="checkbox"/>	#27	door of la salle de lecteur	Computer Science Department	35.348969103067	1.3207251980803	<input checked="" type="checkbox"/>	QR Edit Delete
<input type="checkbox"/>	#28	salle de lecteur	Computer Science Department	35.348976917829	1.3205910626855	<input checked="" type="checkbox"/>	QR Edit Delete

Showing 1 to 6 of 6 results

Per page 10

Figure 20: Liste des localisations internes avec génération de QR codes pour la navigation intérieure par scan.

Cette interface permet à l'administrateur de gérer les différentes positions internes dans un bâtiment (ex. : escaliers, salle de réunion, etc.). Chaque ligne affiche les coordonnées GPS (latitude/longitude), l'unité associée, et permet de générer le QR code correspondant à chaque point.

Visiteur :



Figure 20 : Écran d'accueil de l'utilisateur sur mobile.

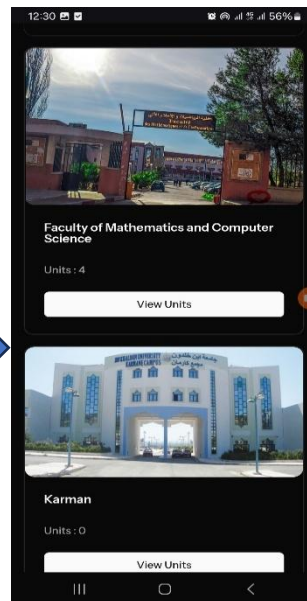


Figure 21 : Liste des sites disponibles pour la navigation

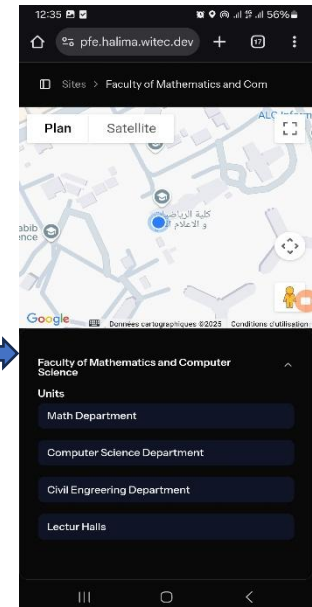


Figure 22 : Affichage de la localisation de l'utilisateur et des départements sur carte Google.

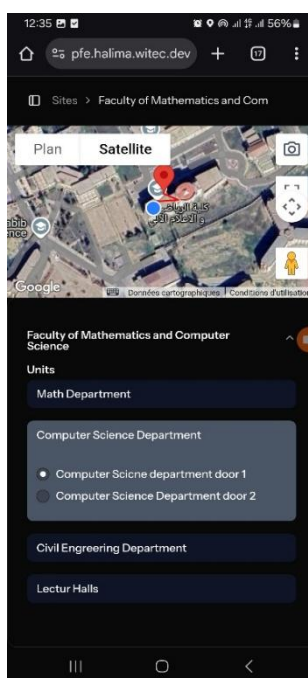


Figure 23 : Sélection précise de l'accès d'un département pour une navigation ciblée.

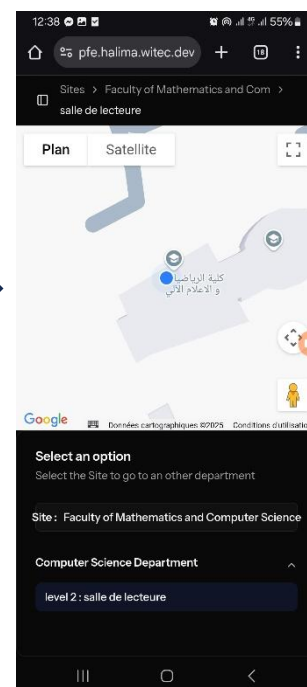


Figure 24 : Choix du niveau à visiter dans le bâtiment pour activer la navigation intérieure.

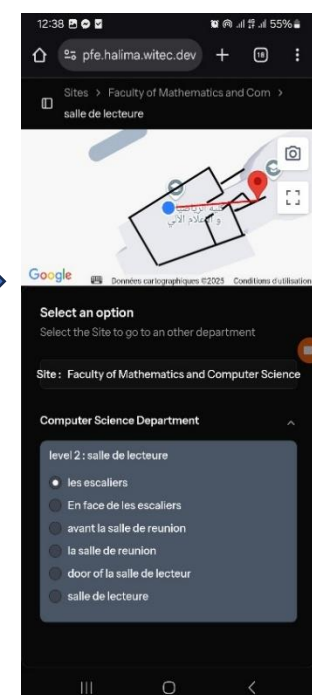


Figure 25 : Sélection d'un point et guidage interne sur plan



Figure 26 : Affichage en réalité augmentée d'un chemin dans un couloir intérieur pour assister la navigation.

Le processus de navigation dans l'application NaviAR suit une séquence intuitive illustrée à travers plusieurs étapes. la figure 1 présente l'écran d'accueil de l'application, mettant en avant ses fonctionnalités principales telles que la navigation GPS, la réalité augmentée (AR), le support multi-étages et l'algorithme de Dijkstra pour le calcul des itinéraires. Ensuite, comme le montre la figure 2, l'utilisateur peut choisir un site parmi plusieurs disponibles, tels que la Faculté de mathématiques ou le campus Karman. Une fois le site sélectionné, la figure 3 affiche la position actuelle de l'utilisateur sur la carte (point bleu), ainsi que les différentes unités internes accessibles dans ce site.

Dans la figure 4, l'utilisateur sélectionne une porte d'entrée spécifique dans l'unité choisie, par exemple « Door 1 » ou « Door 2 » dans le département d'informatique. Une fois à l'intérieur, comme illustré dans la figure 5, il choisit le niveau (ex. : niveau 2 – salle de lecture) où se trouve la destination souhaitée. L'image 6 combine ensuite deux étapes essentielles : la sélection d'un point précis à atteindre (comme une salle ou un escalier), suivie par la génération automatique du chemin optimal sur le plan de l'étage. Ce parcours est calculé en fonction de la position actuelle de l'utilisateur et permet une orientation visuelle claire. Enfin, la figure 7 illustre la phase finale de navigation, où une ligne bleue virtuelle apparaît à l'écran via la caméra du téléphone pour guider l'utilisateur en réalité augmentée (AR.js) vers sa destination finale à l'intérieur du bâtiment.

Conclusion

Ce chapitre a permis de détailler l'ensemble des choix techniques et des étapes de développement qui ont conduit à la réalisation de l'application NaviAR. L'architecture hybride retenue a démontré son efficacité pour offrir une navigation fluide entre les environnements intérieurs et extérieurs, tandis que les technologies choisies (Laravel, AR.js, Google Maps API...) ont assuré une intégration cohérente des fonctionnalités essentielles.

La structuration modulaire de l'application et les outils utilisés ont facilité le développement, les tests, ainsi que l'adaptabilité du système à différentes structures. Ces fondations solides ouvrent la voie à des évolutions futures, notamment en matière d'enrichissement des fonctionnalités, d'intégration d'intelligence artificielle, ou d'élargissement à d'autres contextes (musées, hôpitaux, gares...).

Conclusion générale

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.

Bibliographie :

1. Definitions Marketing. (s.d.). *Site officiel*. <https://www.definitions-marketing.com>
2. 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].
3. Mekhfi, N., & Lahbab, N. (2018). *Mise au point d'une application de géolocalisation indoor via WiFi* (Mémoire de master, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen, Algérie). Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen.
4. Xia, S., Liu, Y., Yuan, G., Zhu, M., & Wang, Z. (2017). *Indoor Fingerprint Positioning Based on Wi-Fi: An Overview*. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(5), Article 135. <https://doi.org/10.3390/ijgi6050135>
5. Giuliano, R., Cardarilli, G. C., Cesarini, C., & Di Nunzio, L. (2020). *Indoor localization system based on Bluetooth Low Energy for museum applications*. *Electronics*, 9(6), 1055. <https://doi.org/10.3390/electronics9061055>
6. Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. (2017). *A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies*. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.0101>
7. Wu, Y., Zhu, H.-B., Du, Q.-X., & Tang, S.-M. (2019). *A survey of the research status of pedestrian dead reckoning systems based on inertial sensors*. *International Journal of Automation and Computing*, 16(1), 65–83. [A Survey of the Research Status of Pedestrian Dead Reckoning Systems Based on Inertial Sensors | Machine Intelligence Research](#)
8. Peng, S., Zhang, Y., Wang, X., & Sheng, M. (2023). *Indoor Positioning System Using Ultra-Wide Bandwidth (UWB)*. *Sensors*, 23(12), 5710. [Indoor Positioning System \(IPS\) Using Ultra-Wide Bandwidth \(UWB\)—For Industrial Internet of Things \(IIoT\)](#)
9. Moldoveanu, A., Morar, A., & Radu, I. (2020). *A comprehensive survey of indoor computer vision-based localization methods*. *Sensors*, 20(9), 2641. [A Comprehensive Survey of Indoor Localization Methods Based on Computer Vision](#)
10. Burghal, D., Ravi, A. T., Rao, V., Alghafis, A. A., & Molisch, A. F. (2020). *A comprehensive survey of machine learning based localization with wireless signals*. *arXiv*, arXiv:2012.11171. [\[2012.11171\] A Comprehensive Survey of Machine Learning Based Localization with Wireless Signals](#)

11. Askar, C., & Sternberg, H. (2023). *Use of smartphone LiDAR technology for low-cost 3D building documentation with iPhone 13 Pro: A comparative analysis of mobile scanning applications*. *Geomatics*, 3(4), 563–579. <https://doi.org/10.3390/geomatics3040030>
12. Hernández, et al. (2020). *Strategies to integrate IMU and LiDAR SLAM for indoor mapping*. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-1, 223–230. [ISPRS-Annals - STRATEGIES TO INTEGRATE IMU AND LIDAR SLAM FOR INDOOR MAPPING](#)
13. Samah, K., & Zeghib, Y. (2015). *Conception et réalisation d'une application mobile sous Android de géolocalisation indoor (cas : supermarché Priba de Azazga)* (Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie). Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté du Génie Électrique et Informatique.
14. Timetodata. (n.d.). *Fingerprinting*. <https://timetodata.com/fr/fingerprinting>
15. Wikipédia. (2025, 15 juin). *Filtre de Kalman*. Dans *Wikipédia*. Consulté le 24 juin 2025, à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre_de_Kalman
16. DataScientest. (s.d.). *KNN : Algorithme K-Nearest Neighbors*. <https://datascientest.com/knn>
17. Bellavista-Parent, V., Torres-Sospedra, J., & Pérez-Navarro, A. (2022). *Comprehensive Analysis of Applied Machine Learning in Indoor Positioning Based on Wi-Fi: An Extended Systematic Review*. *Sensors*, 22(12), 4622. [Comprehensive Analysis of Applied Machine Learning in Indoor Positioning Based on Wi-Fi: An Extended Systematic Review](#)
18. Guidenav. (n.d.). *Comprendre les applications de base de l'unité de mesure inertielle (IMU) et les tendances futures*. <https://guidenav.com/fr/comprendre-les-applications-de-base-de-l-39-unite-de-mesure-inertielle-imu-et-les-tendances-futures/>