



MEMOIRE

En vue de l'obtention du
Master Académique
Domaine : Science et Technologie
Filière : Electronique
Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

Présenté par : **GHERIB Kamel**

Thème

GEOLOCALISATION DES PERSONNES EN ENVIRONNEMENT INDOOR VIA LA FUSION DES CAPTEURS DE SMARTPHONE

Soutenu publiquement

Le : 20/09/2021

Devant le jury :

M. BEN ATHMANE Khaled	Président	MAA	UKM Ouargla
M. ELAGGOUNE Hocine	Rapporteur	MAA	UKM Ouargla
M. MESSAADIA Mourad	Co- Rapporteur	PhD	LINEACT- CESI
M. BECHKA Larbi	Examineur	MAA	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2020 /2021



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace -----

Je ne saurais trouver les mots qu'il faut pour exprimer ma gratitude, mon amour, ma reconnaissance... C'est tout simplement que je dédie ce travail : À tous ceux qui m'ont soutenu pour que je puisse arriver à ce stade particulièrement mes parents, ma femme, mes enfants, mes frères et sœurs, à toute ma famille et à tous mes amis.

GHERIB Kamel

Remercîment -----

Je tiens d'abord à remercier mon promoteur qui m'a encouragé à reprendre mes études supérieures après 25 ans. Je le remercie d'avoir été mon support durant toute l'année et de m'avoir dirigé avec patience.

Je remercie également mon Co-promoteur M. **MESSAADIA Mourad**, enseignant chercheur de **LINEACT- CESI, France** pour sa disponibilité et le temps qu'il m'a consacré généreusement.

Je tiens à remercier aussi le jury : M. **BEN ATHMANE Khaled**, président et M. **BECHKA Larbi**, Examineur, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évalués ce travail.

Je remercie tous les enseignants et tous les étudiants option systèmes embarque Master II, année 2020-2021, qui m'ont bien accueilli dans le groupe.

Je remercie tous les responsables et les administrateurs de la faculté des nouvelles technologies de l'information et de la communication, en particulier du département d'électronique et communications, université **Kasdi Merbah OUARGLA** de m'avoir offert la chance pour continuer mes études.

Je remercie ma femme et mes enfants de m'avoir supporté toute l'année, et je demande leur pardon pour le temps que j'ai passé loin d'eux.

Tous mes remerciements pour les travailleurs du domaine d'éducatons et d'enseignements qui font leur devoir sans attendre aucune récompense de n'importe le qui sauf Dieu.

En fin, mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont soutenu ou qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'élaboration de ce travail.

GHERIB Kamel



TABLE DES MATIERES-----

Titre	Page
☰ LISTE DES FIGURES.....	6
☰ LISTE DES TABLEAUX.....	8
☰ ACRONYMES.....	9
☰ INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	11
1. ÉTAT DE L'ART	14
1.1. Evennou et autres (2006) [12]	14
1.2. Leppäkoski et autres (2013)[13]	15
1.4. Sun et autres (2020)	17
1.5. Alakhras et autres (2020) [16]	19
2. LA LOCALISATION EN INTERIEUR AVEC SMARTPHONES	22
2.1. Systèmes de localisation.....	22
2.1.1. Satellites GPS/GLONASS (GNSS)	22
2.1.2. Réseau cellulaire GSM.....	24
2.1.3. Wi-Fi.....	25
2.1.4. Capteurs Inertiels.....	26
2.1.5. BLUETOOTH.....	27
2.1.6. Dispositif d'identification par radiofréquence (RFID)	27
2.1.7. Autres systèmes.....	27
2.2. Techniques de localisation.....	29
2.2.1. Cell-ID ou Technique de proximité.....	30
2.2.2. Technique basée sur le RSS.....	30
2.2.3. Angle d'arrivée (AOA)	33
2.2.4. Technique basée sur le temps.....	34
2.2.5. Technique Map-Matching	36
2.3. Algorithme d'empreinte digital.....	36
2.3.1. Algorithme voisin le plus proche (Near Neighbors, NN)	37
2.3.2. Algorithme des k plus proches voisins (k Nearest Neighbors, kNN).	37
2.3.3. Algorithme pondéré des k-voisins les plus proches.....	38
2.4. Conclusion.....	38
3. APPROCHE THEORIQUE- DEAD RECKONING	39
3.1. Smartphone d'essai (Oppo Reno 5)	39
3.2. Architecture - Dead Reckoning	39
3.3. L'orientation.....	41

3.3.1. Filtre de Kalman étendu complémentaire (CEKF).....	41
3.3.2. Filtre complémentaire.....	44
3.4. Détection de pas et calcul de distance.....	45
3.5. Wi-Fi.....	45
3.6. Conclusion.....	47
4. APPROCHE : IMPLEMENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS.....	48
4.1. Introduction.....	48
4.2. Algorithme Adopté.....	49
4.3. Principe d'implémentation.....	50
4.3.1. Fonctionnalité.....	50
4.4. Résultats préliminaires données par les capteurs.....	52
4.4.1. Accéléromètre.....	53
4.4.2. Gyroscope.....	53
4.4.3. Magnétomètre.....	54
4.5. Calcul de pas.....	55
4.6. Calcul de la position.....	58
4.7. Orientation.....	58
4.8. PDR.....	59
4.9. Conclusion.....	60
5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	61
▣ BIBLIOGRAPHIES.....	62
I. ANNEXE A -QUATERNIONS et rotation dans l'espace.	66
1.1. Quaternion.	66
1.1.1. Définition et notations.....	66
1.2. Algèbre de Quaternion.	67
1.3. Correspondance entre quaternion unitaire et rotation vectorielle.....	68
1.4. Composition de rotations vectorielles et produit de quaternions.....	69
1.5. Notations matricielles.....	69
1.6. Applications.....	70
1.7. Interpolation de rotations.....	70



LISTE DES FIGURES-----

Titre	Page
Fig 1. Schéma fonctionnel de l'architecture à correction mutuelle INS/Wi-Fi.	15
Fig 2. Algorithme PDR basé sur le gyroscope de cap et les mesures d'accélération 3D.	16
Fig 3. Algorithme CEKF pour fusionner les mesures du gyroscope de cap et de l'accéléromètre 3D avec des estimations de position basées sur le WLAN.	16
Fig 4. The framework of the PDR method in this work.	17
Fig 5. Cadre du positionnement de fusion proposé.	18
Fig 6. Architecture du système.	19
Fig 7. Comparaison de l'accuracy de la localisation.	20
Fig 8. Erreur de localisation pour kNN avec différents seuils de croyance.	20
Fig 9. Taxonomie des technologies pour la géolocalisation des smartphones [17].	22
Fig 10. Constellation des satellites (GNSS).	23
Fig 11. Un aperçu des systèmes de géolocalisation indoor basés sur WiFi.	26
Fig 12. Référentiel lié au smartphone.	26
Fig 13. Architectures typiques des systèmes basés sur iBeacon [29].	27
Fig 14. La taxonomie des techniques de géolocalisations dans un smartphone [29].	29
Fig 15. Principe de Cell_ID	30
Fig 16. Technologie de propagation RSS-radio.	31
Fig 17. Détermination de la position du smartphone via la technique RSS-Fingerprinting	32
Fig 18. Technique AOA avec trois mesures angulaires [28].	33
Fig 19. TOA à trois positions [43].	35
Fig 20. Localisation et détection de proximité basées sur TDOA [29].	35
Fig 21. RTOF pour les déterminations de la géolocalisation d'un smartphone [17].	36
Fig 22. Un modèle de prototype DR pour les solutions de géolocalisation de smartphones [17].	40
Fig 23. Algorithme CEKF pour fusionner les mesures du gyroscope de cap, de l'accéléromètre-3D, et du magnétomètre-3D avec des estimations de position basées sur le WLAN.	42
Fig 24. Schéma de fusion du capteur pour l'estimation d'orientation	42
Fig 25. Fusion de capteurs avec le filtre complémentaire.	44
Fig 26. Plan de l'étage du l'immeuble mise à notre disponibilité lors de l'application de notre approche proposée avec les points d'accès (AP).	47

Fig 27. Application « Sensor Fusion app ».	48
Fig 28. Orientation des coordonnées sur Smartphone	49
Fig 29. Algorithme Adopté	50
Fig 30. Diagramme d'état de l'application	52
Fig 31. Sortie d'accélération	53
Fig 32. Vitesse angulaire.	54
Fig 33. Champ magnétique mesuré.	54
Fig 34. Données de l'accéléromètre (x, y et z)	55
Fig 35. Amplitude d'accélération (6 pas effectués).	56
Fig 36. Détection des pas après application du seuil $THR=0.85m/s^2$	57
Fig 37. Affichage de l'angle Azimuth en degré des trois méthodes pour estimer la position.	59
Fig 38. Position estimée à l'aide de capteurs inertiels (test de marche).	60



LISTE DES TABLEAUX-----

Titre	Page
Table 1. Comparaison des performances des différents systèmes pour une trajectoire dans le couloir (utilisation de 4 Points d'Accès, situés à chaque angle du bâtiment, pour le positionnement Wi-Fi).	15
Table 2. Erreurs de positionnement des différentes méthodes/(m).	18
Table 4. Résumé des différentes technologies sans fil pour la localisation [29].	28
Table 5. Les différents capteurs d'un smartphone sur un plateforme Android.	39
Table 5. Les différents capteurs d'un smartphone sur un plateforme Android.	39
Table 6. Statistiques de sortie de l'accéléromètre	53
Table 7. Statistiques du gyroscope (vitesse angulaire)	54
Table 8. Statistiques de sortie du magnétomètre	54



ACRONYMES

FCC :	Federal Communications Commission
AOA :	Angle Of Arrival
AP :	Access Point
API :	Application Programming Interfaces
AWFP :	Adaptive Wi-Fi FTM Positioning
BLE :	Bluetooth Low-Energy
BS :	Base Stations
CDF :	Cumulative Distribution Function
CDMA :	Code Division Multiple Access
CEKF :	Complementary Extended Kalman Filter
CF :	Complementary filter
CID :	Identification cell
EKF :	Extended Kalman Filter
FEKF :	Fingerprint Extended Kalman Filter
FTM :	Fine Time Measurement
GNSS :	Global Satellite Navigation System
GPS :	Global Positioning System
iBeacon :	is an indoor positioning system that Apple introduces as "a new class of low-power, low-cost transmitters that can notify nearby iOS 7 devices of their presence."
IEEE :	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMU :	Inertial Measurement Units
INS :	Inertial Navigation Systems
IPS :	Indoor Positioning System
kNN :	k-Nearest Neighbor
LFFM :	Location Fixing and Finger Matching
LS :	Least-Squares
LTE :	Long Term Evolution
MAC :	Mount access controls
Matlab :	Matrix Laboratory
NLOS :	Non-Line-Of-Sight
NN :	Nearest Neighbor
PDA :	Personal Digital Assistants
PDR :	Pedestrian Dead Reckoning
PF:	Particle filter
PostgreSQL :	is a relational and object database management system (RDBMS). It is a free tool available under the terms of a BSD-type license.
RF :	Radio Frequency
RFID :	Radio frequency identification
RSS :	Really Simple Syndication
SLAM :	Simultaneous Localization and Mapping
SSID :	Service Set Identifier

TBS :	Transmitting base station
TDOA :	Time Difference Of Arrival
THR	Threshold
TOA :	Time Of Arrival
UWB :	Ultra-Wide Band
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN :	Wireless Local Area Network
WLS :	Weighted Least-Squares
WSN :	Wireless Sensor Networks

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La localisation des personnes, d'un lieu, d'un chemin sont des problèmes toujours existant depuis l'antiquité, et l'être humain depuis son existence, il a essayé de trouver des solutions à ces problèmes. Parmi les solutions qu'il a trouvé ou qu'il a crié : la connaissance de la position des étoiles, les phares (maritimes depuis l'antiquité, et aéronautiques depuis les années 1920), les sextants, les satellites [1].

La fin du XXe siècle a connu une évolution incontournable dans le domaine de la géolocalisation. Ils ont inventé les systèmes de trilatération, d'abord terrestres puis par satellites avec le GPS (Global Positioning System), qui ont pris domination, en raison de leur précision et de leur couverture [2].

L'utilisation du GPS dans l'estimation de la position d'une cible est devenue une fonctionnalité nécessaire dans nos quotidiens. Cependant, cette fonctionnalité permet la localisation des cibles dans un environnement extérieur (Outdoor), l'estimation de la position extérieure est généralement résolue à l'aide d'un système mondial de navigation par satellite (Global Satellite Navigation System GNSS) [3]-[4], mais souffre du manque de précision dans les environnements intérieurs (Indoor). Cela veut dire que dans un environnement intérieur, nous devons encore définir une norme de système de positionnement qui peut être appliquée dans le monde entier et dans différents contextes[5]. Pour cette raison, et vu les limites de la solution GPS, ce problème peut être résolu en utilisant des capteurs intégrés aux Smartphones (accélération, orientation, etc.).

La géolocalisation sur smartphone est devenue de plus en plus populaire, et qui a une importance certifiée, surtout si on voit les services qui va nous fournir, pour les entreprises, facilité de la recherche au étudiant dans les universités, le suivi des patients à l'intérieur des hôpitaux, le conseil aux personnes à l'intérieur d'aéroports, le développement de systèmes de vie assistée pour les personnes âgées et malvoyantes.

Un système de positionnement intérieur (Indoor Positioning System IPS) doit avoir trois nécessités pour une utilisation à grande échelle : (1) Le système doit fournir des estimations de position précises, (2) Le système doit être facilement évolutif et (3) Le coût de mise en œuvre doit être réduit. La tendance actuelle à réduire le coût du système est d'utiliser l'infrastructure sans fil déjà déployée pour la communication comme points de référence pour le positionnement [5].

De nombreuses technologies de communication sont disponibles pour une utilisation dans des environnements intérieurs, parmi lesquelles le LTE (Long Term Evolution), le Wi-Fi [6]-[7], le Bluetooth , le Bluetooth Low-Energy (BLE) [8], les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks WSN) et la bande ultra-large (Ultra-Wide Band UWB). La technologie Wi-Fi est la plus utilisée jusqu'à présent. En plus des dispositifs de réseau Wi-Fi, d'autres technologies ont été étudiées pour construire des schémas plus robustes et rapprocher le niveau de précision intérieure des résultats déjà perçus avec les systèmes extérieurs. Parmi les technologies figurent les systèmes inertiels, sonores, lumineux et visuels [9]-[11]. La plupart de ces technologies sont déjà disponibles sur les smartphones, ce qui permet aux chercheurs de concentrer leurs efforts sur la définition d'algorithmes qui manipulent les signaux et les données obtenus à partir de capteurs pour fournir des informations plus fiables.

Des solutions avancées proposent d'utiliser des signaux terrestres pour localiser l'utilisateur du smartphone. Cependant, ils nécessitent d'une connaissance précise du plan d'étage du bâtiment où se trouve l'utilisateur [1].

Dans ce mémoire, nous introduisons une solution intégrée qui repose exclusivement sur les capteurs du smartphone.

Pour ce faire, nous proposons une méthode basée sur la fusion de capteurs de smartphone (Dead-Reckoning). Cette méthode est divisée en trois phases : estimation de l'orientation (filtre de Kalman étendu), estimation du nombre de pas, correction de l'erreur (Wi-Fi). La solution proposée a été implémentée sur un smartphone (**Oppo Reno 5** avec un système : **Android 11, ColorOS 11.1**).

➤ **ORGANISATION**

Ce mémoire, décomposé en trois chapitres, et il est organisé de la façon suivante :

- **Chapitre 1** : le chapitre 1 est dédié à présenter l'état de l'art de la géolocalisation. Nous avons pris en discussion quelques articles qui ont pris en charge le problème de la localisation d'une cible dans un environnement intérieur, en faisant la fusion de plusieurs technologies et techniques de localisation.
- **Chapitre 2** : Ce chapitre est consacré à la description des technologies et techniques de localisation en intérieur avec smartphones.
- **Chapitre 3** : Ce chapitre traite l'approche et la méthode proposée (**Dead Reckoning**), qui est répartie en trois étapes : estimation de l'orientation (filtre de Kalman étendu), estimation du nombre de pas, correction de l'erreur (Wi-Fi).
- **Chapitre 4** : est consacré à l'implémentation de l'approche, et discussion des résultats obtenus.
- **Conclusion et perspectives** : Finalement une conclusion générale a été donnée qui englobe le tout Avec une vision future du sujet et les travaux qui peuvent être un sujet de recherche et d'enrichissement.

1. ÉTAT DE L'ART

Un système de positionnement intérieur est un système d'obtention de l'emplacement d'une cible dans un environnement intérieur. Ces dernières années, la prolifération à grande échelle des Smartphones dotés de capacités de communication sans fil a rendu la localisation et le suivi de ces appareils et de suivi des utilisateurs correspondants et la permission d'un éventail large applications et services associés. Plusieurs études ont tenté d'examiner l'état de l'art actuel des systèmes de positionnement intérieur IPS. Depuis la première revue, plusieurs avancées ont été réalisées dans ces études, montrant que le domaine est toujours ouvert et qu'il y a plusieurs lacunes à corriger ou à combler [5].

Parmi les techniques les plus populaire appliquées dans un environnement intérieur, on trouve le réseau Wi-Fi, qui sont largement disponibles et déployés dans la plupart des bâtiments. Les récents travaux sur la fusion de capteurs pour la localisation dans les environnements intérieurs tendent à fusionner les approches Wi-Fi et PDR (Pedestrian dead reckoning).

1.1. Evennou et autres (2006) [12]

Leur travail est considéré comme le premier travail intégrant la fusion de Wi-Fi et PDR pour la location intérieure. Ils ont proposé une structure basée sur un filtre de Kalman et un filtre à particules. Ils fusionnent les informations hétérogènes provenant de ces deux technologies indépendantes (Wi-Fi et PDR). Le Wi-Fi et les systèmes de navigation inertielle (INS) sont utilisés pour le positionnement et la détermination d'attitude dans un large éventail d'applications. Bien que capteurs inertiels présentent des erreurs importantes, les mesures Wi-Fi peuvent être utilisées pour corriger la dérive affaiblissant la navigation basée sur cette technologie. D'autre part, les capteurs INS peuvent interagir avec le système de positionnement Wi-Fi car ils offrent une navigation en temps réel de haute précision (voir **Fig 1**).

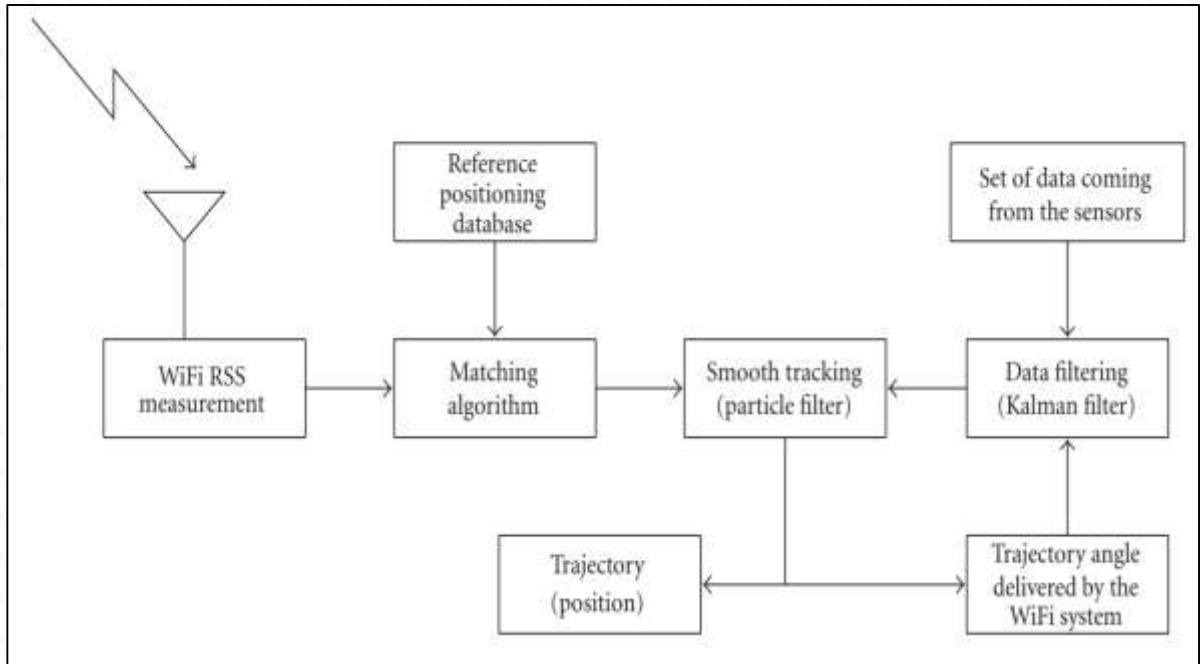


Fig 1. Schéma fonctionnel de l'architecture à correction mutuelle INS/Wi-Fi.

- **Résultats obtenus :**

Table 1. Comparaison des performances des différents systèmes pour une trajectoire dans le couloir (utilisation de 4 Points d'Accès, situés à chaque angle du bâtiment, pour le positionnement Wi-Fi).

	Plus proche voisin	Méthode statistique	Filtre de Kalman	Filtre à particule	Filtre à particules+INS
Erreur moyenne (m)	3.32	2.88	2.56	1.86	1.53

1.2. Leppäkoski et autres (2013)[13]

Proposent des méthodes combinaisons des informations provenant de capteurs inertiels, la carte intérieure du site et le WLAN pour naviguer dans les environnements piétons indoor. Les résultats d'essais sont présentés où un filtre de Kalman étendu complémentaire a été utilisé pour fusionner le signal WLAN et les signaux d'un capteur inertiel comprenant un gyroscope et un accéléromètre à trois axes. Un filtre à particules a été utilisé pour combiner les données inertielles avec les informations cartographiques (voir **Fig 2** et **Fig 3**).

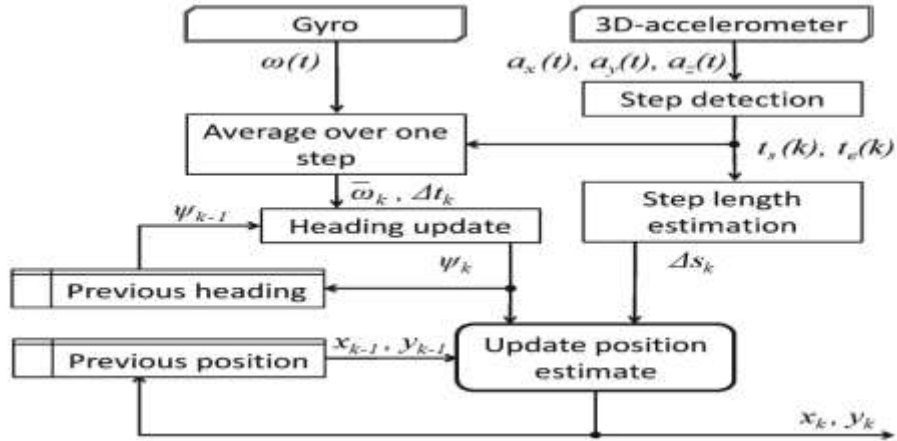


Fig 2. Algorithme PDR basé sur le gyroscope de cap et les mesures d'accélération 3D.

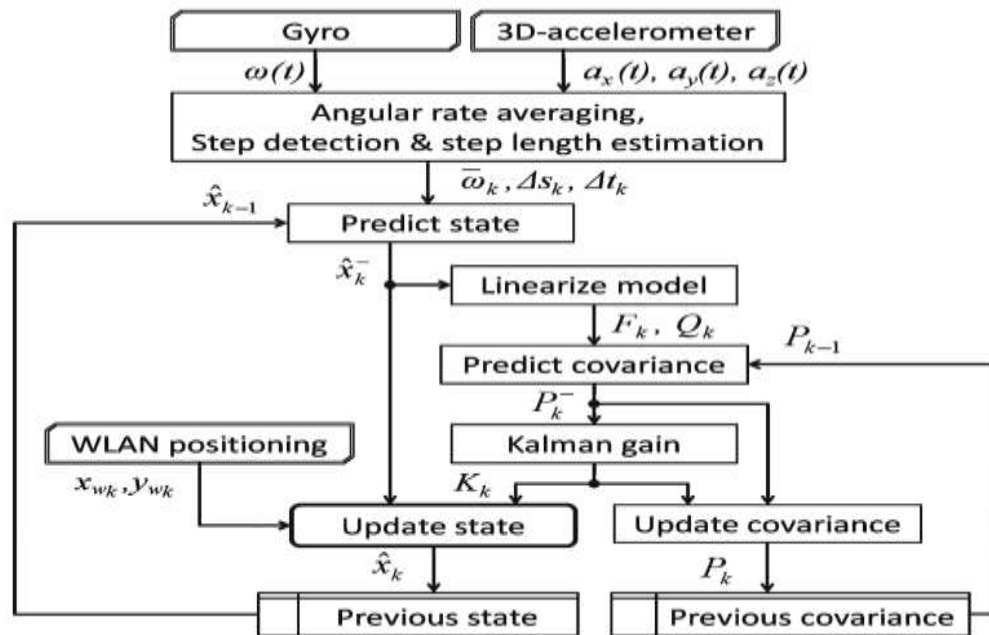


Fig 3. Algorithme CEKF pour fusionner les mesures du gyroscope de cap et de l'accéléromètre 3D avec des estimations de position basées sur le WLAN.

• Résultats obtenus :

- **WLAN seule** : L'erreur de position moyenne est d'environ 12 m.
- **PDR seule** : Les erreurs maximales sont de 5 m de distance et 24° d'angle de cap.
- **Réglage des filtres (CEKF)** : Les erreurs maximales peuvent être estimées à 4 m de distance et 16° de cap.

1.3. Faheem, F. (2016) [14] :

Ils ont utilisé iBeacons pour les services de localisation en intérieur. Les valeurs RSSI sont collectées à partir de différentes iBeacons sur une machine utilisateur, qui transmet les valeurs à un serveur exécutant différents algorithmes de localisation. Côté serveur, le filtre à particules (PF) et de nouvelles approches en cascade d'utilisation du filtre de Kalman-filtre à particules (KF-PF) et du filtre à particules étendu (PF-EKF) sont utilisés pour améliorer la précision de localisation du système. Les résultats expérimentaux montrent qu'en moyenne, PF, KF-PF et PF-EKF obtiennent une précision de 1,441 m, 1,03 m et 0,95 m respectivement.

1.4. Sun et autres (2020) [15]

Ils ont proposé l'étude en détail les propriétés de la portée et des performances de positionnement Wi-Fi des téléphones portables. Considérant l'identification d'erreur sans visibilité directe (NLOS), un modèle de compensation d'erreur de distance en temps réel basé sur la méthode des moindres carrés (LS) et un algorithme de positionnement Wi-Fi FTM adaptatif (AWFP) utilisant les moindres carrés pondérés (WLS) sont mis au point. Pour améliorer la précision, un nouvel algorithme de positionnement par fusion étroitement couplé intégrant le Wi-Fi FTM et des capteurs de téléphone portable intégrés basés sur le filtre de Kalman étendu (EKF) est construit (voir **Fig 1** et **Fig 5**).

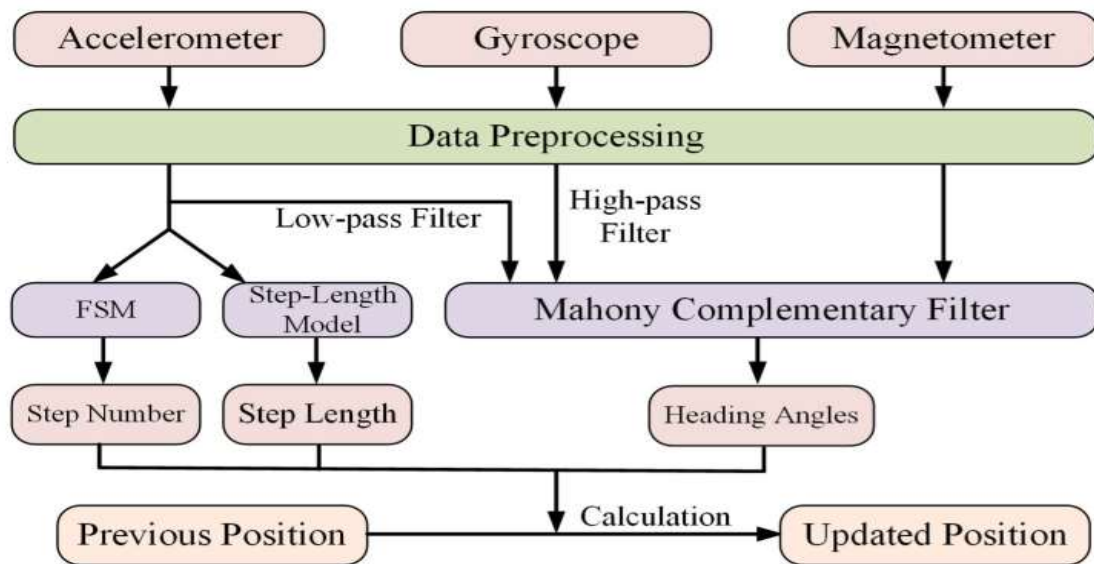


Fig 4. The framework of the PDR method in this work.

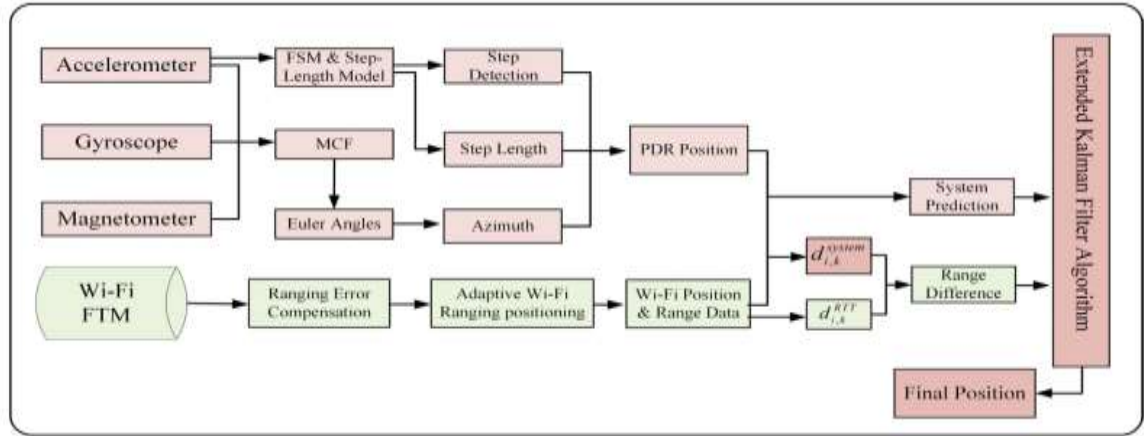


Fig 5. Cadre du positionnement de fusion proposé.

• Résultats obtenus :

Table 2. Erreurs de positionnement des différentes méthodes/(m).

<i>Première expérimentation</i>				
Erreur	Min	Max	Moyenne	RMSE
PDR	0.16	3.80	2.26	2.56
Loosely coupled	0.17	3.05	1.42	1.61
Wi-Fi FTM	0.09	8.06	1.86	2.59
Tightly Coupled	0.30	2.02	1.08	1.17
<i>Deuxième expérimentation</i>				
Erreur	Min	Max	Moyenne	RMSE
PDR	0.11	3.62	2.36	2.70
Loosely coupled	0.23	3.89	1.53	1.74
Wi-Fi FTM	0.12	13.30	2.21	3.14
Tightly Coupled	0.12	2.38	0.90	1.13
<i>Troisième expérimentation</i>				
Erreur	Min	Max	Moyenne	RMSE
PDR	0.15	4.22	2.79	3.11
Loosely coupled	0.16	4.13	1.38	1.64
Wi-Fi FTM	0.15	8.46	1.95	2.65
Tightly Coupled	0.38	1.70	0.96	1.03
<i>Quatrième expérimentation</i>				
Erreur	Min	Max	Moyenne	RMSE
PDR	0.17	3.37	2.11	2.40
Loosely coupled	0.20	4.13	1.46	1.73
Wi-Fi FTM	0.21	6.46	2.01	2.56
Tightly Coupled	0.18	1.76	0.97	1.05
<i>Moyens résultats</i>				
Erreur	Min	Max	Moyenne	RMSE
PDR	0.15	3.75	2.38	2.69
Loosely coupled	0.19	3.80	1.45	1.68
Wi-Fi FTM	0.14	9.07	2.00	2.74
Tightly Coupled	0.18	1.96	0.98	1.10

1.5. Alakhras et autres (2020) [16]

Les auteurs de ce travail, ont présenté une technique de construction de carte d'empreintes digitales basée sur la détermination de localisation et la correspondance d'empreintes digitales motivées par la disponibilité de capacités de détection avancées dans les smartphones. La méthode proposée de localisation et d'appariement des doigts (LFFM) utilise une approche de localisation basée sur des graphiques de repères pour estimer automatiquement les emplacements pour les points de référence et faire correspondre les empreintes digitales collectées, sans nécessiter la participation active de l'utilisateur (voir Fig 6).

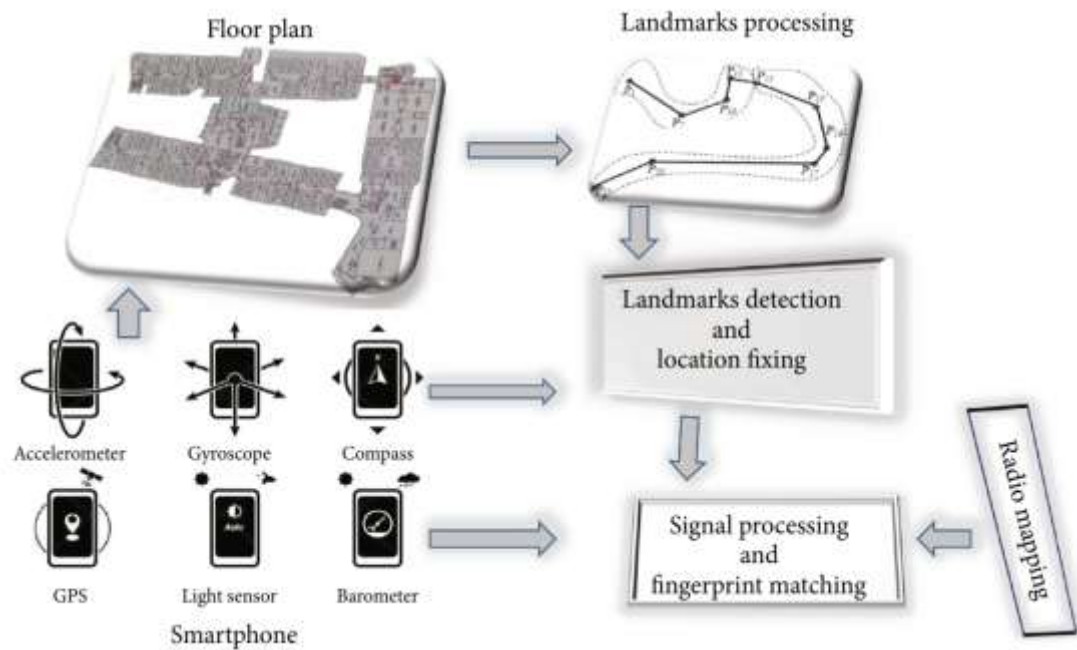


Fig 6. Architecture du système.

- **Résultats obtenus :**

La Fig 7 montre que la méthode proposée, atteignant une erreur moyenne de 0,71 mètre. L'erreur de localisation de kNN est illustrée à la Fig 8.

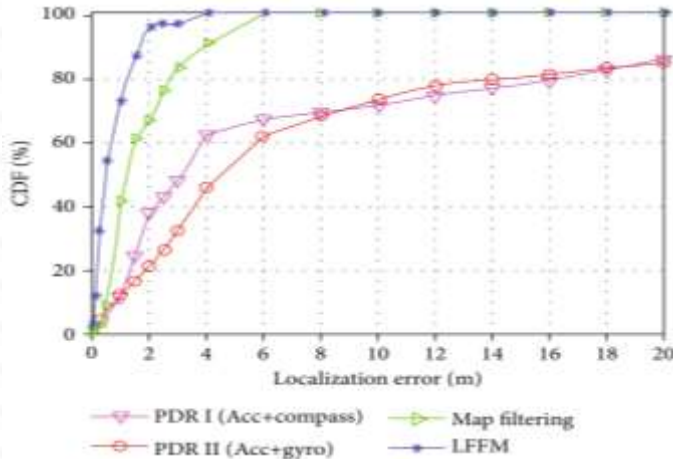


Fig 7. Comparaison de l'accuracy de la localisation.

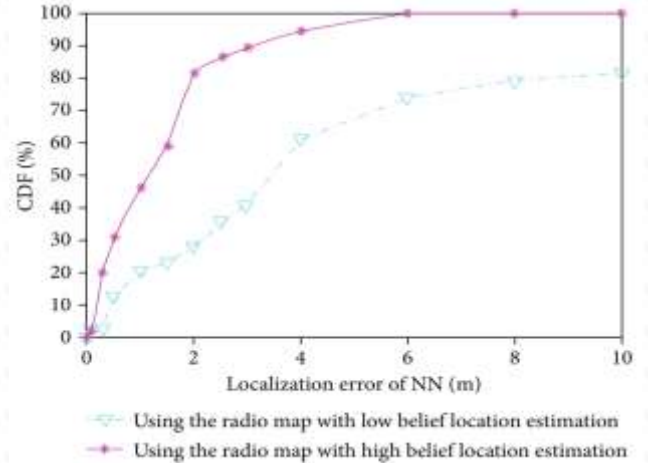


Fig 8. Erreur de localisation pour kNN avec différents seuils de croyance.

1.6. Solutions commerciales :

Naviguer à l'intérieur avec des appareils mobiles est devenu un sujet d'actualité ces dernières années. Quelques solutions de la localisation commerciale indoor basées sur différentes technologies et techniques sont présentées dans le Table 3 :

Table 3. Solutions commerciales de localisation en intérieur (indoor)

Solution	Précision	Technologie sans fil	Technique de localisation	Contraintes
ArrayTrack	Jusqu'à 1m	Wi-Fi	AOA	La nécessité de de déployer une nouvelle antenne Wi-Fi directionnelle
Ekahau	5m-15m	Wi-Fi	RSS	Les clients doivent calibrer et constitué des cartes radio pour certaines zones spécifiques
Sensewhere	Jusqu'à 10m	Wi-Fi & AGPS	Proximity and RSS	Pas de Wap Surveying ou une base de données associée.
NextNav	2m-4m vertical et 50m-150m horizontal	RF technology (GPS-like signals)	TOA	Nécessité de déployer une infrastructure spéciale dans la zone géographique.
Wi-Fi-SLAM	3m-5m	Wi-Fi & Map	Mapping and RSS	Nécessité de télécharger la carte des bâtiments/zone et calibrer les paramètres de signal des WAP.

1.7. Conclusion :

Dans ce chapitre (États de l'art), nous avons parlés de quelques travaux qui ont cherchés des solutions pour le problème de la localisation d'une cible dans un environnement intérieur, en fusionnant de capteurs inertiels sur les smartphones tendent à fusionner les approches Wi-Fi et PDR (Pedestrian dead reckoning). Aussi nous avons donnés un tableau qui liste quelques solutions commerciales de localisation en intérieur.

2. LA LOCALISATION EN INTERIEUR AVEC SMARTPHONES

2.1. Systèmes de localisation

La localisation en intérieur a fait un bond en avant ces dernières années dans les systèmes et les technologies acquises, telles que les récepteurs GPS, les émetteurs-récepteurs cellulaires LTE, NFC, Wi-Fi, Bluetooth, ainsi que les capteurs inertiels sur les smartphones, qui permettent un positionnement plus puissant avec les smartphones dans différentes circonstances. La **Fig 9** illustre ces technologies dans des solutions hybrides toutes seules et combinées.

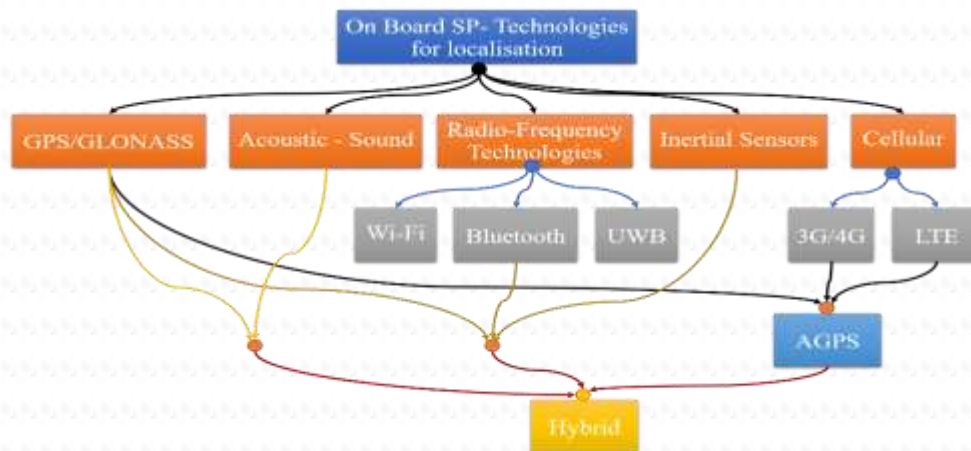


Fig 9. Taxonomie des technologies pour la géolocalisation des smartphones [17].

2.1.1. Satellites GPS/GLONASS (GNSS)

Le récepteur GNSS (Global Navigation Satellite System) intégré sur les smartphones est largement utilisé pour obtenir la position du smartphone à l'extérieur. En prenant le GPS comme exemple, Le système de satellites GPS est à l'origine composé de 24 satellites placés sur six orbites. Le système de localisation GPS est basé sur la mesure du temps nécessaire pour localiser les récepteurs et comme les ondes reçues souffrent de réflexions, le système ne sera pas adapté aux zones fermées ou aux espaces où le signal ne pénètre pas correctement [18]. Certains chercheurs ont inspiré du système GPS des nouvelles

technologies pour la localisation en intérieur en utilisant différents matériaux. Par exemple : Locata Corporation a inventé une nouvelle technologie de localisation appelée Locata [19], pour un positionnement de précision aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur.

Les satellites diffusent des pages, des codes et des données sur deux fréquences à l'aide d'une technique appelée accès multiple par division de code (CDMA). Les deux fréquences sont L1 (1.575.42MHz) et L2 (1.227.6MHz). Le GPS utilise le concept du pseudo porté et de la trilatération TOA pour déterminer la position du smartphone [20]. Le code de pseudo-portée permet au récepteur du smartphone de déterminer le temps de propagation du signal, ce qui permet de déterminer le pseudo porté du satellite vers le smartphone. Les données de navigation fournissent les moyens pour le récepteur de déterminer l'emplacement du satellite au moment de la transmission du signal. Un récepteur GPS en mode 3D nécessite trois satellites et trois distances sont nécessaires. La trace de distance égale à un point fixe est une sphère dans un cas 3D. Deux sphères se croisent pour faire un cercle. Ce cercle coupe une autre sphère pour produire deux points. Afin de déterminer quel point est la position de l'utilisateur, l'un des points est proche de la surface de la terre et l'autre est dans l'espace. Puisque la position de l'utilisateur est habituellement proche de la surface de la terre, elle peut être déterminée de manière unique [21].



Fig 10. Constellation des satellites (GNSS).

Cependant, la distance mesurée entre le récepteur et le satellite a un biais inconnu constant, car l'horloge du smartphone est habituellement différente des horloges des satellites. Pour résoudre cette erreur de polarisation, un autre satellite est requis. Par conséquent, pour trouver la position du smartphone, quatre satellites sont nécessaires. À la suite de ces réalisations de services basés sur GNSS dans les applications extérieures, cependant, les défis ont été mis en évidence dans les environnements urbains et / ou intérieurs denses.

2.1.2. Réseau cellulaire GSM

La technologie cellulaire s'appuie sur un groupe de stations de base (Base Stations BS), avec une couverture radiophonique de différentes tailles. Les solutions de géolocalisation des téléphones sont concentrées sur la réalisation des exigences du mandat FCC-E911, et se bases sur le réseau cellulaire. Cell ID, Angle d'arrivée (AOA), le temps d'arrivé (TOA) et différence de temps d'arrivé (TDOA) étaient quelques techniques de géolocalisation déployées par certains des réseaux cellulaires auparavant [22].

Avec la technologie LTE existante sur les smartphones, un nouveau protocole, connu sous le nom de localisation sécurisée de la position de l'utilisateur (SUPL), a été rajouté pour fournir un positionnement sécurisé des smartphones [23].

Parmi les technologies cellulaires sur smartphone, on trouve le GSM. Le GSM est une norme mondiale pour les communications mobiles. C'est une technologie de pointe dans le domaine des téléphones mobiles et offre une bonne couverture dans les zones urbaines et rurales.

Le réseau GSM est divisé en plusieurs cellules. Chaque cellule contient une station de base de transmission (BTS) appelée station d'émetteur-récepteur de base. Les stations de base GSM sont généralement équipées de plusieurs antennes directionnelles, qui définissent la couverture de la cellule. Les cellules sont identifiées par un ID de cellule unique (CID) et selon leur emplacement, elles peuvent couvrir environ 35 kilomètres [24].

De nombreux systèmes ont utilisé des systèmes de réseau cellulaire mobile à accès multiple mobile / par répartition par code (GSM / CDMA) pour estimer la localisation de clients mobiles externes.

Otsason et al. [25] ont proposé le premier système de suivi intérieur précis basé sur le GSM intérieur et l'utilisation d'empreintes digitales de grande puissance de signal. Les données utilisées sont collectées à partir des 6 cellules GSM les plus puissantes détectées et en utilisant des lectures de jusqu'à 29 canaux GSM supplémentaires.

2.1.3. Wi-Fi

La technologie des réseaux locaux sans fil WLAN (Wireless Local Area Network) a connu ces dernières années une croissance sans précédent. La recherche a révélé que tous les derniers ordinateurs portables, assistants numériques personnels (Personal Digital Assistants PDA) et smartphone portables sont désormais équipés de cartes d'interface réseau sans fil. Cela montre que la demande de WLAN augmente, ce qui lui rend très populaire non seulement aux entreprises, dans les universités, les bureaux et les foyers [26].

Wi-Fi est l'un des standards de l'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens ou IEEE pour le WLAN. Le dernier amendement de la norme originale (802.11) est le 802.11n qui a été ratifié à la fin de 2009 [27].

Les émetteurs-récepteurs Wi-Fi intégrés aux smartphones ne sont pas seulement pour la communication de données, mais aussi pour estimer sa position. Bien que pour la géolocalisation extérieure, il est suffisant d'obtenir l'identification d'une station de base BS détectable (SSID d'un point d'accès). Dans la géolocalisation intérieure, il faut aller au-delà de la simple identification du point d'accès afin d'obtenir une meilleure précision. La découverte de la position peut être réalisée en utilisant diverses mesures comprenant TOA, AOA et RSS.

La **Fig 11** illustre les paramètres des systèmes de géolocalisation basés sur Wi-Fi.

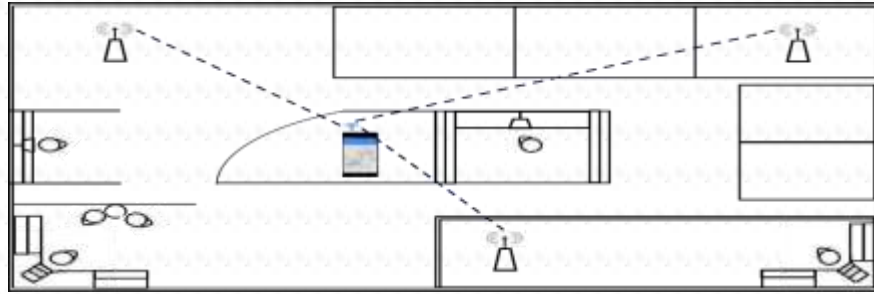


Fig 11. Un aperçu des systèmes de géolocalisation indoor basés sur WiFi.

2.1.4. Capteurs Inertiels

Les smartphones incluent désormais trois types de capteurs, accessibles le plus souvent via des API (Application Programming Interface) fournies par le système d'exploitation (Android, IOS ou Windows).

a) Capteurs de mouvement :

Ce sont des capteurs qui analysent les mouvements du smartphone. Ils forment une centrale inertielle de deux capteurs : gyroscope et accéléromètre, tous deux dans les trois axes du smartphone. Le gyroscope mesure la vitesse de rotation du smartphone (en rad/s) et l'accéléromètre son accélération (en m/s²).

b) Capteurs d'ambiance :

Ce sont des capteurs qui permettent de décrire l'environnement du smartphone. Il existe notamment : le capteur de champ magnétique à trois axes (en μT), le capteur de luminosité (en lux), le baromètre (qui mesure la pression atmosphérique, en hPa), le capteur de proximité (qui mesure la distance de l'objet le plus proche, en cm), le capteur d'humidité (qui mesure l'humidité de l'air, en g/m³), le capteur de température (en Celsius), et le microphone qui permet de calculer le niveau sonore ambiant, en dB.



Fig 12. Référentiel lié au smartphone.

2.1.5. BLUETOOTH

Bluetooth (ou IEEE 802.15.1) inclut des spécifications pour les couches physiques et contrôles d'accès au support (MAC) qui connectent divers appareils sans fil fixes ou mobiles dans un espace personnel spécifique.

Plusieurs systèmes de positionnement intérieur reposent sur cette technologie [28] c'est principalement à cause de : son faible coût, sa faible consommation énergétique, sa grande gamme de couverture par rapport à des BS (Base Stations).

La solution de localisation basé sur le Bluetooth est le Bluetooth-Low-Energy Beacons (BLE-iBeacons) ont permis de suivre l'emplacement du smartphone pour les smartphones basés sur des mesures RSS.

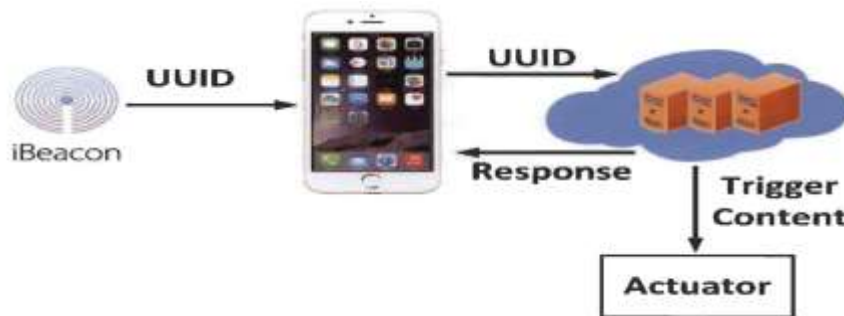


Fig 13. Architectures typiques des systèmes basés sur iBeacon [29].

2.1.6. Dispositif d'identification par radiofréquence (RFID)

Dispositif d'identification par radiofréquence est une méthode de stockage et de récupération de données par transmission électromagnétique vers un circuit intégré compatible au radio fréquence (RF) et il est maintenant considéré comme une méthode pour améliorer le processus de traitement des données [30]. Le système RFID comprend plusieurs composants de base, notamment plusieurs lecteurs RFID, des étiquettes RFID et la communication entre eux.

2.1.7. Autres systèmes

On peut citer : le signal acoustique, ultrason et infrarouge, qui ont également une potentielle utilisation vu leur capacité de localisation.

L'infrarouge est un rayonnement électromagnétique avec de longues longueurs d'onde, qui est souvent utilisé dans les communications à courte portée entre des appareils intégrés d'infrarouges.

L'ultrason est une onde de pression sonore oscillante avec une fréquence supérieure à la limite supérieure de la plage d'audition humaine. Les appareils à ultrasons peuvent être utilisés pour détecter des objets et mesurer des distances.

Le tableau suivant montre un résumé des différentes technologies sans fil utilisé pour la localisation.

Table 4. Résumé des différentes technologies sans fil pour la localisation [29].

Technologie	Portée maximale	Débit maximum	Consommation d'énergie	Avantage	Inconvénient
IEEE 802.11n 802.11 ac 802.11 ad	250m exte 35m intér Quelques mètres	600 Mbps 1.3 Gb/s 4.6 Mbps	Modéré Modéré Modéré	Largement disponible, haute précision, ne nécessite pas de matériel supplémentaire complexe	Sujette au bruit, nécessite des algorithmes de traitement complexes
UWB	10-20 m	460 Mbps	Modéré	Immunité aux interférences, offre une grande précision	Portée plus courte, nécessite du matériel supplémentaire sur différents appareils utilisateur, coût élevé
Ultrason	Quelques dizaines de mètres	30 Mbps	Faible modérée	Comparativement moins d'absorption	Dépendance élevée au placement du capteur
RFID	200 m	1.67 Gb/s	Faible	Consommez une faible puissance, a une large portée	La précision de localisation est faible
Bluetooth	100 m	24 Mbps	Faible	Débit élevé, plage de réception, faible consommation d'énergie	Faible précision de localisation, sujette au bruit
IEEE 802.11ah	1 km	100 kbls	Extrêmement bas	Large plage de réception, faible consommation d'énergie	Pas complètement exploré pour la localisation, les performances à voir dans l'environnement intérieur

2.2. Techniques de localisation

Les techniques les plus utilisées pour résoudre les problèmes de localisation : la multilatération, l'angulation et la prise d'empreinte. Ces trois techniques peuvent utiliser les différentes technologies (GPS, GSM, Wi-Fi et Bluetooth) pour l'environnement intérieur ou extérieur.

La combinaison de différentes techniques de géolocalisation peut créer une nouvelle technique de géolocalisation (qui permette de pallier aux inconvénients survenu de chaque technique) qui offre une précision raisonnable, un bref délai pour définir la géolocalisation des smartphones et une faible consommation d'énergie de la batterie.

Le **Fig 14** montre la taxonomie des techniques (simples et combinées) de géolocalisation (le temps d'arrivée (TOA) et le Dead reckoning (DR) [31], RSS-Fingerprinting et TOA [32], MM et DR, et Proximity [33], et le modèle de propagation radio RSS).

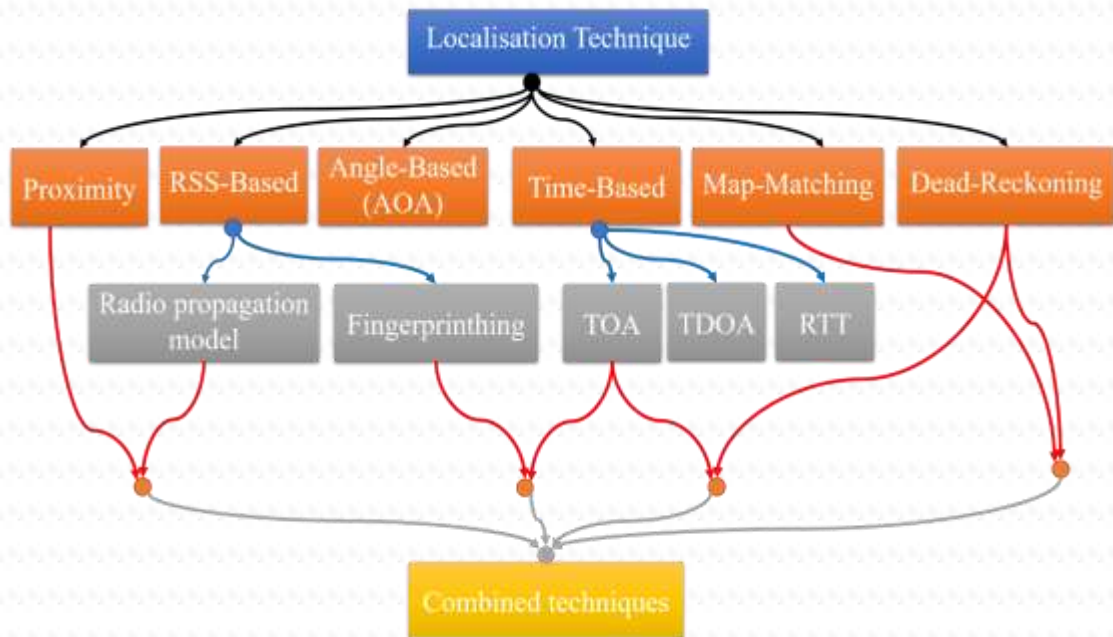


Fig 14. La taxonomie des techniques de géolocalisations dans un smartphone [29].

Dans cette section en va examiner de nombreuses techniques.

2.2.1. Cell-ID ou Technique de proximité

La technique de proximité, de cellule (zone) d'origine (COO) ou d'identification de cellule (Cell-ID) est une technique de géolocalisation qui se réfère à la définition de l'emplacement d'un smartphone comme étant dans des pseudo-portés radio d'une station de base (BS). Ainsi, le smartphone est connu dans la zone autour de cette position BS. Par conséquent, le problème réside dans le fait que l'emplacement du smartphone défini est basé sur la couverture radio (c'est-à-dire la taille de la cellule) des BSs. Par exemple, dans les réseaux cellulaires, la taille de la cellule se situe entre 2 km et 20 km [34].

Actuellement, la taille des cellules est réduite à seulement des dizaines de mètres dans les zones urbaines. Cette technique est utilisée dans les réseaux Wi-Fi. Cependant, l'exactitude de cette technique dans les réseaux Wi-Fi dépend des pseudo-portés efficaces de propagation du signal ainsi que de la densité et de la distribution des Points d'accès Wi-Fi (WAP) [35].

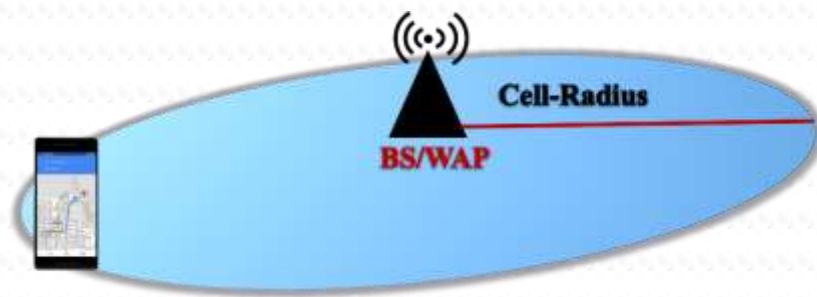


Fig 15. Principe de Cell_ID

2.2.2. Technique basée sur le RSS

La localisation basée sur RSS (Really Simple Syndication) nécessite une trilatération ou une latération en N points, c'est-à-dire que le RSS au niveau de l'appareil est utilisé pour estimer la distance absolue entre l'appareil utilisateur et au moins trois points de référence, puis la géométrie / trigonométrie de base est appliquée à l'équipement utilisateur pour obtenir sa position par rapport à un point de référence, comme le montre la Fig 16 [29].

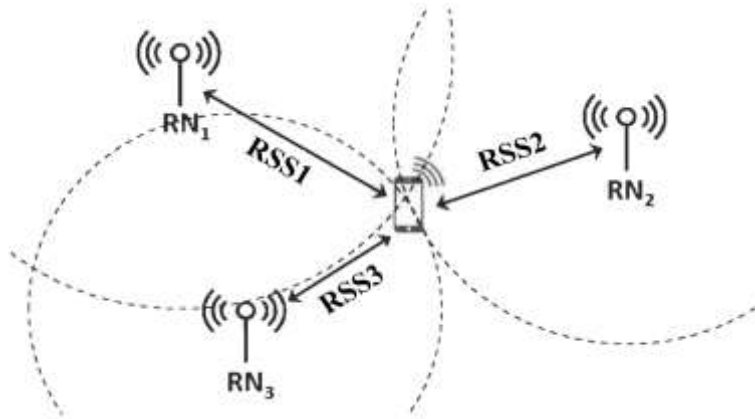


Fig 16. Technologie de propagation RSS-radio.

Deux méthodes ont été utilisées, pour l'estimation de l'emplacement d'un smartphone en fonction de la technique RSS.

- a) **Méthode de mesure de la Pseudo portée [36]:** Cette méthode est basée sur une relation d'analyse de propagation radio connue. Elle emploie une trilération pour trouver les emplacements des smartphones à partir des pseudo-portées estimées entre un smartphone et plusieurs BSs/WAPs (Voir **Fig 16**).

L'estimation du pseudo porté entre les smartphones et les BSs/WAPs, on doit utiliser équation (2.1) doit être :

$$p_i = p_0 * 10 \left(\frac{RSS_{i0} - RSS_i}{10^{ni}} \right) \dots \dots \dots (2.1)$$

Où p_i est la pseudo portée entre les smartphones et les **BSs/WAPs**, p_0 est la pseudo portée étalonée estimée à distance zéro, la valeur de puissance de signal mesurée RSS_{i0} pour la p_0 , RSS_i est la puissance de signal mesurée pour les signaux BSs/WAPs reçus, et ni est L'exposant de perte de trajet calculé/étaloné pour les signaux BSs/WAPs reçus.

- b) **RSS-fingerprinting :** Les systèmes de localisation basés sur les empreintes RSS sont généralement mis en œuvre dans le réseau local sans fil 802.11 pour déterminer l'emplacement de l'utilisateur en

mesurant les trames envoyées à partir de différents points d'accès (Access Points APs) [37].

Le principe de cette méthode est de créer une cartographie d'une zone basée sur les empreintes de puissances des signaux RSS. La zone est partagée en sous zone où chaque sous zones possède son empreinte de puissance. Ainsi la géolocalisation de smartphone est basée sur la recherche des valeurs RSS pré-stockées dans une base de données [38]. Dans cette méthode, des niveaux hors ligne et en ligne devraient être effectués pour calculer l'emplacement du smartphone. Ces étapes, avec leur processus de géolocalisation, sont affichées à la **Fig 17**.

Dans la phase hors ligne, une carte radio (base de données) pour la puissance des signaux dans différents points (des points de référence) des BSs principales autour d'une zone doit être enregistrée. Dans la phase en ligne, un processus de correspondance entre le RSS en temps réel et les données enregistrées de la carte radio (prédéfinie) est utilisée pour estimer l'emplacement du smartphone.

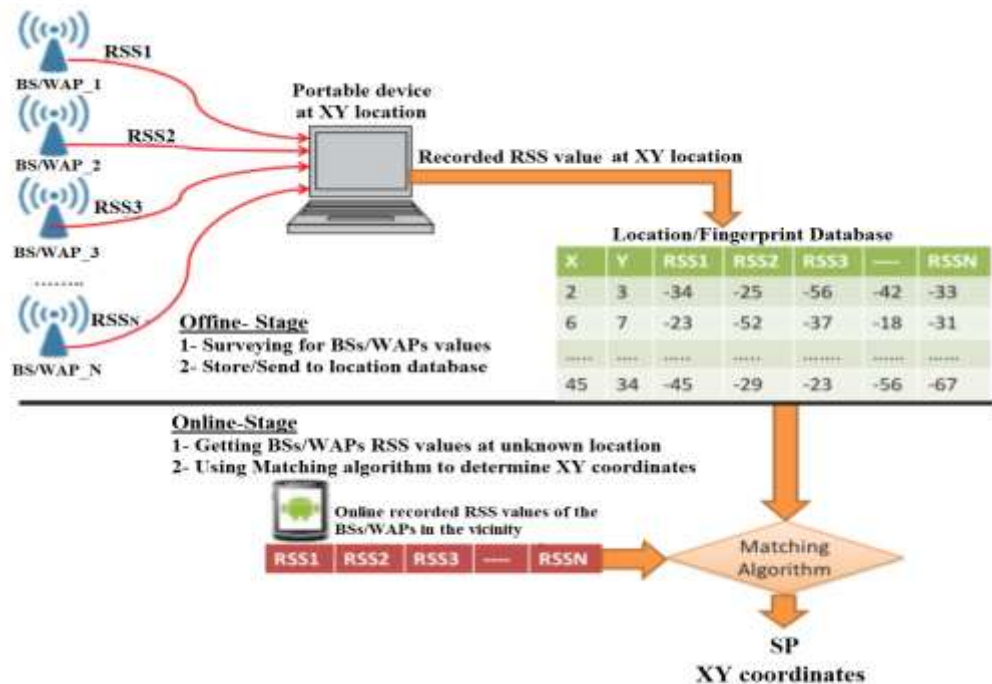


Fig 17. Détermination de la position du smartphone via la technique RSS-Fingerprinting [17].

2.2.3. Angle d'arrivée (AOA)

La mesure de l'angle d'arrivée (AOA) détermine la direction d'origine du signal reçu. L'estimation AOA (Direction Finding DF) peut être effectuée à l'aide d'antennes directionnelles ou de réseaux d'antennes. Afin de mesurer l'angle de réception, la station de base (BS) du système appliquant l'AOA est équipée des antennes sensibles à la direction, qui est généralement composée d'un réseau d'éléments d'antenne pouvant diviser sa direction [39].

En AOA, la position de la cible est à l'intersection de plusieurs paires de lignes de direction angulaire, dont chacune va de la station de base ou de la station balise à la cible en mouvement [40]. Comme le montre la figure 2.6, AOA peut utiliser au moins deux points de référence connus A et B et deux angles (θ_1 , θ_2) pour obtenir la position 2-D de la cible P [41].

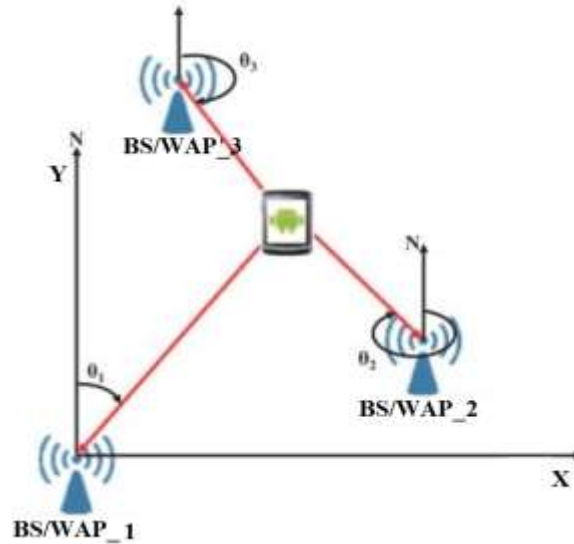


Fig 18. Technique AOA avec trois mesures angulaires [28].

La définition de la position du smartphone pour les coordonnées 2D est exprimée dans l'équation (2.2) :

$$(x_i - x_{sp})\sin(\theta_i) = (y_i - y_{sp})\cos(\theta_i) \dots \dots \dots (2.2)$$

Où x_i et y_i sont des valeurs de coordonnées **XY** des positions **BS / WAP**, θ_i est l'AOA pour les signaux **WAP** reçus et x_{sp} et y_{sp} sont des valeurs de coordonnées **XY** de la position du smartphone.

2.2.4. Technique basée sur le temps

Les techniques de géolocalisation basées sur le temps mesurent le temps de propagation d'un signal, appelé temps de vol (TOF), pour estimer les pseudo-portées entre les smartphones et plusieurs BSs/WAPs. TOA, RTT et TDOA sont les techniques courantes pour l'estimation de pseudo-portée [42].

TDOA calcule la position des smartphones à partir des différences des temps d'arrivée mesurés sur les paires de signaux BSs/WAPs, exprimés dans l'équation (2.3), et utilise un processus hyperbolique :

$$\begin{aligned}\Delta t_{12} &= t_1 - t_2 \\ \Delta t_{13} &= t_1 - t_3 \\ \Delta t_{23} &= t_2 - t_3 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots (2.3) \\ \Delta p_{ij} &= \Delta t_{ij} * c\end{aligned}$$

Où t_1 est le temps mesuré des signaux reçus de BSs/WAPs, Δt_{ij} est la différence des deux signaux reçus de BSs/WAPs, Δp_{ij} est la différence estimée des pseudo-portés et c la vitesse de la lumière.

- **L 'instant d 'arrivée (TOA) :** Un signal électromagnétique a une vitesse de propagation constante. Ces méthodes sont basées sur l'estimation du délai de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Le retard est déterminé par l'inter corrélation croisée entre le signal reçu et le signal émis. La position du plus grand pic dans cette corrélation indique l'arrivée du signal de ligne of sight (LoS) et donne la valeur de retard à partir du temps de référence.

Comme le montre la **Fig 19**, la distance entre le capteur et la cible peut être déterminée lors de la mesure du TOA. Ensuite, l'intersection du cercle et la distance déterminée par le capteur sont la position de la cible mesurée. Afin d'obtenir un certain point d'articulation unique, il doit y avoir au moins 3 cercles, ce qui signifie qu'au moins 3 capteurs sont nécessaires dans un système de positionnement 2-D.

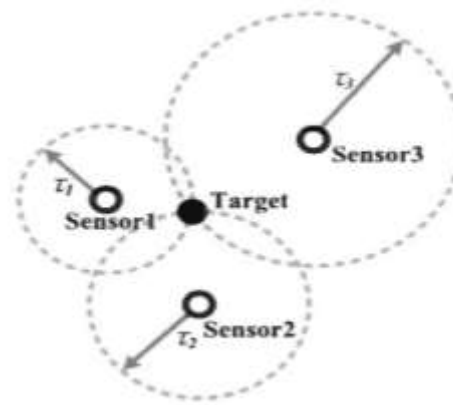


Fig 19. TOA à trois positions [43].

- Différence des instants d'arrivées (TDOA) :** La différence de temps d'arrivée (TDOA) est une variation de TOA, mais elle ne nécessite que les stations fixes d'avoir des horloges internes synchronisées. Il implique plusieurs récepteurs stationnaires qui ont des horloges synchronisées qui collaborent pour trouver l'emplacement de la source du signal [44]. TDOA exploite la différence des temps de propagation des signaux de différents émetteurs, mesurés au niveau du récepteur.

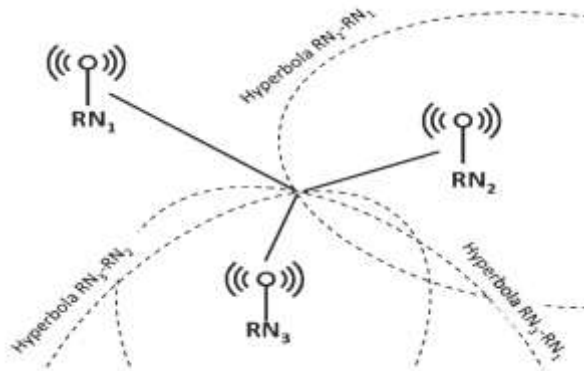


Fig 20. Localisation et détection de proximité basées sur TDOA [29].

- Temps d'aller-retour du signal (RTOF) :** RTOF mesure le temps de propagation du signal aller-retour (émetteur-récepteur) pour estimer la distance entre Tx et Rx [54]. Pour RTOF, la condition de synchronisation d'horloge n'est pas aussi stricte que les exigences TOA, mais leurs mécanismes de mesure de distance sont les mêmes. TOA et

RTOF ont des mécanismes de télémétrie similaires. Après avoir reçu le signal de l'émetteur, le récepteur répond à l'émetteur, puis l'émetteur calcule le total allerretour TOA.

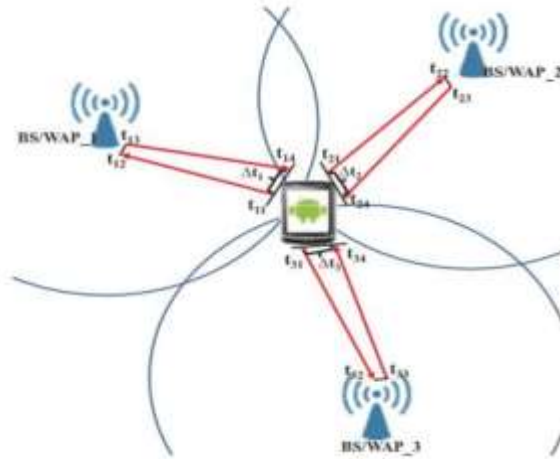


Fig 21. RTOF pour les déterminations de la géolocalisation d'un smartphone [17].

2.2.5. Technique Map-Matching

La technique MM est basée sur la théorie des algorithmes d'apprentissage machine, qui combine une carte avec les observations de géolocalisation du smartphone mesurées pour obtenir la position réelle des smartphones dans les coordonnées 2D ou 3D. Cette technique pourrait être combiné avec des techniques basées sur le temps, basées sur RSS et DR [45]. Elle est principalement utilisée pour augmenter la précision des solutions de géolocalisation.

2.3. Algorithme d'empreinte digital

Le mot vient du mot (fingerprint), qui fait référence aux empreintes digitales. Pour fonctionner, cette technologie nécessite une base de données qui associe un ensemble d'éléments qui caractérisent l'emplacement à certains endroits de l'environnement considéré. Ces éléments doivent être capables de distinguer chaque emplacement des autres emplacements de l'environnement. Chaque empreinte digitale a les informations RF ou RSS de chaque point d'accès et l'empreinte digitale de l'emplacement donné à une combinaison unique par rapport à toutes les empreintes digitales de la carte [46].

Les algorithmes d'empreintes digitales, on peut les classer en deux groupes de base, algorithme déterministe et probabiliste [47].

- **Algorithme déterministe** : Il essaie de trouver la distance de signal statistique minimale entre le vecteur de positionnement RSS détecté et les vecteurs de localisations de divers points de référence d'étalonnage.
- **Algorithme probabiliste** : Puisqu'un tableau vectoriel d'emplacements spécifiques a été détecté, il utilise l'inférence de probabilité pour déterminer la probabilité d'emplacements spécifiques. L'algorithme traite la base de données d'étalonnage elle-même comme une distribution de probabilité conditionnelle a priori pour déterminer la probabilité d'un emplacement spécifique [48].

2.3.1. Algorithme voisin le plus proche (Near Neighbors, NN)

L'algorithme déterministe le plus ancien et le plus simple est l'algorithme NN utilisé dans RADAR. C'est un système de localisation et de suivi des utilisateurs basé sur RF. Il est développé en deux phases : phase hors ligne et phase de positionnement. Cet algorithme fonctionne par le calcul de la distance euclidienne entre le RSS actuel d'un emplacement inconnu et la valeur moyenne de la force du signal de chaque point d'accès enregistré dans la base de données, puis de trouver le voisin le plus proche (distance euclidienne minimale), en utilisant l'estimation des coordonnées d'un emplacement inconnu [49].

2.3.2. Algorithme des k plus proches voisins (k Nearest Neighbors, kNN)

L'algorithme kNN est une extension de l'algorithme NN présenté ci-dessus. k est le nombre de la distance euclidienne minimale entre chaque point de référence et l'emplacement de l'appareil [51]. L'algorithme kNN mesure la distance entre un scénario de requête et un ensemble de scénarios dans l'ensemble de données, elle calcule simplement les distances euclidiennes entre la lecture RSSI en direct et chaque empreinte de point de référence.

2.3.3. Algorithme pondéré des k-voisins les plus proches

En raison du NLOS dans un environnement intérieur, nous recevons des empreintes digitales avec la même force de signal à différents endroits. Dans ce cas, si nous utilisons l'algorithme de moyenne de la force du signal, nous obtiendrons une position inexacte. Donc on utilise la méthode pondérée des k plus proches voisins génère le résultat final par la moyenne pondérée des k positions qui ont k distances euclidiennes minimales [49].

2.4. Conclusion

Ce chapitre donne un aperçu général des systèmes de localisation en intérieur, notamment le OPS, OSM, le Wi-Fi, Bluetooth, RFID, et d'autres systèmes. Comparés à d'autres systèmes de positionnement, les systèmes de positionnement Wi-Fi sont plus adaptés et performants aux environnements intérieurs de plus de leur omniprésente partout. En outre on a développé cinq types de mesures pour le positionnement (à savoir TOA, TDOA, AOA, RTOF et RSS). Trois algorithmes d'empreintes digitales sont introduits, dont l'algorithme NN, kNN et Weighted-kNN.

3. APPROCHE THEORIQUE- DEAD RECKONING

L'approche proposée « Dead Reckoning » est basée sur l'estimation de l'orientation représentée par le Quaternion (voir annexe A pour la description théorique), le calcul de pas et l'estimation de la foulée, et la localisation par Wi-Fi.

3.1. Smartphone d'essai (Oppo Reno 5)

Les smartphones de ce jour sont devenus non seulement un outil de communication, mais aussi un dispositif de détection. On peut les considérer comme une interface importante qui relie le monde physique et numérique. On prend comme exemple, le (Oppo Reno 5) comprend différents types de capteurs tels que : le microphone, la caméra, le capteur de proximité, le GPS, l'accéléromètre, le gyroscope, la boussole, lecteur d'empreinte (voir Table 5), grâce auxquels ces capteurs permettent la mesure de différentes informations telles que le son, l'image, la vidéo, la géolocalisation et la mobilité.

Table 5. Les différents capteurs d'un smartphone sur un plateforme Android.

Nom du capteur	Type	Description	Utilisation typique
Accéléromètre	Matériel	Mesure la force d'accélération appliquée au terminal sur les trois axes (x, y et z), donc la force de gravitation (m/s ²).	Détecter les mouvements.
Gyroscope	Matériel	Mesure le taux de rotation sur chacun des trois axes en radian par seconde (rad/s).	Détecter l'orientation de l'appareil
Magnétomètre	Matériel	Mesure le champ géomagnétique sur les trois axes en micro tesla (μT).	Créer un compas.
Orientation	Logiciel	Mesure le degré de rotation que l'appareil effectue sur les trois axes.	Déterminer la position de l'appareil.
Capteur de proximité	Matériel	Mesure la proximité d'un objet en centimètres (cm).	Détecter si l'utilisateur porte le téléphone à son oreille pendant un appel.
Accélération Linéaire	Matériel ou Logiciel	Mesure la force d'accélération en (m/s ²) appliquée à un dispositif sur les trois axes physiques (x, y et z), à l'exclusion de la force de gravité.	Suivi de l'accélération selon un seul axe.

3.2. Architecture - Dead Reckoning

Pour l'exécution ou l'application de cette approche DR (Dead Reckoning), on doit avoir les capteurs inertiels à bord des smartphones : gyroscope, accéléromètre et magnétomètre. Le gyroscope est utilisé pour acquérir la vitesse angulaire,

l'accéléromètre pour mesurer l'accélération et le magnétomètre pour mesurer le champ magnétique.

Afin de localiser les smartphones à l'aide de l'approche DR, le calibrage de ces capteurs inertiels à un point de référence initial est primordial. Cette approche est stable, mais tend à se dégrader rapidement au fil du temps en raison du bruit de mesure accumulé provoquant une inactivité cumulative des positions [33].

La Fig 22 montre un modèle de prototype DR typique de smartphone pour compenser et réduire à la fois la dérive et le bruit des capteurs en utilisant des algorithmes de filtrage dédiés (par exemple le FKE).

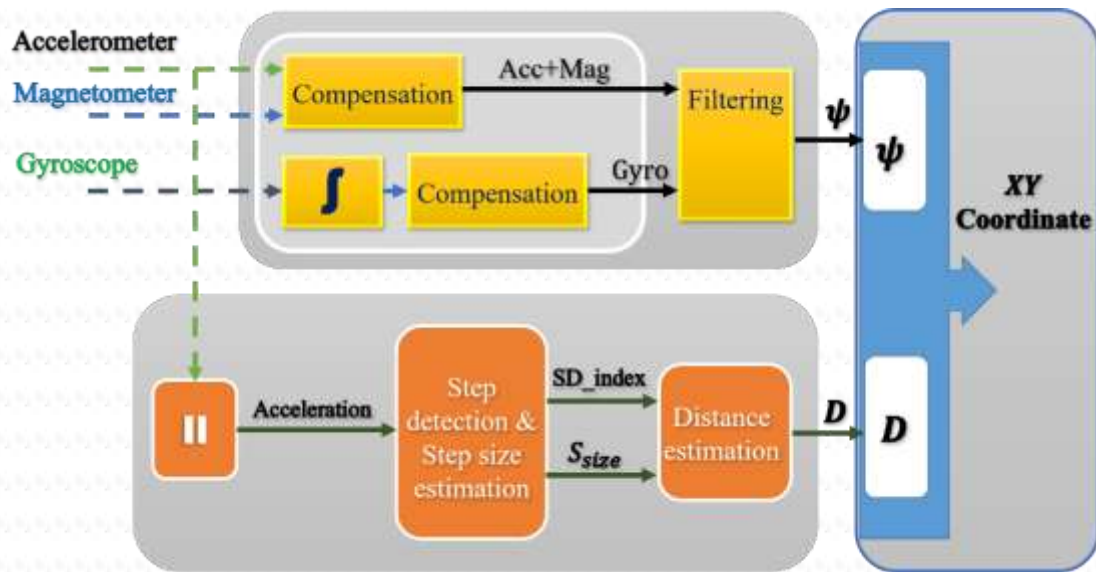


Fig 22. Un modèle de prototype DR pour les solutions de géolocalisation de smartphones [17].

L'estimation PDR basée sur le capteur est calculée en partant des coordonnées initiales X_0 , Y_0 , et de l'angle de cap initial ψ_0 . Le cap et les coordonnées horizontales sont propagés par l'équation (3.1) :

$$\begin{bmatrix} \psi_k \\ x_k \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{k-1} + \bar{\omega}_k \Delta t_k \\ x_{k-1} + \Delta S_k \cos(\psi_k) \\ y_{k-1} + \Delta S_k \sin(\psi_k) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3.1)$$

Où s_k est la distance parcourue sur l'étape avec l'indice k et t_k est la longueur de l'intervalle d'échantillonnage, qui dans ce cas est le même que l'intervalle de pas; t_k varie en fonction du

style de marche et de la vitesse du piéton. $\bar{\omega}_k$ est la mesure de la vitesse angulaire moyenne par le gyroscope, moyenné sur l'intervalle de pas t_k .

3.3. L'orientation

Le changement de la direction d'un utilisateur du smartphone par rapport à sa position précédente est déterminé par une méthode simple, qui consiste à utiliser un accéléromètre ou un gyroscope pour obtenir la différence angulaire. L'inconvénient de cette solution est qu'elle comprend un bruit imprévisible, en particulier dans les situations intérieures. Par exemple : L'affectation du magnétomètre par les champs magnétiques environnants.

La résolution de ce problème, nous conduit à utiliser un schéma de fusion de capteur pour obtenir une navigation intérieure précise. La fusion de capteurs est la combinaison des données de différents capteurs pour calculer la valeur d'orientation et filtrer le bruit en utilisant des filtres afin de remplir cette mission (exemple : filtre de Kalman étendu).

3.3.1. Filtre de Kalman étendu complémentaire (CEKF)

Le filtre de Kalman (KF) est une méthode de fusionnement des informations de mesure provenant de diverses sources. Quand les modèles de mesure ou de propagation ou les deux incluent des non-linéarités, l'application du filtre de Kalman étendu (EKF) est recommandée.

Entre autres, le filtre de Kalman complémentaire (CKF) ou le filtre de Kalman étendu complémentaire (CEKF) est appliqué pour combiner des capteurs inertiels ou des systèmes DR avec le GPS et d'autres capteurs d'aide dans diverses applications de navigation, et il peut également être trouvé dans les systèmes de navigation piétonne [29].

Un modèle de processus simple avec des erreurs modélisées sous forme de bruits blancs est appliqué, ce qui ne nécessite pas d'états d'erreur particuliers. Les éléments du vecteur d'état X_k sont les suivants : $x_{1k} = \text{cap}$, $x_{2k} = X - \text{coordonnée}$ et $x_{3k} = y - \text{coordonnée}$, et donc la propagation de l'état ressemble à l'estime présentée dans l'équation (3.1). Le filtre est démarré à partir

de l'estimation initiale \hat{x}_0 et de la covariance initiale P_0 , qui sont fixées selon la meilleure estimation disponible concernant la position initiale et l'incertitude des informations de position initiale. Le schéma fonctionnel de l'algorithme CEKF est illustré aux **Fig 23** et **Fig 24**.

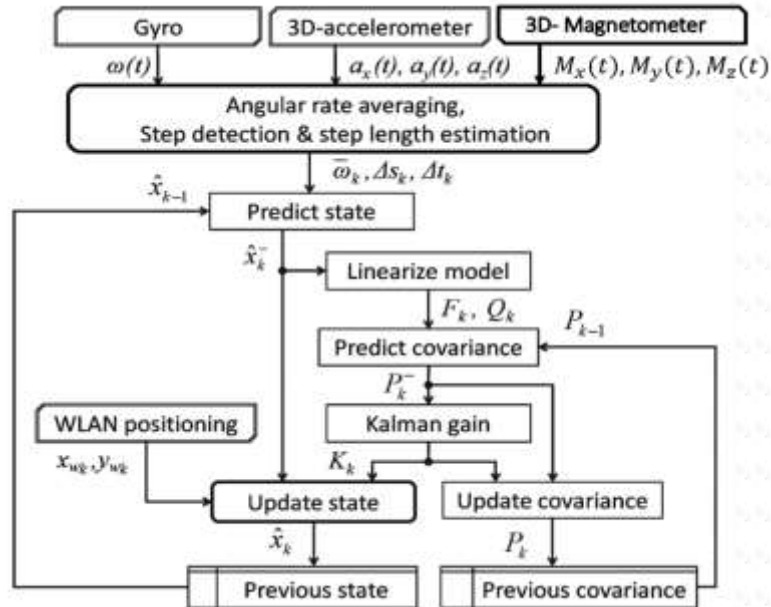


Fig 23. Algorithme CEKF pour fusionner les mesures du gyroscope de cap, de l'accéléromètre-3D, et du magnétomètre-3D avec des estimations de position basées sur le WLAN.

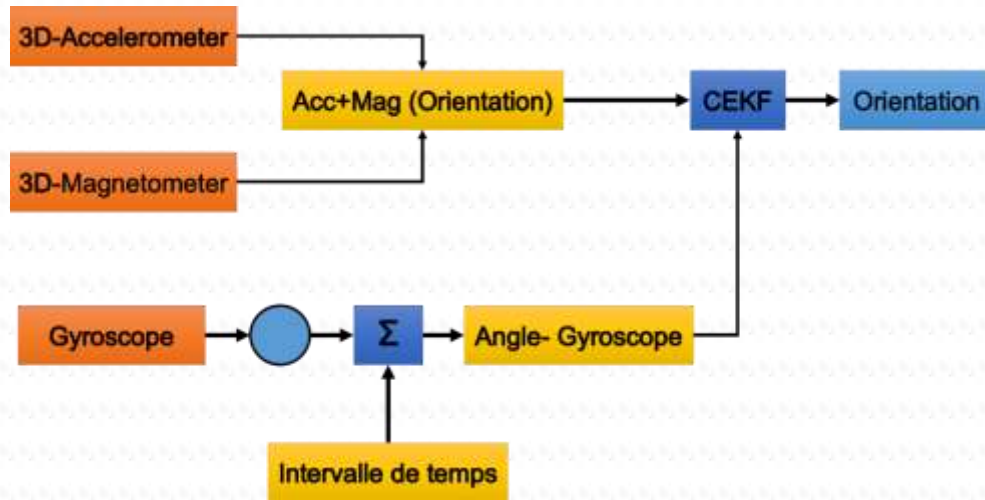


Fig 24. Schéma de fusion du capteur pour l'estimation d'orientation

L'état est propagé en utilisant :

$$\hat{\mathbf{X}}_k^- = \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \begin{bmatrix} \bar{\omega}_k \Delta t_k \\ \Delta S_k \cos(\hat{x}_{1k-1}) \\ \Delta S_k \sin(\hat{x}_{1k-1}) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3.2)$$

Où $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ désigne l'estimation a posteriori après la mise à jour de la mesure en utilisant les $(k - 1)$ ième échantillons de mesure, tandis que $\hat{\mathbf{X}}_k^-$ est l'estimation a priori pour le k ième pas de temps. Les définitions de k , S_k et t_k sont les mêmes que dans l'équation (3.1) et \hat{x}_{1k-1} est l'estimation postérieure précédente de cap. La matrice d'état \mathbf{F}_k , nécessaire pour la covariance propagation, est obtenu en prenant la dérivée partielle de l'équation (3.2) :

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\Delta S_k \sin \hat{x}_{1k}^- & 1 & 0 \\ \Delta S_k \cos \hat{x}_{1k}^- & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3.3)$$

Comme l'effet de l'incertitude de longueur de pas est multiplié par les fonctions *sin* et *cos* de cap, le bruit d'état \mathbf{Q}_k est également approximé à chaque pas de propagation :

$$\mathbf{Q}_k = \text{diag} \left(\begin{bmatrix} V_\omega \\ \cos^2(\hat{x}_{1k}^-) V_{\Delta S} \\ \sin^2(\hat{x}_{1k}^-) V_{\Delta S} \end{bmatrix} \right) \dots \dots \dots (3.4)$$

Où V_ω est la variance de la mesure de la vitesse angulaire et $V_{\Delta S}$ est la variance de l'estimation de la longueur de pas. La propagation de la covariance pour obtenir la covariance a priori \mathbf{P}_k^- :

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k, \dots \dots \dots (3.4)$$

Où \mathbf{P}_{k-1} est la covariance postérieure du pas de temps précédent. L'entrée de mesure du filtre est $\mathbf{z}_k = [x_{W_k} \ y_{W_k}]^T$, constituée des coordonnées x et y estimées à l'aide des empreintes digitales WLAN, et la matrice de mesure est :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Maintenant, les équations pour la mise à jour de la mesure de l'état $\hat{\mathbf{X}}_k$ et de la covariance \mathbf{P}_k sont :

$$\begin{aligned}
\mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_k^{-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^{-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \\
\hat{\mathbf{X}}_k &= \hat{\mathbf{X}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}}_k^-) \dots \dots \dots (3.5) \\
\mathbf{P}_k &= (\mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^-
\end{aligned}$$

Où \mathbf{R} est la covariance des estimations de coordonnées basées sur le WLAN et $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ est la matrice d'identité.

3.3.2. Filtre complémentaire

Un filtre complémentaire (voir Fig 25) peut déjà donner de très bons résultats. Un filtre passe-bas lisse les signaux nerveux en faisant une moyenne sur un certain nombre de mesures [50]. D'autre part, Un filtre passe-haut fonctionne comme une porte qui ne laisse passer qu'une valeur si elle a suffisamment changé par rapport à sa valeur précédente. Étant donné que les gyroscopes ne mesurent que les vitesses, ils nécessitent une étape d'intégration pour donner une orientation. Au cours de cette intégration, le bruit est transformé en dérive qui peut être éliminée avec un filtre passe-haut.

La structure d'un filtre complémentaire intègre des données à partir de l'accéléromètre, du magnétomètre et du gyroscope pour obtenir une estimation de l'orientation absolue sans dérive qui devrait toujours avoir une bonne réponse dynamique (voir Fig 25).

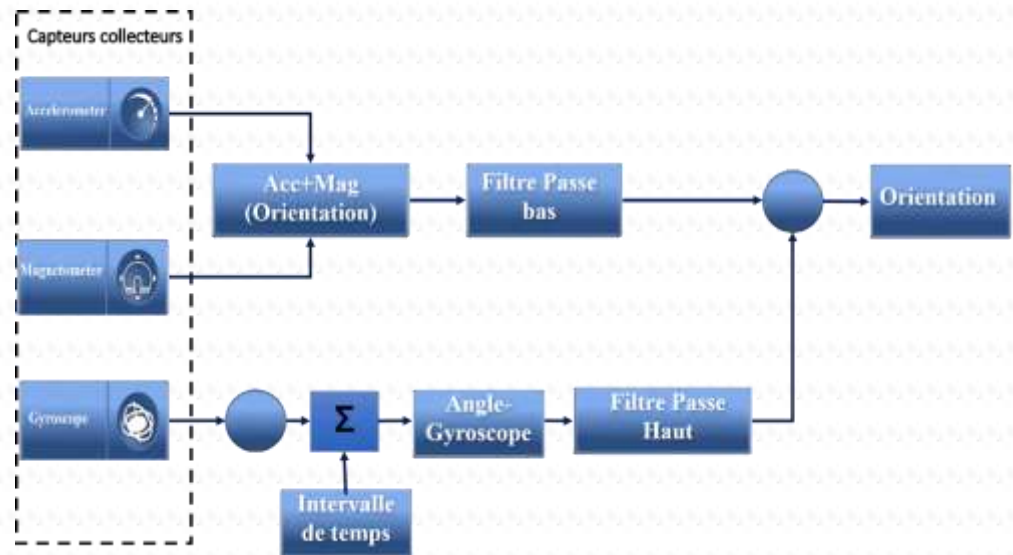


Fig 25. Fusion de capteurs avec le filtre complémentaire.

3.4. Détection de pas et calcul de distance

Le comptage de pas est largement utilisé dans la localisation en intérieur, en raison de son estimation précise des longueurs de pas et sa simplicité de mise en œuvre. Le pas est généralement compté par la détection de pic de la vallée des sorties de l'accéléromètre.

La sélection des signaux de l'accéléromètre pourrait être différente selon la technique utilisée [52]- [54].

Pour l'estimation de la longueur du pas, [52] suppose une longueur d'étape fixe qui peut être déterminée en divisant une distance de marche fixe par le nombre de pas prises. La longueur du premier pas (Pas 1) sera estimée à partir de la formule suivante [53] :

$$l = K^4 \sqrt{A_{max} - A_{min}} \dots \dots \dots (3.6)$$

$A_{max} - A_{min}$ désignent les valeurs maximales et minimales de l'accélération verticale dans une foulée l . K est une constante.

Pour notre Approche, on a adopté la méthode de YU, Z [55], pour cela l'amplitude d'accélération est utilisée pour le comptage de pas. La formule (3.6) a été utilisée pour l'estimation de la longueur de la foulée l .

3.5. Wi-Fi

Les signaux Wi-Fi sont des signaux radiofréquence (Radio Frequency RF). La propagation du signal RF est fortement influencée par le milieu rencontré par l'onde de signal en expansion. L'environnement en intérieur est un cas clair d'environnements multivoies, où les signaux RF n'émettent pas comme une seule onde, mais comme un front d'onde en expansion.

Au début, un front d'onde uniforme sort de l'antenne d'émission. Les obstacles rencontrés par le front d'onde peuvent créer de nouveaux signaux RF. Certains composants se déplacent directement vers l'antenne de réception tandis que d'autres composants pourraient diffuser, disperser ou être réfléchis par des obstructions.

Ces éléments peuvent avoir un impact positif ou négatif dans le signal reçu, c'est-à-dire augmentation ou diminution de la valeur mesurée par RSSI. Par exemple, sans diffraction, diffusion et réflexion, le signal ne peut pas atteindre certains endroits dans des environnements intérieurs.

Des recherches antérieures sur le positionnement sans fil montrent que les périphériques compatibles Wi-Fi peuvent être localisés en appliquant l'un des deux types de techniques de détection de localisation, à base de propagation ou empreinte de position (fingerprinting) [27].

Les techniques basées sur la propagation mesurent la puissance du signal reçu (RSS), et appliquent des modèles mathématiques pour déterminer l'emplacement de l'appareil.

Étant donné que l'environnement d'application de cette recherche est un bâtiment intérieur (clairement un environnement multivoies), une solution utilisant cette technique apparaît comme la plus appropriée.

➤ **Trilatération Wi-Fi basée sur le modèle de propagation du signal**

La manière la plus simple d'estimer les distances entre le récepteur et l'émetteur est un modèle de perte de chemin d'espace libre (free-space path loss) :

$$FSLP + 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 27.55 \dots \dots \dots (3.7)$$

Où d est la distance de séparation de l'émetteur-récepteur en mètres, f est la fréquence du signal en mégahertz, $FSLP$ la perte du chemin de la puissance du signal reçu en dBm .

Par conséquent, on peut déterminer la distance d à partir de l'équation (3.7) :

$$d = 10^{\frac{FSLP - 20\log_{10}(f) + 27.55}{20}} \dots \dots \dots (3.8)$$

L'image ci-dessous représente la partie du plan de l'étage de l'immeuble mise à notre disponibilité lors de l'application de notre approche proposée.

➤ **Point d'accès (AP)**

Cette recherche porte sur l'utilisation de points d'accès installés dans la zone de test comme transmetteur. La zone de test a une bonne couverture du signal Wi-Fi. Le point d'accès est de type TP-Link Archer C5 V2.0 Routeur Gigabit Wi-Fi

Double Bande AC1200 (2.4GHz 300 Mb/s, 5GHz 867Mbps, 5 Ports Gigabit, 2 Ports USB).



Fig 26. Plan de l'étage de l'immeuble mise à notre disponibilité lors de l'application de notre approche proposée avec les points d'accès (AP).

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un notre approche proposée « Dead Reckoning », qui est basée sur l'estimation de l'orientation, le calcul de pas et l'estimation de la foulée, et la localisation par Wi-Fi. On a expliqué que pour l'exécution de cette approche, on doit avoir capteurs inertiels à bord des smartphones : gyroscope, accéléromètre et magnétomètre. Comme nous avons précisés que cette méthode est stable, mais tend à se dégrader rapidement au fil du temps en raison du bruit de mesure accumulé provoquant une inactivité cumulative des positions. Une solution de compensation et de réduction de bruits des capteurs est d'utiliser des algorithmes de filtrage, dans notre approche on a utilisé le filtre de Kalman étendu complémentaire (CEKF), qui a pris une place de traitement dans ce chapitre. Finalement un plan du bâtiment mis à notre disponibilité lors de l'application de notre approche doter avec des points d'accès (AP), a été présenter.

4. APPROCHE : IMPLEMENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

4.1. Introduction

Les capteurs inertiels à bord des smartphones (Oppo Reno5- Modèle : CPH2159) à utiliser dans l'application : gyroscope, accéléromètre et magnétomètre.

Plusieurs tests ont été effectués, afin d'analyser la précision et le comportement des capteurs. Les données des trois capteurs sont collectées en ligne avec un smartphone Android en utilisant une application qui répertorie les mesures du téléphone vers un PC (Personal Computer), où l'on peut accéder à Matlab par exemple. L'application est disponible gratuitement depuis Google Play (<http://goo.gl/0qNyU>), sous le nom Sensor Fusion Fig 27. a).



a) Menu d'accueil

b) Sélection du capteur

c) Données d'Accéléromètre

Fig 27. Application « Sensor Fusion app ».

Les échantillons de l'accéléromètre, du magnétomètre et du gyroscope sont pris à 100 Hz (équivalent à 0.01 secondes).

La sortie des capteurs est relative à l'orientation de l'appareil (appelée Système de coordonnées de l'appareil). Le système de coordonnées de l'appareil est défini par rapport à l'écran du smartphone dans son orientation par défaut. Les axes ne sont pas échangés lorsque l'orientation de l'écran de l'appareil change.

L'axe des x est horizontal et pointe vers la droite, l'axe y est vertical et pointe vers le haut, et l'axe z pointe vers l'extérieur de la face avant de l'écran **Fig 28**.

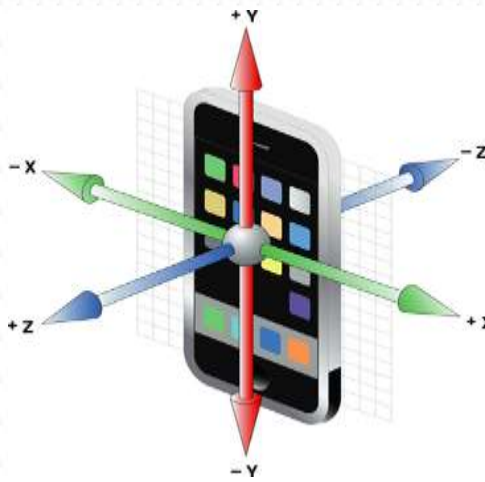


Fig 28. Orientation des coordonnées sur Smartphone

4.2. Algorithme Adopté

Le système de localisation intérieure comprend plusieurs modules, le détecteur de pas, l'estimateur de longueur de pas, l'estimateur de l'orientation, la fusion de capteurs (Voir **Fig 29**).

Le système interagit avec un utilisateur pour obtenir l'emplacement initial par l'entrée de l'utilisateur. Il fournit la courante estimation de position sur une carte intérieure. En outre, un module de capteur fournit des lectures IMU (Inertial Measurement Units) à ces estimateurs en continu.

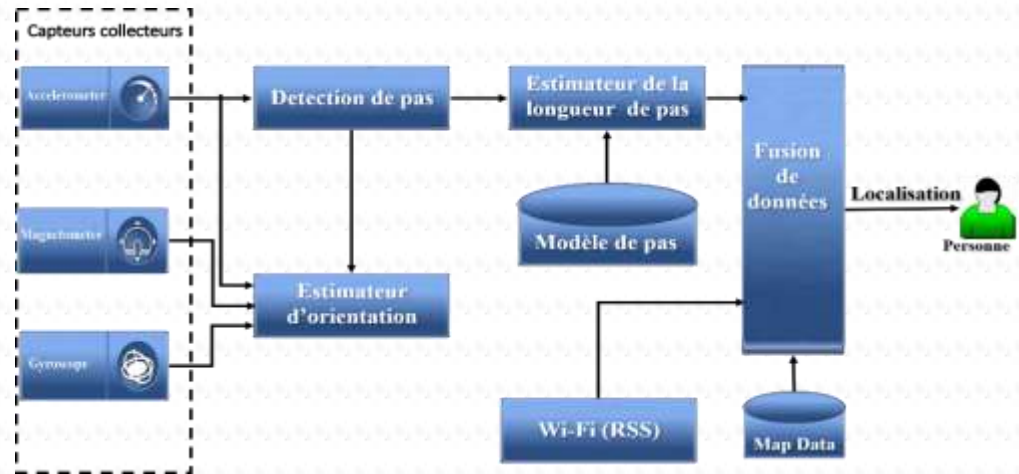


Fig 29. Algorithme Adopté

4.3. Principe d'implémentation

En fait, dans cette section en va développer une application sous Android. L'élaboration de cette application, comprend la fonctionnalité, la conception du système, l'interface utilisateur et l'algorithme cartographie.

4.3.1. Fonctionnalité

L'étapes à suivre, pour le développement de l'application sous Android sont :

- **Étalonnage des capteurs** : la première des choses, qu'il faut faire est le l'étalonnage des capteurs. En fait, l'étalonnage est effectué, en pointant l'utilisateur vers le nord défini du bâtiment et restant immobile pendant quelques secondes. On peut donc : calculer en moyenne l'azimut du compas (pour définir l'angle de l'indication), mesurer l'accélération linéaire et le biais du gyroscope (valeurs en repos) pour corriger les lectures par la suite.
- **Création d'un fichier d'échantillonnages de données** : Les données collectées des capteurs seront échantillonnées pendant une période déterminée, en utilisant la fréquence d'échantillonnage la plus élevée pour chaque capteur. Les échantillons de chaque capteur seront stockés dans un fichier avec des informations supplémentaires telles que l'horodatage de l'événement (time-stamp) et les valeurs traitées (par exemple,

l'accélération intégrée), et cela dans le but de faciliter l'analyse des données avec un ou des outils externes (par exemple Matlab, Excel, etc.).

- **Affichage des données :** Nous commençons au début du développement de l'application par l'affichage sur écran des valeurs de chacun des capteurs utilisés (accéléromètres, gyroscope, magnétomètre), et cela pour analyser le comportement des capteurs. Ensuite nous pouvons afficher d'autres données comme accélération linéaire, orientation, rotation et la gravité, etc., en fonction des valeurs des capteurs récoltés.
- **Affichage du nombre de pas et de la distance :** L'Affichage du nombre de pas et la distance parcourue lorsque l'utilisateur mise en marche.
- **Scan et sélection des récepteurs Wi-Fi :** Scan la zone pour des BSSID's disponibles, et sélection des BSSID's qui sont en dessous du seuil de niveau de signal.
- **Google Maps API (Application Programming Interfaces) :** Google Maps Android API nous permet d'ajouter des cartes utilisant des données Google Maps à notre application. Cette API gère automatiquement : L'accès aux serveurs Google Maps, le téléchargement de données, l'affichage de la carte, et la réponse aux gestes effectués sur la carte.
- **Sélection Map View :** On peut chercher notre carte qui se limite à la carte de l'étage de l'immeuble (Fig 26) en naviguant dans Google Map ou on a qu'à sélectionner les points de départ du site qui se trouve sur le menu de l'application. La carte précédemment sélectionnée est affichée et le moteur d'estimation de position démarre avec les canaux par défaut. La position et l'orientation estimée est affichée comme une trace de points.
- **Base de donnée PostgreSQL :** Une base de données PostgreSQL stocke les informations sur les points géographiques des marqueurs individuels, telles que le type de lieu (s'il s'agit d'un labo ou d'une salle de conférence),

son nom, son adresse et ses coordonnées géographiques. La carte récupère ces informations depuis la base de données via un fichier XML qui sert d'intermédiaire entre la base de données et la carte. La liste sera actualisée chaque 3s.

- **Chargement des points géographiques des marqueurs :** Affichage des informations d'une base de données PostgreSQL sur une carte Google en utilisant Google Maps API.
- **Sélection d'un canal :** Lorsque la Map View est affichée, l'utilisateur peut activer et désactiver les différents canaux/sources de positionnement fusionnés pour calculer la position estimée. Les sources possibles sont : Wi-Fi, PDR, Map Matching.

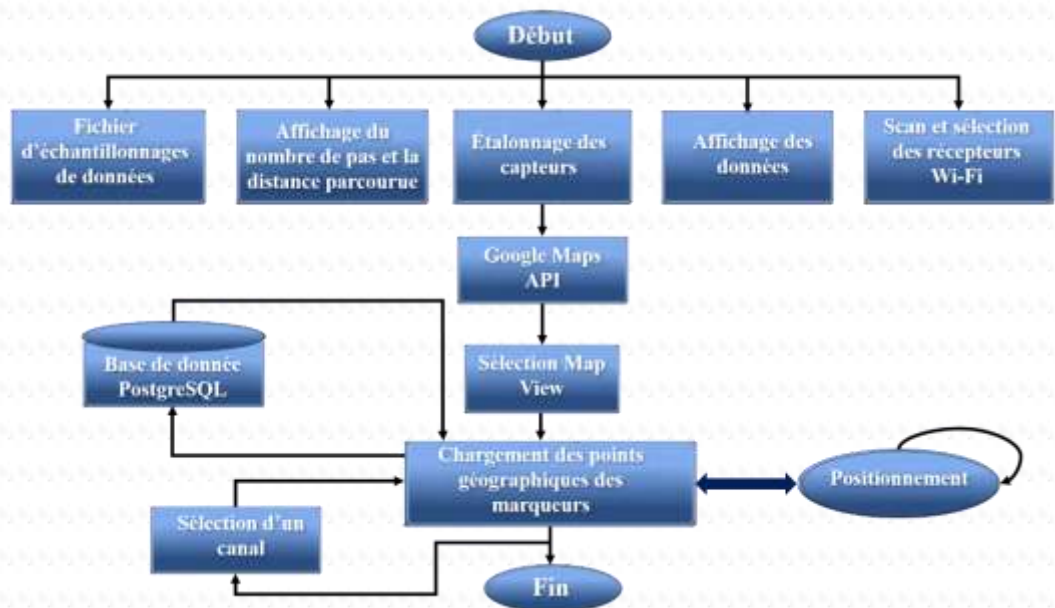


Fig 30. Diagramme d'état de l'application

4.4. Résultats préliminaires données par les capteurs

Tout d'abord, nous commençons par mettre le smartphone, à plat avec son dos sur la table. Il doit être immobile afin d'empêcher toute force autre que la gravité d'affecter la sortie.

Les échantillons récoltés seront enregistrés pendant une période de 20 secondes.

4.4.1. Accéléromètre

L'accéléromètre est un mesure accéléromètre de 3D, c'est-à-dire qu'il mesure l'accélération sur les trois axes (x, y, et z) en m/s^2 . L'accélération mesurée est toujours influencée par la force de la gravité terrestre (voir équation 4.1).

$$a_d = -g - \Sigma F/m \dots \dots \dots (4.1)$$

Où a_d est l'accélération exercée à l'appareil, g est la force de gravité, F la force agissant sur l'appareil et m la masse de l'appareil (smartphone). Le signe Σ représente la somme des projections sur les axes (voir Fig 31).

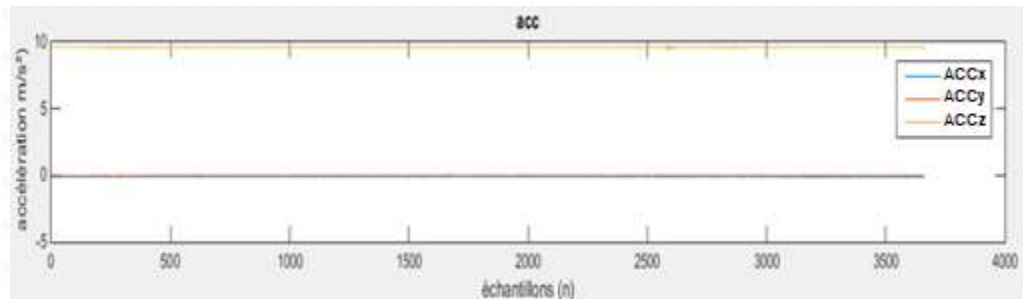


Fig 31. Sortie d'accélération

Table 6. Statistiques de sortie de l'accéléromètre

Projection/Axes	Moyenne	Max	Min	Ecart-type -déviation
$Acc_x (m/s^2)$	-0.09	-0.05	-0.13	0.015
$Acc_y (m/s^2)$	-0.02	0.02	-0.05	0.016
$Acc_z (m/s^2)$	9.61	9.69	9.60	0.025
$Acc_{Tot} (m/s^2)$	9.61	9.69	9.60	0.030

D'après le Table 6, l'accélération totale mesurée au repos est en moyenne $9,61m/s^2$, l'écart type de Acc_{Tot} est de $0,030 m/s^2$. L'accélération pourrait générer une grande erreur avec le temps.

4.4.2. Gyroscope

On mesure avec gyroscope le taux de rotation de la cible (smartphone) autour des axes x, y et z. Les valeurs mesurées sont en (radians par seconde : r/s). Le sens positif de la rotation de la cible suit le sens inverse de rotation des aiguilles d'une montre.

La **Fig 32** montre la vitesse angulaire mesurée autour des axes x , y et z lorsque le smartphone est au repos sur la table. Les trois courbes montrent que les valeurs sont presque nulles, sauf quelques pics).

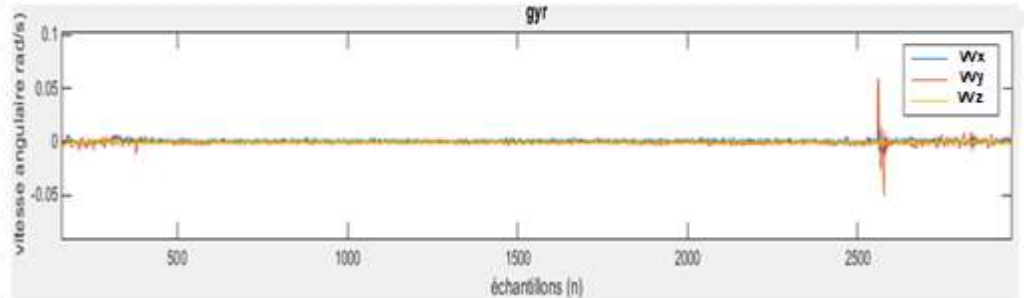


Fig 32. Vitesse angulaire.

Table 7. Statistiques du gyroscope (vitesse angulaire)

Projection/Axes	Moyenne	Max	Min	Ecart-type -déviation
ω_x (r/s)	0.00066	0.0050	-0.0012	0.0018
ω_y (r/s)	-0.00053	0.0073	-0.0037	0.0029
ω_z (r/s)	-0.00036	0.0024	-0.0024	0.0011

4.4.3. Magnétomètre

Le magnétomètre mesure la force du champ magnétique ambiant, d'où l'unité de mesure est le micro-Tesla (μT), dans les axes x , y et z . La **Fig 33** montre le champ magnétique mesuré dans les axes x , y et z respectivement.

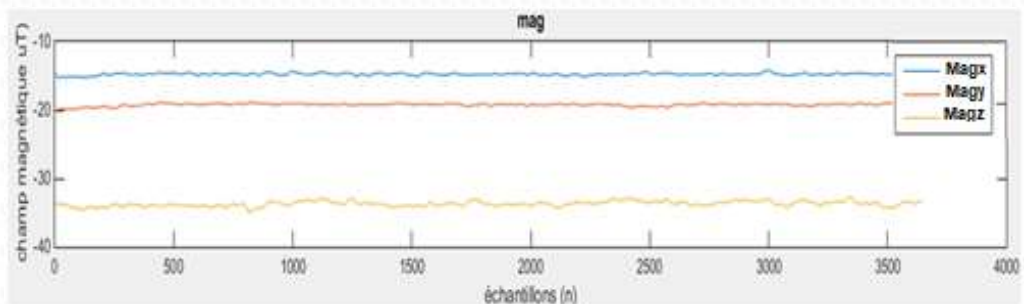


Fig 33. Champ magnétique mesuré.

Les statistiques du test sont affichées dans le tableau Table 8:

Table 8. Statistiques de sortie du magnétomètre

Projection/Axes	Moyenne	Max	Min	Ecart-type -déviation
Mag_x (μT)	-14.761	-14.60	-15.30	0.1640
Mag_y (μT)	-19.230	-2.30	-19.10	0.1951
Mag_z (μT)	-33.708	-32.70	-34.10	0.3711

4.5. Calcul de pas

Pour le calcul de pas, on doit prendre les mesures des capteurs en se déplaçant. Les échantillons sont enregistrés pendant une période d'environ 20 secondes, même procédure qu'au repos. Les 5 premières secondes, la cible reste immobile, puis on fait 15 minutes de marches et ensuite un nouveau repos de 5 secondes. La direction de marche est le Nord.

La Fig 34 montre les valeurs **d'accélération brutes** sur les trois axes de la cible (smartphone) en marchant.

On peut mentionner que la plupart d'activité est détectée sur l'axe z de la cible, et cela est dû à la position de maintien du smartphone qui est maintenu à la main avec son dos face à la surface de la terre ce qui entraîne l'influence de la gravité principalement sur l'axe z. La force appliquée à partir du pas à la même direction que la gravité qui explique les pics brusques détectés sur l'axe z (voir Fig 34).

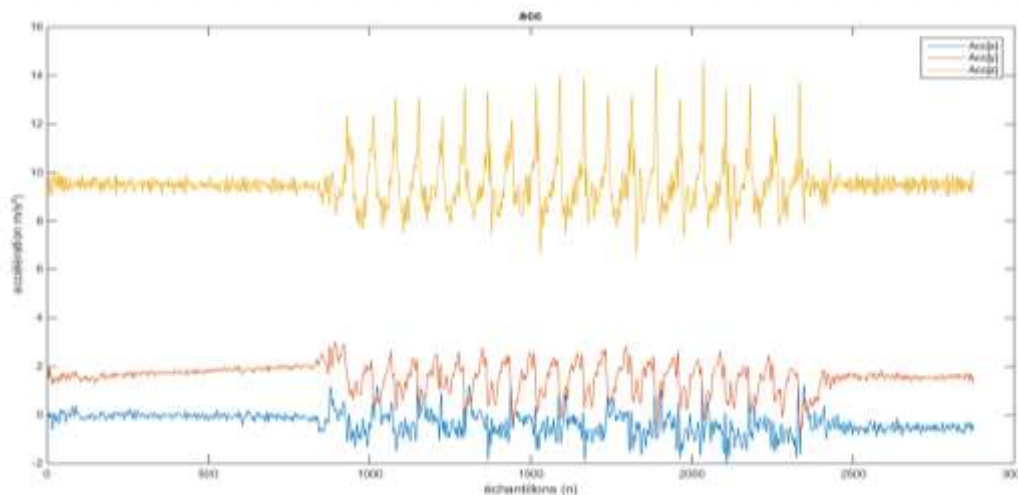


Fig 34. Données de l'accéléromètre (x, y et z)

Une partie d'activité détectée sur l'axe des y (Accélération détectée- Acc_y) montre le sens de marche causé par le déplacement réel. Le reste d'activité sur l'axe des x (Accélération détectée- Acc_x) est dû au maintien incorrect de la cible (le smartphone doit être maintenu horizontalement dans la main).

Puisque la marche est faite "tout droit" le long de l'axe des y, l'accélération devrait être nul sur les côtés.

L'algorithme de comptage de pas proposé est conçu pour fonctionner en temps réel. Cependant, avant d'entrer dans la façon de détecter un pas en temps réel, on va d'abord mettre en place des règles sur la façon de définir un pas à partir des signaux de l'accéléromètre.

La Fig 35 illustre un signal d'accéléromètre avec 6 pas distincts.

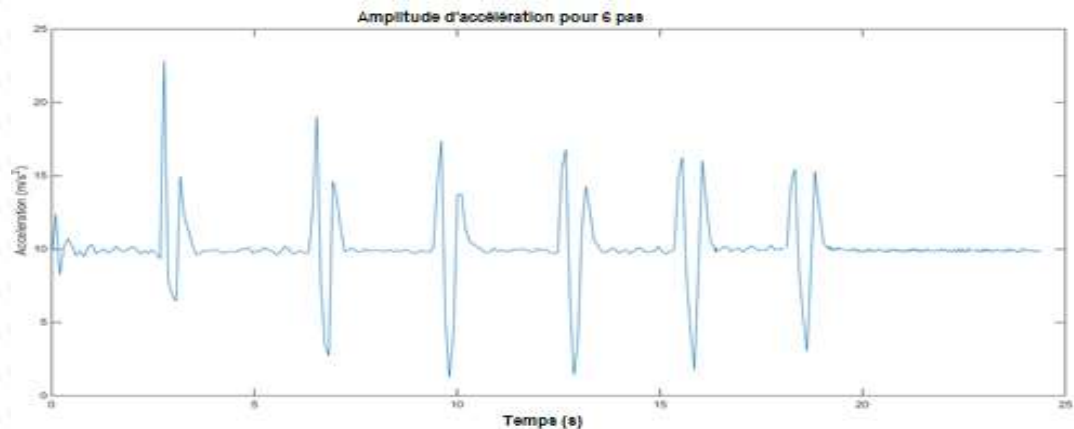


Fig 35. Amplitude d'accélération (6 pas effectués).

L'illustration de la relation entre le nombre de pas et les signaux d'accéléromètre correspondants, repose sur la mesure avec des pauses entre chaque étape de marche tracée dans la Fig 35.

A partir de la Fig 35, les six impulsions de l'amplitude de l'accélération correspondent à six marches marquées. Par conséquent, si une telle impulsion est détectée, nous pouvons conclure qu'un pas a été pris. On peut définir les règles de calcul de pas comme suit :

- **Règle 1 :** Chaque étape comprend un pic (maximum local) et la prochaine vallée (minimum local) de l'amplitude d'accélération. Si on détecte un pic et une vallée, on compte un pas. De nombreux petits pics et vallées peuvent être observés, qui sont dues au bruit ou aux éventuels tremblements du support de la cible. Ces variations sont appelées **paires de pics** et de vallée **non conformes**.

- **Règle 2 :** la différence entre une paire efficace pic-vallée doit dépasser une valeur de seuil prédéfinie Δh . La valeur seuil peut être déterminée par un entraînement hors ligne. Par exemple, on demande à un piéton de marcher pour un nombre fixe d'étapes plusieurs fois pour déterminer la valeur de seuil qui peut filtrer correctement les bruits.

Pour notre travail, cinq tests de 30 étapes ont été menés pour déterminer la valeur seuil, qui se trouve à 1.85 m/s^2 .

- **Règle 3 :** Pour une paire efficace de pic et de vallée, la différence de temps entre le pic et la vallée doit dépasser 100 ms .

La différence de temps de 100 ms implique que le piéton n'aura pas un taux de pas supérieur à 5 étapes par seconde.

Pour améliorer encore l'efficacité du comptage des pas en temps réel, les demi-pas sont comptés plutôt que des pas complets. Un demi-pas est détecté si la règle 4 est provoquée, qui est considérée (Règle 4) comme une subdivision de la règle 1.

- **Règle 4 :** Un demi-pas comprend un pic et une vallée. Un demi-pas est compté si une vallée est détectée à côté d'un pic ou si un pic est détecté à côté d'une vallée.

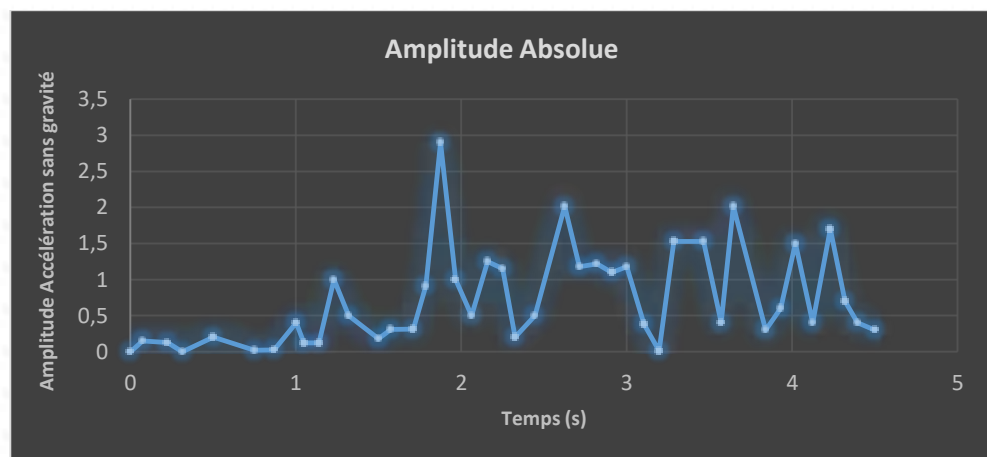


Fig 36. Détection des pas après application du seuil $\text{THR}=0.85\text{m/s}^2$

Au point de pointe et de la vallée, les données tendent à descendre immédiatement et ne restent pas longtemps. Par conséquent, l'état d'AFETRMAL et de AFTERMIN peut être rangé en toute sécurité.

La méthode de YU, Z [55] se soucie seulement s'il y a une paire de pic et de vallée, mais pas l'ordre d'apparition.

NB : l'algorithme de calcul de pas ne convient qu'aux mouvements planaires.

4.6. Calcul de la position

Après le calcul de pas (taille et angle de pas), on peut calculer la nouvelle position en fonction de la position courante. C'est à dire le calcul de la fonction Calcul_Nouvelle_Position. Dans notre cas, nous assimilerons la terre à une sphère en utilisant la formule de « **Haversine** » pour calculer le point de destination en utilisant un arc du cercle (voir l'équation 4.1).

$$\begin{cases} a = \sin^2\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin^2\left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2}\right) \\ c = 2 \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{1-a}}\right) \\ d = 6371 \cdot c \end{cases} \quad \text{Formule de "Haversine" ... (4.1)}$$

D'où : φ est la latitude, λ est longitude.

4.7. Orientation

Pour tester l'efficacité de l'orientation des deux méthodes (CEKF, et CF) expliqués dans les chapitres précédents, nous avons choisi un parcours fermé dans l'étage de l'immeuble (voir Fig 26), où nous avons à chaque fois tourné avec un angle de 90 degré.

Ensuite nous avons comparés les résultats obtenus avec ceux du capteur d'orientation intégré dans l'Android. Les résultats sont illustrés à la **Fig 37**.

Comme nous pouvons le voir, les trois méthodes ont bien réagi lorsque nous tournons, le capteur d'orientation (points bleu) est une méthode logicielle fournie par Android qui utilise des lectures de l'accéléromètre et du magnétomètre pour calculer l'orientation du téléphone le signal est plutôt instable avec un écart type assez élevé. Cela démontre l'effet des erreurs de l'accéléromètre et la sensibilité du magnétomètre.

Le filtre de Kalman soit (linéaire, étendu, ou étendu complémentaire) est le meilleur filtre du point de vue théorique, mais sa complexité est trop grande pour l'implémenter sur une application Android.

Le filtre complémentaire peut substituer le filtre de Kalman, vu sa facilité, et sa rapidité d'implémentation.

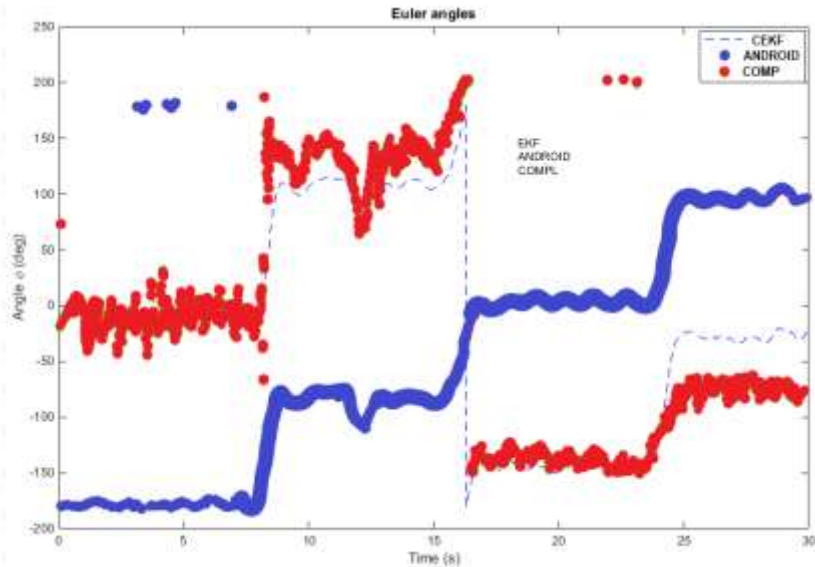


Fig 37. Affichage de l'angle Azimuth en degré des trois méthodes pour estimer la position.

4.8. PDR

Un test de marche a été effectué lorsque la position a été estimée en utilisant les capteurs inertiels et les algorithmes d'orientation et détection de pas. Les résultats sont illustrés à la Fig 38.

La ligne bleue est le parcours réel. Les points rouges représentent l'estimation de position en utilisant l'intégration de l'orientation du filtre Kalman étendu complémentaire. Les points verts montrent l'estimation de position grâce à l'intégration de l'orientation du filtre complémentaire.

Comme on le voit dans la **Fig 38**, les résultats ne sont pas trop éloignés de la réalité. Même si l'algorithme de PDR seul semble donner les meilleurs résultats dans ce test particulier, il faut garder à l'esprit que les résultats vont empirer avec le temps, car la foulée (longueur des pas) varie et la détection des fausses étapes augmente.

Les faits mentionnés ci-dessus motivent davantage la nécessité d'ajuster en permanence les erreurs en mettant à jour le poste à partir de canaux plus fiables à plus long terme.

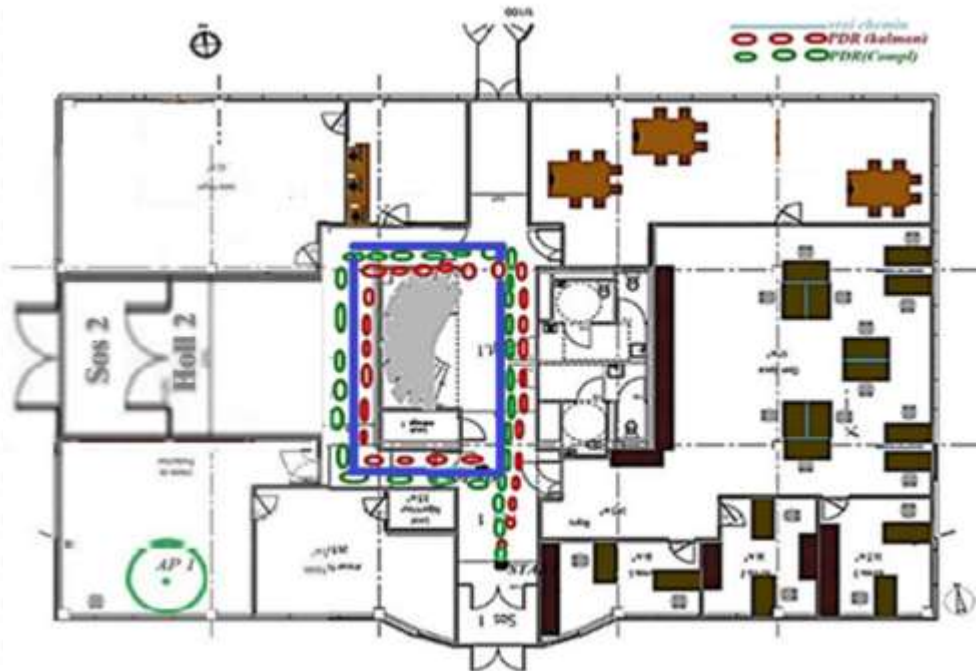


Fig 38. Position estimée à l'aide de capteurs inertiels (test de marche).

4.9. Conclusion

Ce chapitre présente la mise en œuvre du modèle de fusion du capteur et présente les résultats obtenus finalement. Le niveau de précision acquis est tout à fait satisfaisant. L'écart moyen entre la position estimée et la position réelle était inférieur à deux mètres.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous avons présentés une méthode de localisation d'une cible (smartphone) dans un environnement intérieur (indoor). La solution proposée repose sur la fusion de capteurs inertiels d'un smartphone (gyroscope, accéléromètre, magnétomètre).

Afin de déterminer l'orientation de l'utilisateur, on a étudié, comparé et implémenté deux types de filtres : le Filtre de Kalman Etendu complémentaire (CEKF) et le filtre complémentaire (à bases de filtre passe bas et filtre passe haut). Les résultats obtenus ont été comparés à l'orientation fournie par le système Android et montrent une nette amélioration de l'estimation de l'orientation. D'un autre côté, un seuil a été déterminé afin de détecter le nombre de pas effectués ce qui limite l'erreur d'estimation lors du traitement du signal fournis par l'accéléromètre.

Le smartphone mis en service est « Oppo Reno 5 », afin de faire les essais sur notre approche proposée sous Android. L'objectif est d'illustrer l'amélioration à porter cette dernière, après comparaison de ses résultats aux résultats obtenus par : PDR sans correction Wi-Fi (Beacons), basé sur deux capteurs (accéléromètre et magnétomètre). Les résultats de l'expérience donnent une précision de localisation moyenne de 1.5 m.

Ce travail ouvre l'horizon de recherche sur la réduction d'erreurs d'estimation de la position. L'une des solutions qui peut être envisagée est la mise en place d'une infrastructure Bluetooth (iBeacons) qui peut donner des résultats très concluant (erreur < 0.5 mètres).



BIBLIOGRAPHIES-----

- [1] Krieg, J. G. (2017). *Localisation indoor à l'aide des capteurs d'un smartphone* (Doctoral dissertation).
- [2] Navstar, G. P. S. (1993). GLONASS: global satellite navigation systems, Daly, P. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 5(6), 349-357.
- [3] Xiao, H., Zhang, H., Wang, Z., & Gulliver, T. A. (2017, August). An RSSI based DV-hop algorithm for wireless sensor networks. In *2017 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM)* (pp. 1-6). IEEE.
- [4] Sun, M., Wang, Y., Xu, S., Qi, H., & Hu, X. (2020). Indoor positioning tightly coupled Wi-Fi FTM ranging and PDR based on the extended Kalman filter for smartphones. *IEEE Access*, 8, 49671-49684.
- [5] Simões, W. C., Machado, G. S., Sales, A., de Lucena, M. M., Jazdi, N., & de Lucena, V. F. (2020). A review of technologies and techniques for indoor navigation systems for the visually impaired. *Sensors*, 20(14), 3935.
- [6] Sun, M., Wang, Y., Xu, S., Qi, H., & Hu, X. (2020). Indoor positioning tightly coupled Wi-Fi FTM ranging and PDR based on the extended Kalman filter for smartphones. *IEEE Access*, 8, 49671-49684.
- [7] Poulouse, A., & Han, D. S. (2021). Hybrid deep learning model based indoor positioning using Wi-Fi RSSI heat maps for autonomous applications. *Electronics*, 10(1), 2.
- [8] Li, X., Wang, J., & Liu, C. (2015). A Bluetooth/PDR integration algorithm for an indoor positioning system. *Sensors*, 15(10), 24862-24885.
- [9] Ho, N. H., Truong, P. H., & Jeong, G. M. (2016). Step-detection and adaptive step-length estimation for pedestrian dead-reckoning at various walking speeds using a smartphone. *Sensors*, 16(9), 1423.
- [10] Brena, R. F., García-Vázquez, J. P., Galván-Tejada, C. E., Muñoz-Rodríguez, D., Vargas-Rosales, C., & Fangmeyer, J. (2017). Evolution of indoor positioning technologies: A survey. *Journal of Sensors*, 2017.
- [11] Guo, X.; Shao, S.; Ansari, N.; Khreishah, A. Indoor Localization Using Visible Light Via Fusion of Multiple Classifiers. *IEEE Photonics J.* 2017, 9, 1–17.
- [12] Evennou, F., & Marx, F. (2006). Advanced integration of WiFi and inertial navigation systems for indoor mobile positioning. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2006, 1-11.
- [13] Leppäkoski, H., Collin, J., & Takala, J. (2013). Pedestrian navigation based on inertial sensors, indoor map, and WLAN signals. *Journal of Signal Processing Systems*, 71(3), 287-296.
- [14] Faheem, F. (2016). Ibeacon based proximity and indoor localization system. *Open Access Theses*. 767. https://docs.lib.purdue.edu/open_access_theses/767.
- [15] Sun, M., Wang, Y., Xu, S., Qi, H., & Hu, X. (2020). Indoor positioning tightly coupled Wi-Fi FTM ranging and PDR based on the extended Kalman filter for smartphones. *IEEE Access*, 8, 49671-49684.
- [16] Alakhras, M., Hussein, M., & Oussalah, M. (2020). Location fixing and fingerprint matching fingerprint map construction for indoor localization. *Journal of Sensors*, 2020.

- [17] Maghdid, H. S., Lami, I. A., Ghafoor, K. Z., & Lloret, J. (2016). Seamless outdoors-indoors localization solutions on smartphones: Implementation and challenges. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 48(4), 1-34.
- [18] Wing, M. G., Eklund, A., & Kellogg, L. D. (2005). Consumer-grade global positioning system (GPS) accuracy and reliability. *Journal of forestry*, 103(4), 169-173.
- [19] Barnes, J., Rizos, C., Wang, J., Small, D., Voigt, G., & Gambale, N. (2003, July). Locata: the positioning technology of the future. In *Proceedings of the 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services, Melbourne, Australia July*.
- [20] Lee, J. E., & Lee, S. (2010, November). Indoor initial positioning using single clock pseudolite system. In *2010 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)* (pp. 575-578). IEEE.
- [21] Kohtake, N., Morimoto, S., Kogure, S., & Manandhar, D. (2011, September). Indoor and outdoor seamless positioning using indoor messaging system and GPS. In *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2011), Guimarães, Portugal* (pp. 21-23).
- [22] Deng, Z., Yu, Y., Yuan, X., Wan, N., & Yang, L. (2013). Situation and development tendency of indoor positioning. *China Communications*, 10(3), 42-55.
- [23] Farid, Z., Nordin, R., & Ismail, M. (2013). Recent advances in wireless indoor localization techniques and system. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2013.
- [24] Raja, K., Buchanan, W. J., & Munoz, J. (2004). We know where you are [cellular location tracking]. *Communications Engineer*, 2(3), 34-39.
- [25] Otsason, V., Varshavsky, A., LaMarca, A., & De Lara, E. (2005, September). Accurate GSM indoor localization. In *International conference on ubiquitous computing* (pp. 141-158). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [26] Liu, L., & Zhang, S. (2020, October). An Indoor Geolocation Algorithm based on CSI and Affine Propagation Clustering. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1650, No. 2, p. 022096). IOP Publishing.
- [27] C. L.-L. M. S. Committee. "802.11n-2009 - IEEE Standard for Information technology." (Accessed : https://standards.ieee.org/standard/802_11n-2009.html).
- [28] Subhan, F., Hasbullah, H., Rozyyev, A., & Bakhsh, S. T. (2011, April). Indoor positioning in bluetooth networks using fingerprinting and lateration approach. In *2011 International Conference on Information Science and Applications* (pp. 1-9). IEEE.
- [29] Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568-2599.
- [30] M. Chiesa, R. Genz, F. Heubler, K. Mingo, and C. Noessel. "RFID." (accessed: <http://people.interactionivrea.it/c.noessel/RFID/research.html>)
- [31] Mariakakis, A. T., Sen, S., Lee, J., & Kim, K. H. (2014, June). Sail: Single access point-based indoor localization. In *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile systems, applications, and services* (pp. 315-328).

- [32] Koenig, S., Schmidt, M. T., & Hoene, C. (2011, June). Multipath mitigation for indoor localization based on IEEE 802.11 time-of-flight measurements. In *2011 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks* (pp. 1-8). IEEE.
- [33] Woodman, O., & Harle, R. (2008, September). Pedestrian localisation for indoor environments. In *Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing* (pp. 114-123).
- [34] Roxin, A., Gaber, J., Wack, M., & Nait-Sidi-Moh, A. (2007, November). Survey of wireless geolocation techniques. In *2007 IEEE Globecom Workshops* (pp. 1-9). IEEE.
- [35] Mok, E. (2010, October). Using outdoor public WiFi and GPS integrated method for position updating of knowledge-based logistics system in dense high rise urban environments. In *2010 8th International Conference on Supply Chain Management and Information* (pp. 1-4). IEEE.
- [36] Park, D., & Park, J. G. (2011, May). An enhanced ranging scheme using WiFi RSSI measurements for ubiquitous location. In *2011 First ACIS/JNU International Conference on Computers, Networks, Systems and Industrial Engineering* (pp. 296-301). IEEE.
- [37] Ahmad, A., Claudio, P., Alizadeh Naeini, A., & Sohn, G. (2020). WI-FI RSS FINGERPRINTING FOR INDOOR LOCALIZATION USING AUGMENTED REALITY. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 5(4).
- [38] Lymberopoulos, D., Liu, J., Yang, X., Choudhury, R. R., Handziski, V., & Sen, S. (2015, April). A realistic evaluation and comparison of indoor location technologies: Experiences and lessons learned. In *Proceedings of the 14th international conference on information processing in sensor networks* (pp. 178-189).
- [39] Pahlavan, K., Li, X., & Makela, J. P. (2002). Indoor geolocation science and technology. *IEEE communications magazine*, 40(2), 112-118.
- [40] Honore, A. A., Thomas, R. W., Martin, R. K., & Kurkowski, S. H. (2009, October). Implementation of collaborative RF localization using a software-defined radio network. In *MILCOM 2009-2009 IEEE Military Communications Conference* (pp. 1-7). IEEE.
- [41] Drane, C., Macnaughtan, M., & Scott, C. (1998). Positioning GSM telephones. *IEEE Communications magazine*, 36(4), 46-54.
- [42] Kim, J. I., Lee, J. G., & Park, C. G. (2008, October). A mitigation of line-of-sight by TDOA error modeling in wireless communication system. In *2008 International Conference on Control, Automation and Systems* (pp. 1601-1605). IEEE.
- [43] Yu, B. G., Lee, G., Han, H. G., Ra, W. S., & Kim, T. W. (2016). A time-based angle-of-arrival sensor using CMOS IR-UWB transceivers. *IEEE Sensors Journal*, 16(14), 5563-5571.
- [44] "TOA mode!". (accessed. <http://www.ciscosky.org/network/wireless/ShenWangLaoZhongDeMoXianDin>).
- [45] Gallagher, T., Wise, E., Li, B., Dempster, A. G., Rizos, C., & Ramsey-Stewart, E. (2012, November). Indoor positioning system based on sensor fusion for the blind and visually impaired. In *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* (pp. 1-9). IEEE.
- [46] Kaemarungsi, K., & Krishnamurthy, P. (2004, August). Properties of indoor received signal strength for WLAN location fingerprinting. In *The First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004.* (pp. 14-23). IEEE.

- [47] Honkavirta, V., Perala, T., Ali-Loytty, S., & Piché, R. (2009, March). A comparative survey of WLAN location fingerprinting methods. In *2009 6th workshop on positioning, navigation and communication* (pp. 243-251). IEEE.
- [48] Youssef, M., & Agrawala, A. (2005, June). The Horus WLAN location determination system. In *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services* (pp. 205-218).
- [49] Nayan, N. P. M. Y., Hassan, M. F., & Subhan, F. (2014, June). Filters for device-free indoor localization system based on RSSI measurement. In *2014 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS)* (pp. 1-5). IEEE.
- [50] Lawitzki, P., & Charzinski, J. (2012). Application of dynamic binaural signals in acoustic games. *Stuttgart Media University*.
- [51] Li, B., Wang, Y., Lee, H. K., Dempster, A., & Rizos, C. (2005). Method for yielding a database of location fingerprints in WLAN. *IEE proceedings-communications*, 152(5), 580-586.
- [52] Jin, Y., Motani, M., Soh, W. S., & Zhang, J. (2010, March). SparseTrack: Enhancing indoor pedestrian tracking with sparse infrastructure support. In *2010 Proceedings IEEE INFOCOM* (pp. 1-9). IEEE.
- [53] Yun, X., Bachmann, E. R., & McGhee, R. B. (2008). A simplified quaternion-based algorithm for orientation estimation from earth gravity and magnetic field measurements. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 57(3), 638-650.
- [54] Fang, L., Antsaklis, P. J., Montestruque, L. A., McMickell, M. B., Lemmon, M., Sun, Y., ... & Xie, X. (2005). Design of a wireless assisted pedestrian dead reckoning system-the NavMote experience. *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement*, 54(6), 2342-2358.
- [55] YU, Z. (2012). Dead reckoning algorithms for indoor localization.
- [56] Rosenfeld, B. A. (2012). *A history of non-Euclidean geometry: Evolution of the concept of a geometric space* (Vol. 12). Springer Science & Business Media.

I. ANNEXE A -*Quaternions et rotation dans l'espace.*

1.1. Quaternion.

Les **quaternions**, notés \mathbb{H} , sont un type de nombres hypercomplexes, constituant une extension des nombres complexes, extension similaire à celle qui avait conduit des nombres réels aux nombres complexes. Les quaternions furent introduits par le mathématicien irlandais William Rowan Hamilton en 1843 [56]. Ils trouvent aujourd'hui des applications en mathématiques, en physique, en informatique et en sciences de l'ingénieur.

Mathématiquement, l'ensemble des quaternions \mathbb{H} est une algèbre associative unifiée sur le corps des nombres réels \mathbb{R} engendrée par trois éléments $i, j, et k$ satisfaisant les relations quaternioniques :

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \dots \dots \dots (1)$$

C'est une algèbre à division : tout quaternion non nul admet un inverse. La multiplication des quaternions n'étant pas commutative, \mathbb{H} est un corps non commutatif.

Dans cette section, on va montrer que chaque quaternion engendre un opérateur de rotation. L'importance de la structure algébrique des quaternions est que les rotations se comportent bien dans ces opérations.

1.1.1. Définition et notations

Tout quaternion q s'écrit de manière unique sous la forme :

$$q = a_4 + a_1 i + a_2 j + a_3 k \dots \dots \dots (2)$$

où $a_4, a_1, a_2, et a_3$ sont des nombres réels et $i, j et k$ sont trois symboles.

Le premier terme a s'appelle la partie réelle de q et $a_1 i + a_2 j + a_3 k$ la partie imaginaire de q .

Par convention, la forme de q décrit en équation (2) : sera appelée la forme de Hamilton.

Donc on peut définir les quaternions comme un espace vectoriel 4-dimensionnel avec une opération de multiplication vectorielle qui forme une algèbre associative non commutative.

1.2. Algèbre de Quaternion.

Soit les deux nombres Quaternions q_1 , et q_2 , et T un scalaire avec :

$$q_1 = a_{14} + a_{11}i + a_{12}j + a_{13}k,$$

$$q_2 = a_{24} + a_{21}i + a_{22}j + a_{23}k, \text{ et}$$

$$\begin{aligned} i^2 &= -1, & ij &= k, & ji &= -k \\ j^2 &= -1, & jk &= i, & kj &= -i \dots \dots \dots (3) \\ k^2 &= -1, & ki &= j, & ik &= -j \end{aligned}$$

- On peut écrire q , sous la forme : $q_1 = \Re(q_1) + \Im(q_1)$.
D'où : $\Re(q_1) = a_{14}$, et $\Im(q_1) = a_{11}i + a_{12}j + a_{13}k$ sont la **partie réelle**, et la **partie imaginaire** de q respectivement.
Le conjugué (**quaternionique**) de q_1 est $\bar{q}_1 = \Re(q_1) - \Im(q_1)$.
- La conjugaison Quaternionique $q \mapsto \bar{q}$ est un antiautomorphisme involutif de \mathbb{H} : elle est \mathbb{R} -linéaire, involutive, et renverse les produits : on a toujours $\overline{q_1 q_2} = \bar{q}_2 \bar{q}_1$.
- La norme d'un Quaternion : $|q_1| = \sqrt{q_1 \cdot \bar{q}_1} = \sqrt{a_{14}^2 + a_{13}^2 + a_{12}^2 + a_{11}^2}$, est un réel pure.
- La multiplication de Quaternion n'est pas commutative. Cependant, les opérations d'addition et de multiplication de quaternion forment ensemble une algèbre associative.

$$\begin{aligned} q_1 q_2 &= (a_{14}a_{24} - a_{11}a_{21} - a_{12}a_{22} - a_{13}a_{23}) \\ &+ (a_{11}a_{24} + a_{14}a_{21} + a_{12}a_{23} + a_{13}a_{22})i \\ &+ (a_{12}a_{24} - a_{14}a_{22} - a_{13}a_{21} - a_{11}a_{23})j \\ &+ (a_{13}a_{24} - a_{14}a_{23} - a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})k \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

$$q_1 + Tq_2 = (a_{14} + Ta_{24}) + (a_{11} + Ta_{21})i + (a_{12} + Ta_{22})j + (a_{13} + Ta_{23})k \dots (5)$$

- $|q_1| = 1 \Rightarrow q_1 \cdot \bar{q}_1 = \bar{q}_1 \cdot q_1 = 1 \Rightarrow q_1$ est un quaternion unitaire.
- Les quaternions q_1 et q_2 sont dits opposés si leur somme est nulle :
 $q_1 + q_2 = 0 + 0i + 0j + 0k$.

- **La notation (a_1, V)**

Le quaternion $q_1 = a_{14} \cdot 1 + a_{11} \cdot i + a_{12} \cdot j + a_{13} \cdot k$ peut-être décomposé (et de façon unique) en un couple formé du réel a_{14} et du vecteur \vec{V}_1 de \mathbb{R}^3 dont les coordonnées sont (a_{11}, a_{12}, a_{13}) .

On écrit : $q_1 = (a_{14}, \vec{V}_1)$

Cette notation permet de définir la somme et le produit de la façon suivante :

$$q_1 + q_2 = (a_{14}, \vec{V}_1) + (a_{24}, \vec{V}_2) = (a_{14} + a_{24}, \vec{V}_1 + \vec{V}_2) \dots \dots \dots (6)$$

$$q_1 \cdot q_2 = (a_{14}a_{24} - \vec{V}_1 \cdot \vec{V}_2, a_{14}\vec{V}_2 + a_{24}\vec{V}_1 + \vec{V}_1 \wedge \vec{V}_2) \dots \dots \dots (7)$$

Soit à présent un quaternion $q_1 = (a_{14}, \vec{V}_1)$ quelconque ; notons $Q = \|q_1\|$ et $v = \|\vec{V}_1\|$. Si le réel v positif n'est pas nul, le réel q_1 ne l'est pas non plus et l'on peut donc toujours écrire : $q_1 = Q \left(\frac{a_{14}}{Q}, \frac{1}{Q} \vec{V}_1 \right) = Q \left(\frac{a_{14}}{Q}, \frac{v}{Q} \cdot \frac{1}{v} \cdot \vec{V}_1 \right)$

Or $\frac{1}{v} \cdot \vec{V}_1$ est un vecteur normé et l'on peut écrire : $Q^2 = a_{14}^2 + v^2$, ou encore :

$$\left(\frac{a_{14}}{Q} \right)^2 + \left(\frac{v}{Q} \right)^2 = 1.$$

Il en résulte qu'il existe :

un angle φ (dont le cosinus et le sinus valent respectivement $\frac{a_{14}}{Q}$ et $\frac{v}{Q}$ et un vecteur normé $\vec{U} = \frac{1}{v} \cdot \vec{V}_1$.

qui sont tels que l'on puisse écrire le quaternion q_1 (de vecteur \vec{V}_1 non nul) sous la forme : $q_1 = Q(\cos\varphi, \sin\varphi \cdot \vec{U}) = (Q \cdot \cos\varphi, Q \cdot \sin\varphi \cdot \vec{U})$.

Cette façon d'écrire un quaternion est importante : les termes du couple, $Q \cdot \cos\varphi$ et $Q \cdot \sin\varphi$, sont en effet respectivement le produit scalaire et le produit vectoriel de deux vecteurs \vec{V}_{11} et \vec{V}_{12} orthogonaux à \vec{V}_1 , ces 2 vecteurs faisant entre eux un angle égal à φ . Et cette écriture permet de construire la multiplication des quaternions grâce à la composition des similitudes de \mathbb{R}^3 .

1.3. Correspondance entre quaternion unitaire et rotation vectorielle

On peut démontrer que le transformé $\vec{V}'_1 = \mathcal{R}_{[2\varphi, \vec{N}]}(\vec{V}_1)$ de tout vecteur \vec{V}_1 quelconque (de l'espace euclidien de dimension 3) dans la rotation $\mathcal{R}_{[2\varphi, \vec{N}]}$ d'angle 2φ et

d'axe \vec{N} (\vec{N} étant un vecteur normé) peut être calculé grâce au produit de quaternions suivants :

$$(0, \vec{V}_1') = (0, \mathcal{R}_{[2\varphi, \vec{N}]}(\vec{V}_1)) = (\cos\varphi, \sin\varphi \vec{N}) \cdot (0, \vec{V}_1) \cdot (\cos\varphi, -\sin\varphi \vec{N})$$

où $(\cos\varphi, \sin\varphi \vec{N})$ et $(\cos\varphi, -\sin\varphi \vec{N})$ sont deux quaternions unitaires conjugués et où $(0, \vec{V}_1)$ et $(0, \vec{V}_1')$ sont des quaternions dont la composante scalaire est nulle.

On peut aussi écrire cette transformé avec la notation $q_1 = a_{14} + a_{11}i + a_{12}j + a_{13}k$. Si la rotation est autour d'un axe orienté selon le vecteur \vec{V}_1 de coordonnées (x, y, z) (le vecteur étant normé) et d'angle φ , le quaternion associé vaut :

$$q_1 = \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot 1 + x\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot i + y\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot j + z\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot k$$

1.4. Composition de rotations vectorielles et produit de quaternions

La propriété précédente justifie le fait que l'on a coutume de dire, mais de façon peu rigoureuse, que le quaternion $(\cos\varphi, \sin\varphi \vec{N})$ représente la rotation $\mathcal{R}_{[2\varphi, \vec{N}]}$.

En utilisant le même langage approximatif, on peut dire que la composition de deux rotations successives \mathcal{R}_{11} puis \mathcal{R}_{12} est une rotation \mathcal{R} qui est représentée par le quaternion $q_1 = q_{11} \cdot q_{12}$, les quaternions q_{11} et q_{12} étant les *représentants* respectifs des rotations \mathcal{R}_{11} et \mathcal{R}_{12} .

1.5. Notations matricielles

De même qu'il est possible de mettre en correspondance le nombre complexe

$z = a + ib$ avec la matrice : $\begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix}$, il est possible de faire correspondre le

quaternion $q_1 = a_{14} + a_{11}i + a_{12}j + a_{13}k$ avec la matrice complexe suivante :

$$\begin{bmatrix} a_{14} + ia_{13} & -a_{11} + ia_{12} \\ a_{11} + ia_{12} & a_{14} + ia_{13} \end{bmatrix}$$

Ou encore avec la matrice réelle suivante :

$$\begin{bmatrix} a_{14} & -a_{11} & -a_{12} & -a_{13} \\ a_{11} & a_{14} & -a_{13} & a_{12} \\ a_{12} & a_{13} & a_{14} & -a_{11} \\ a_{13} & -a_{12} & a_{11} & a_{14} \end{bmatrix}$$

Si le quaternion unitaire représente une rotation depuis l'origine, on peut le représenter à l'aide d'une matrice (3x3).

$$\begin{bmatrix} 1 - 2a_{12}^2 - 2a_{13}^2 & 2a_{11}a_{12} - 2a_{13}a_{14} & 2a_{11}a_{13} - 2a_{12}a_{14} \\ 2a_{11}a_{12} - 2a_{13}a_{14} & 1 - 2a_{11}^2 - 2a_{13}^2 & 2a_{12}a_{13} - 2a_{11}a_{14} \\ 2a_{11}a_{13} - 2a_{12}a_{14} & 2a_{12}a_{13} - 2a_{11}a_{14} & 1 - 2a_{11}^2 - 2a_{12}^2 \end{bmatrix}$$

Avec ces équivalences, la somme et le produit de deux quaternions correspondent respectivement à la somme et au produit des matrices qui leur correspondent.

NB : La matrice complexe $\begin{bmatrix} a_{14} + ia_{13} & -a_{11} + ia_{12} \\ a_{11} + ia_{12} & a_{14} + ia_{13} \end{bmatrix}$ peut encore s'écrire sous la forme : $a_{14} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + a_{11} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + a_{12} \begin{bmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{bmatrix} + a_{13} \begin{bmatrix} -i & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$

où les 4 matrices : $E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{bmatrix},$ et $K = \begin{bmatrix} -i & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$ sont les matrices complexes qui correspondent aux quatre quaternions-unités 1, i, j et k évoquées dans la première définition des quaternions.

1.6. Applications

Aujourd'hui, les quaternions trouvent leur place en infographie, en théorie de la commande, dans le traitement du signal, dans la commande de mouvement et la mécanique orbitale, principalement pour représenter les rotations et les orientations en dimension trois. On les trouve aussi dans la géolocalisation comme dans notre cas l'estimation de l'orientation de la cible. La raison est qu'effectuer beaucoup d'opérations sur les quaternions est numériquement plus stable que d'effectuer beaucoup d'opérations sur les matrices.

1.7. Interpolation de rotations

Si l'on prend 2 rotations de l'espace \mathcal{R}_a et \mathcal{R}_a , l'interpolation linéaire de ces rotations n'est en général pas une rotation. Pour pouvoir interpoler, il faut soit

- Utiliser les angles d'Euler,
- Utiliser les quaternions.

Dans le dernier cas, les 2 rotations sont représentées par 2 quaternions q_a et q_b sur la sphère unité S_4 , et l'interpolation correspond à la géodésique entre ces 2 points.

ملخص:

أصبح استخدام GPS في تحديد الموقع الجغرافي ميزة ضرورية في حياتنا اليومية. ومع ذلك ، تتيح هذه الميزة تحديد موقع الأشخاص في البيئات الخارجية ، ولكنها تعاني من نقص الدقة في البيئات الداخلية. نظرًا لقيود حل GPS ، يمكن حل هذه المشكلة باستخدام أجهزة استشعار مدمجة في الهواتف الذكية (والأجهزة اللوحية). الهدف من التدريب هو استخدام المستشعرات المضمنة في الهاتف الذكي (التسارع ، والتوجيه ، وما إلى ذلك) إلى جانب الأساليب المخصصة (مرشح كالمان الممتد (EKF) ، ومرشح الجسيمات ، وما إلى ذلك) من أجل تقدير موضع الشخص أثناء الأحداث أو المؤتمرات أو المواقع السياحية.

الكلمات المفتاح: مستشعرات تحديد الموقع الجغرافي ، الهاتف الذكي ، وحدة القياس بالقصور الذاتي (IMU)

Abstract :

The use of GPS in geolocation has become a necessary feature in our daily lives. However, this feature allows the location of people in outdoor environments, but suffers from the lack of precision in indoor environments. Given the limitations of the GPS solution, this problem can be solved by using sensors integrated into Smartphones (and tablets).

The objective of the internship is to use the sensors embedded in the smartphone (acceleration, orientation, etc.) coupled with dedicated methods (extended Kalman filter (EKF), particle filter, etc.) in order to estimate the position of a person during events, conferences or tourist sites.

Keywords: Geolocation, Smartphone, Inertial Measurement Unit (IMU) sensors.

Résumé :

L'utilisation du GPS dans la géolocalisation est devenue une fonctionnalité nécessaire dans nos quotidiens. Cependant, cette fonctionnalité permet la localisation des personnes dans les environnements extérieurs (Outdoor), mais souffre du manque de précision dans les environnements intérieurs (indoor). Vu les limites de la solution GPS, ce problème peut être résolu en utilisant des capteurs intégrés aux Smartphones (et tablettes). L'objectif du stage est d'utiliser les capteurs embarqués dans le smartphone (accélération, orientation, etc.) couplés à des méthodes dédiées (filtre de Kalman étendu (EKF), filtre à particules, etc.) afin d'estimer la position d'une personne durant des événements, colloques ou sites touristiques.

Mots clés : Géolocalisation, Smartphone, Capteurs d'unités de mesure inertielle (UMI).