

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la recherche Scientifique

Université Abderrahman MIRA - Bejaia

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie électrique**

## *Projet de fin d'étude*

**En vue de l'obtention du diplôme de Master Recherche**

**Filière : Electronique**

**Option : Télécommunication**

### *Thème :*

*Localisation d'un terminal mobile à l'état dynamique basé sur le filtre de Kalman*

**Présenté par :**

M<sup>elle</sup> ZENADJI Sylia

**Encadré par :**

M<sup>elle</sup> N. BOUZERA

P<sup>r</sup> A.KHIRELINE

Promotion  
2013/2014

# Remerciements

*Je remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force, la volonté et le courage à mettre en lumière ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement mes très chers parents ainsi que ma sœur et mon frère pour leur soutien et leurs encouragements.*

*Je tiens également à remercier et à témoigner toutes ma reconnaissance à **Mme N.MEZHOUD**, pour son aide et ses précieux conseils qui m'ont été d'un grand apport. De même je remercie **M<sup>elle</sup> N.BOUZERA**, **M<sup>r</sup> A.KHIREDDINE** pour avoir accepté de m'encadrer, et leur participation au cheminement de ce travail.*

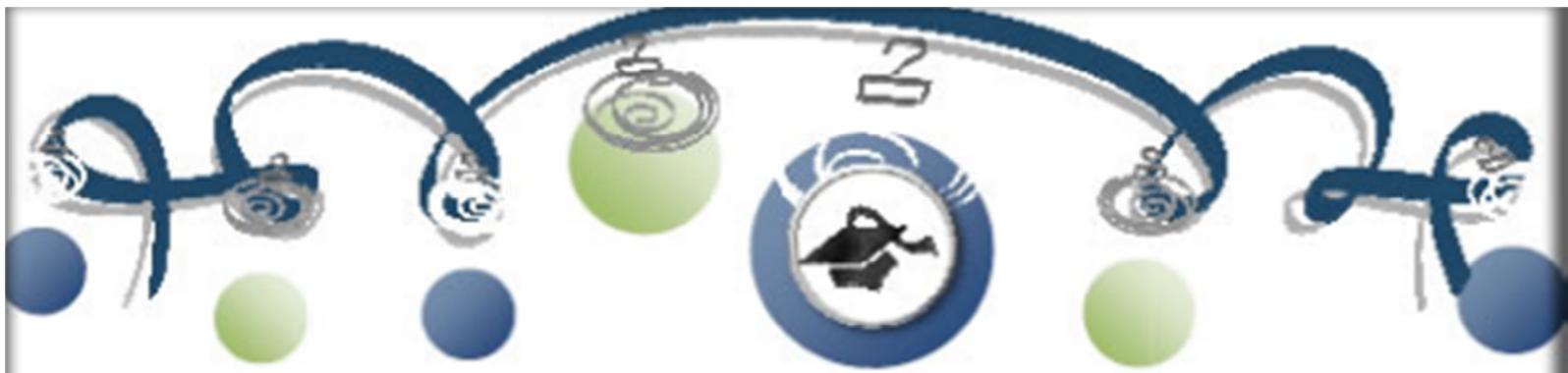
*Je tiens à remercier et à exprimer ma gratitude à **Mme L. HADDAR**, **M<sup>r</sup> M. TOUNSI** ainsi que l'ensemble du personnel de **MOBILIS** pour leurs contributions à la réalisation de ce mémoire et leurs hospitalités :*

- *Madame **K.BELLAL**.*
- *Monsieur **A. REDJAL**.*
- *Monsieur **H.BEKHOUCHE**.*
- *Monsieur **D.OUADI**.*
- *Monsieur **Y.BOURASSE***
- *Monsieur **A.MADI***

*Mes remerciements s'adressent aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font d'assister à ma soutenance et de corriger et évaluer mon travail.*

*Je remercie tous mes amis : Faty, Nassim, Meriem, Farouk, Md Tahar, Rahima, Abdelghafour, Ania, massi, pour leur encouragement et leur amitié.*

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*



## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents en témoignage de leur amour, en qui je porte un grand respect et une profonde et éternelle gratitude. Ainsi, j'exprime ma reconnaissance pour leur soutien, leurs sacrifices et leurs encouragements tout au long de mes études, et que ce travail soit pour eux un faible témoignage de ma profonde affection et tendresse.*

*Sans oublier ma sœur Siham.*

*Mon frère Hamza.*

*A ma meilleure amie Fatima Zohra.*

*Et à tous mes proches tels mes tantes, mes oncles, mes cousins et mes cousines en particulier : Dihia, Djida et Billal, Soufiane.*

*A tous mes ami(e)s: Meriem, Hanane, Nassim, Md Tahar, Farouk, Rahima, Ania, Abdelghafour, Fatma, Farid, Jugurtha, Hichem, Mouna, Narima, Samira, Samra, Wassiba, salima, massi.*

*Toute la promotion télécommunication 2011/2014.*

*A toutes personnes qui m'ont encouragé et aidé tout au long de mes études.*

*Sylia*



# Table de matière

Table de matière.....	I
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VII
Liste des sigles.....	VIII
<b>Introduction générale.....</b>	<b>X</b>

## Chapitre I : Techniques de géolocalisation des terminaux mobiles

I.1 Introduction.....	1
I.2 Objectif de la géolocalisation.....	1
I.3 Les moyens de localisation actuels à grande échelle .....	1
I.3.1 Les systèmes satellitaires .....	1
I.3.1.1 le système de navigation GPS .....	2
I.3.1.1.1 Composition du GPS.....	3
I.3.1.1.2 Fonctionnement du système GPS .....	4
I.3.1.1.3 Limites du GPS .....	4
I.3.1.2 Les améliorations de la précision du système GPS .....	4
I.3.1.2.1 Le système D-GPS (Differential-GPS).....	5
I.3.1.2.2 Le système A-GPS (Assisted-GPS).....	5
I.3.2 Système de localisation par réseau GSM .....	6
I.3.2.1 Réseaux GSM.....	6
I.3.2.2 Architecture du réseau GSM.....	7
I.3.2.2.1 La station mobile MS .....	7
I.3.2.2.2 Les constituants du réseau d'accès GSM (BSS) .....	8
I.3.2.2.3 Les constituants du réseau cœur GSM (NSS).....	9
I.3.2.2.4 Présentation de l'OMC.....	10
I.3.2.3 Les interfaces du réseau GSM .....	11
I.3.2.4 Les bandes de fréquence allouées .....	12
I.3.2.5 Les caractéristiques de l'interface air.....	13

I.3.2.5.1 Partage des sources radio .....	13
I.3.2.5.2 Principe de réutilisation des ressources.....	14
I.3.2.5.3 Les canaux logiques .....	15
I.3.2.6 Les équipements du service de localisation .....	16
I.3.2.6.1 Unité de mesure de localisation (LMU).....	17
I.3.2.6.2 Centre de localisation de mobile (MLC).....	17
I.3.2.7 Techniques de localisation dans le réseau cellulaire GSM.....	18
I.3.2.7.1 La méthode Cell-ID.....	18
I.3.2.7.2 La puissance du signal.....	19
I.3.2.7.3 Angle d'arrivé (AOA) .....	20
I.3.2.7.3 Le temps d'arrivé TOA .....	21
I.3.2.7.4 La différence de temps d'arrivé (TDOA).....	22
I.3.3 Poursuite du mobile GSM basé sur le filtre de Kalman.....	23
I.4 Conclusion .....	24

## **Chapitre II : Modèles de propagation et l'étude du filtre de Kalman**

II.1 Introduction .....	25
II.2 Généralités sur la propagation .....	25
II.2.1 Propagation radio-mobile.....	25
II.2.2 Phénomènes de base de la propagation.....	25
II.2.2.1 Réflexion et la transmission .....	26
II.2.2.2 Diffraction .....	26
II.2.2.3 Diffusion.....	26
II.2.3 Différents phénomènes créant les pertes.....	27
II.2.3.1 Les pertes dues à la distance parcourue .....	27
II.2.3.2 Les effets de masque .....	27
II.2.3.3 Les évanouissements .....	27
II.2.3.4 Les brouillages dus aux interférences .....	28
II.2.3.5 Les brouillages dus au bruit.....	28
II.2.3.5.1 Bruit externe .....	28
II.2.3.5.2 Bruit interne .....	28
II.3 Modèles de prédiction de propagation.....	28

II. 3.1 Méthodes statistiques .....	29
II.3.2 Modèle de propagation sur terre plate .....	29
II.3.3 Formule empirique d'Okumura-Hata .....	29
II.3.4 Formule empirique de Coste 231-Hata .....	29
II.3.5 Formule empirique de Walfish-Ikegami .....	31
II.4 Etude du filtre de Kalman .....	33
II.4.1 Estimateur .....	33
II.4.2 Filtre de Kalman .....	34
II.4.2.1 Mise en œuvre du filtre de Kalman .....	34
II.4.2.2 Modélisation du filtre de Kalman .....	35
II.4.2.3 Déroulement du filtrage de Kalman .....	36
II.4.2.3.1 Etape de Prédiction .....	36
II.4.2.3.2 Etape de mise à jour .....	37
II.4.2.3.3 Etape d'initialisation .....	38
II.4.4.5 Filtre de Kalman Etendu EKF .....	39
II.4.4.5.1 Fonctionnement .....	39
II.4.4.6 Filtre de Kalman inodore UKF .....	40
II.5 Conclusion .....	<b>42</b>

### **Chapitre III : Application du filtre de Kalman**

III.1 Introduction .....	43
III.2 Méthodologie .....	43
III.3 Partie expérience .....	45
III.3.1 Expérience .....	45
III.3.1.1 Drive test .....	46
III.3.1.2. Dispositifs de mesure .....	46
III.3.1.2.1 Présentation du Logiciel TEMS Investigation .....	46
III.3.1.2.2 TEMS Information .....	46
III.3.1.3 Paramètres utilisés dans la simulation .....	47
III.4 Calcul des distances MS-BTS .....	49
III.4.1 Calcul des distances réelles .....	50
III.4.2 Calcul des distances (mesurées) d'après les modèles .....	50

---

III.5 Techniques de localisations utilisées.....	52
III.5.1 Filtre de Kalman étendu (EKF) .....	52
II.5.1.1 Implémentation.....	53
III.5.2 Filtre de Kalman inodore (UKF) .....	54
III.5.2.1 Implémentation .....	54
III.6. Localisation dynamique .....	55
III.6.1 Résultats de la simulation .....	55
III.6.2 Choix du modèle de propagation.....	55
III.6.3 Simulation préliminaires.....	56
III.6.4 Localisation dynamique en utilisant les mesures réelles .....	63
III.6.4.1 Commentaires .....	66
III.7 Conclusion .....	66
Conclusion générale.....	67
Référence bibliographique.....	69
Webographies.....	71

# *Liste des figures*

<b>Figure I.1</b> : Repérage d'une position par satellite. ....	2
<b>Figure I.2</b> : Les segments du système GPS. ....	3
<b>Figure I.3</b> : Le système D-GPS. ....	5
<b>Figure I.4</b> : Architecture du réseau GSM. ....	7
<b>Figure I.5</b> : Illustration des interfaces dans le réseau GSM. ....	10
<b>Figure I.6</b> : Liaison entre mobile et la BTS. ....	11
<b>Figure I.7</b> : Partage des ressources radio en fréquence. ....	13
<b>Figure I.8</b> : Partage des ressources radio en temps. ....	13
<b>Figure I.9</b> : Un motif élémentaire (à gauche) et un ensemble de motifs dans un réseau (à droite). ....	14
<b>Figure I.10</b> : Classes de LMU. ....	16
<b>Figure I.11</b> : La méthode de géolocalisation Cell-ID. ....	18
<b>Figure I.12</b> : La puissance du signal. ....	19
<b>Figure I.13</b> : Localisation exploitant la méthode AOA. ....	20
<b>Figure I.14</b> : Localisation exploitant La méthode TOA à trois stations de base. ....	21
<b>Figure I.15</b> : Localisation exploitant la méthode TDOA. ....	22
<b>Figure II.1</b> : Les phénomènes de base de la propagation. ....	26
<b>Figure III.1</b> : Schéma fonctionnelle de la méthodologie générale. ....	44
<b>Figure III.2</b> : Présentation de lieu de l'expérience par google earth. ....	45
<b>Figure III.3</b> : Expérience de drive test. ....	47

---

<b>Figure III.4:</b> Erreurs entre les distances réelles et celles des modèles.....	56
<b>Figure III.5 :</b> Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec différents filtre en sphérique.....	57
<b>Figure III.6:</b> Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec différents filtre en coordonnée cartésien.....	58
<b>Figure III.7:</b> Erreur de positionnement sans bruit obtenues avec différents filtres en sphérique et cartésien.....	58
<b>Figure III.8 :</b> Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec deux filtres en sphérique.....	59
<b>Figure III.9 :</b> Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec deux filtres en cartésien.....	59
<b>Figure III.10 :</b> L'erreur de positionnement sans bruit obtenues avec différents filtres en sphérique et cartésien.....	60
<b>Figure III.11 :</b> Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec deux filtres en coordonnée sphérique et cartésien.....	63
<b>Figure III.12 :</b> L'erreur des positions obtenues avec différents filtres.....	64
<b>Figure III.13 :</b> Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec deux filtres en coordonnée cartésien et sphérique.....	65
<b>Figure III.14 :</b> L'erreur des positions obtenues avec différents filtres.....	65

# *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1</b> : Classification des terminaux .....	8
<b>Tableau I.2</b> : les interfaces radio dans le réseau GSM.....	12
<b>Tableau I.3</b> : les canaux logiques.....	16
<b>Tableau III.2</b> :Paramètres de mobile à chaque position. ....	49
<b>Tableau III.3</b> :Distances réelle. ....	51
<b>Tableau III.4</b> :Distances calculées par les modèles de propagation. ....	52
<b>Tableau III.5</b> : Erreur moyenne (Km) entre les distances réelles et celles des modèles. ....	56
<b>Tableau III.6</b> : Erreur moyenne de la simulation 1.1 .....	58
<b>Tableau III.7</b> :Erreur moyenne de la simulation 1.2 .....	60
<b>Tableau III.8</b> :Erreur moyenne en coordonnée sphérique on variant P.....	61
<b>Tableau III.9</b> : Erreur moyenne en coordonnée sphérique on variant Q. ....	61
<b>Tableau III.10</b> :Erreur moyenne en coordonnée sphérique on variant R0. ....	61
<b>Tableau III.11</b> :Erreur moyenne en coordonnée cartésien on variant P. ....	62
<b>Tableau III.12</b> :Erreur moyenne en coordonnée cartésien on variant Q. ....	62
<b>Tableau III.13</b> :Erreur moyenne en coordonnée cartésien on variant R0.....	62
<b>Tableau III.14</b> :Erreur moyenne de positionnement.....	64
<b>Tableau III.15</b> : Erreur moyenne de positionnement.....	65

---

# *Liste des sigles*

- **A-GPS:** Assisted-Positioning System.
- **AGCH:** Access Grant Channel.
- **AOA:** Angle Of Arrival.
- **ARFCN:** Absolute Radio Frequency Channel Number.
- **AUC:** Authentication center.
- **BCCH:** Broadcast Control CHannel.
- **BSC:** Base Station Controller.
- **BSS:** Base Station Sub-System.
- **BTS:** Base Tranceiver Station.
- **Cell-ID:** Cellule Identification.
- **DCS:** Digital Communication System.
- **D-GPS:** Differential-GPS.
- **EIR:** Equipment Identity Register.
- **EKF:** Extended Kalman Filter.
- **FCH:** Frequency CHannel.
- **FCCH:** Frequency Correction CHannel.
- **FDMA:** Frequencydivision Multiple Access.
- **GMSC:** Gateway MSC.
- **GPS:** Global Positioning System.
- **GSM:** Global System Mobile.
- **HLR:** Home Location Register.
  
- **IER :** Equipement Identification Register.
- **IMSI:** International Mobile Station Identity.
- **IMEI:** International Mobile EquipementIdentity.
  
- **IT:** Intervalle de Temps.
- **LA:** Location Area.
- **LCS:** Location Center Serving.
- **LMU:** Location Measurement Unit.

- **LOS:** Line Of Sight.
- **MLC:** Mobile Location Centre.
- **MMS:** Multimedia Message Service.
- **MSC:** Base-services Switching Centre.
- **MS:** Mobile Station.
- **NAVSTAR:** Navigation Satellite Timing And Ranging.
- **NLOS:** None Line Of Sight.
- **NMC:** Network Mobile Code.
- **NSS:** Net work Sub-System.
- **OMC:** Operation and Maintenance Center.
- **PCH:** Paging CHannel.
- **PLMN:** Public Land Mobile Network.
- **QOS:** Quality Of Service.
- **RACH:** Random Access CHannel.
- **RMSE:** Root Mean Square Error.
- **RTC:** Réseau Téléphonique Commuté.
- **SACCH:** Slow Associated Control Chanel.
- **SCH:** Synchronization CHannel.
- **SDCCH:** Stand-Alone Dedicated Control CHannel.
- **SIM:** Subscriber Identity Module.
- **SMLC:** Serving Mobile Location Center.
- **SMS:** Short Message Service.
- **TCH:** traffic Channel.
- **TDOA:** time difference of arrival.
- **TDMA:** Time division Multiple Access.
- **TOA:** time of arrival.
- **UIT-R:** Union International des Telecommunications.
- **UHF:** Ultra High Frequency.
- **UKF:** Unscented Kalman Filter.
- **VHF:** Very High Frequency.
- **VLR:** visitor Location Register.
- **VMSC:** Visited Mobile Switching Centre.

# Introduction générale

## Introduction générale

Les réseaux téléphoniques sans fils sont souvent composés d'un nombre très important de terminaux mobiles. Ces terminaux sont des entités capables d'opérer en toute autonomie afin de collecter les informations relatives à leur environnement. Depuis quelques années les réseaux téléphoniques sans fils s'ouvrent à une multitude applications: militaire, sécurité civile (surveillance des risques d'incendies, des catastrophes naturelles, des centrales nucléaires), le domaine médical (télésurveillance des informations physiologiques, le suivi des médecins et des patients), toutefois, les opérateurs ont fait un de leur sujet prioritaire de recherche la localisation du mobile [1].

Plusieurs idées ont ainsi été proposées, comme l'utilisation d'un récepteur GPS (Global Positioning Satellite) donnant la position du mobile à partir du temps d'arrivée de signaux issus de plusieurs satellites.

La localisation dans les réseaux GSM nécessite la connaissance d'un certain nombre de nœuds références appelés BTS « Base Transceiver Station » ; et des informations échangées comme la puissance du signal reçu (RSS), l'angle d'incidence du signal (AOA pour Angle of arrival) et les mesures basées sur le temps tel que le temps d'arrivée du signal (TOA pour Time of Arrival) ou le temps différentiel d'arrivée (TDOA pour Time Difference of Arrival). Généralement les méthodes de localisation basées sur les mesures de TOA, TDOA ou AOA fournissent une bonne estimation de la position du mobile, mais l'application de ces méthodes exige une synchronisation entre le mobile et les BTS ; la solution à ce problème sera d'exploiter la mesure de la puissance reçus.

Le but de notre travail est de présenter et d'évaluer des algorithmes de localisation du mobile basés sur le Filtrage non linéaire de Kalman, le filtre de Kalman étendu et le filtre de Kalman inodore.

Notre présente étude est répartie en trois chapitres :

- Le premier chapitre portera sur les techniques de localisation des terminaux mobiles, certaines techniques ont été largement étudiées comme la localisation dans le réseau mobile GSM qui permet décrire les fonctionnalités de base de ce réseau.

- Le deuxième concerne les modèles de propagation permettant la prédiction de la distance entre le mobile et la station de base, et l'étude du filtre de Kalman qui est appliquée à la localisation de terminal mobile.
- Le dernier chapitre présente l'expérience effectuée à Bejaia ville, et l'interprétation des résultats de simulation ainsi qu'une analyse de performance du filtre de Kalman EKF (EKF pour Extended Kalman Filter) et UKF (UKF pour Unscented Kalman Filter).

Enfin nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

# Chapitre I

## **I.1 Introduction**

Récemment, la géolocalisation est devenu un des dispositifs les plus importants des systèmes de communication. Depuis, de nombreuses techniques ont été développées à des fins de localisation, soit des objets ou des personnes sur un plan ou une carte à l'aide des coordonnées géographiques. Cependant, ces positions sont obtenues à l'aide des systèmes satellitaires ou par navigation GPS ou encore par réseaux cellulaires.

Ce chapitre est consacré aux principes des systèmes de localisation : on va définir c'est quoi la géolocalisation ensuite on va passer à la description des techniques de localisation du mobile, leurs limites, avantages et inconvénients.

## **I.2 Objectif de la géolocalisation**

La géolocalisation est la capacité d'un système à déterminer la position géographique d'un équipement, qu'il soit mobile ou non. Les positions obtenues sont généralement exprimées sous forme de coordonnées géodésiques (latitude, longitude, altitude) [2]. Principalement utilisé pour la navigation, la géolocalisation a su profiter des évolutions technologiques en s'intégrant dans les systèmes de communication sans fil. Lorsqu'on a localisé un terminal, il est possible d'envoyer à son utilisateur des informations contextuelles, relatives par exemple aux commerces, aux services et aux lieux remarquables qui existent près de l'endroit où il se trouve. Les services de secours commencent également à tirer profit de la géolocalisation, notamment lors de la recherche de personnes en détresse.

## **I.3 Les moyens de localisation actuels à grande échelle**

Depuis quelques années, plusieurs systèmes de positionnement ont vu le jour. Dans cette section, nous allons détailler certains systèmes les plus efficaces.

### **I.3.1 Les systèmes satellitaires**

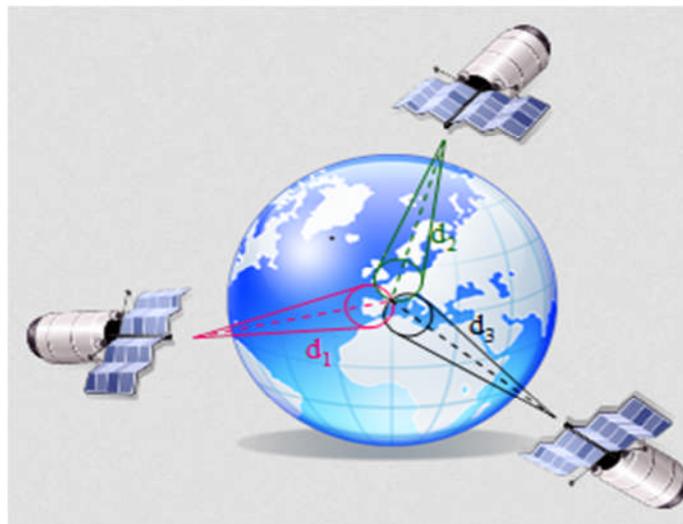
Elles consistent à calculer la position d'un terminal équipé d'une puce réceptrice à la surface de la Terre. Ce positionnement peut se faire grâce à l'échange de signaux venant de satellites. Cette position est ensuite traduite en une latitude et longitude qui représente les coordonnées universellement utilisées pour référencer un point géographique.

D'un point de vue technique, le satellite transmet un signal contenant sa position et l'instant exact d'émission. Le récepteur compare l'instant d'arrivée des signaux qu'il reçoit à l'instant du signal d'émission. Avec ces deux temps, il calcule la distance qui le sépare du satellite. Cet échange de données se fait avec tous les satellites visibles de la cellule réceptrice. La corrélation de ces informations donne une position en continu.

Ce principe se complique cependant si :

- L'horloge du récepteur a rarement la même précision que celle des satellites. Seules les différences de temps entre satellites sont donc précises. Ce problème est résolu s'il y a suffisamment d'émetteurs (4 émetteurs minimum, 3 si l'on connaît l'altitude du point à localiser).
- Les récepteurs sont en mouvement, les mesures sont donc faites sur des points différents.
- Les ondes ont des vitesses variables selon le milieu qu'elles traversent.

Le récepteur intègre donc ces diverses sources erreurs, en utilisant des mesures réalisées à partir de divers satellites, sur la base d'une échelle de temps universelle. Ces mesures sont alors traitées par des techniques d'intégration et de filtrage pour obtenir le positionnement de l'objet de la manière la plus précise, la figure I.1 si dessous nous présente le repérage d'une position par satellite [W1].



**Figure I.1** : Repérage d'une position par satellite.

### I.3.1.1 le système de navigation GPS

Dans les années 1960, les techniques spatiales ont progressé et l'utilisation de l'informatique a ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine de la navigation terrestre, aérienne et maritime. Deux systèmes expérimentaux donnent naissance en 1973 au système satellitaire de positionnement américain NAVSTAR/GPS (NAVigation System with Time And Ranging / Global Positioning System) qui permet de donner à n'importe quel endroit du globe, une position et une vitesse [2].

#### I.3.1.1.1 Composition du GPS

Dans le langage courant, on utilise le mot « GPS » pour désigner le récepteur. Or « GPS » désigne le système de positionnement, et ce système se compose de trois éléments: le segment spatial composé de satellites, le segment contrôle qui comprend des stations de contrôle et le segment utilisateur qui correspond aux récepteurs GPS [3].

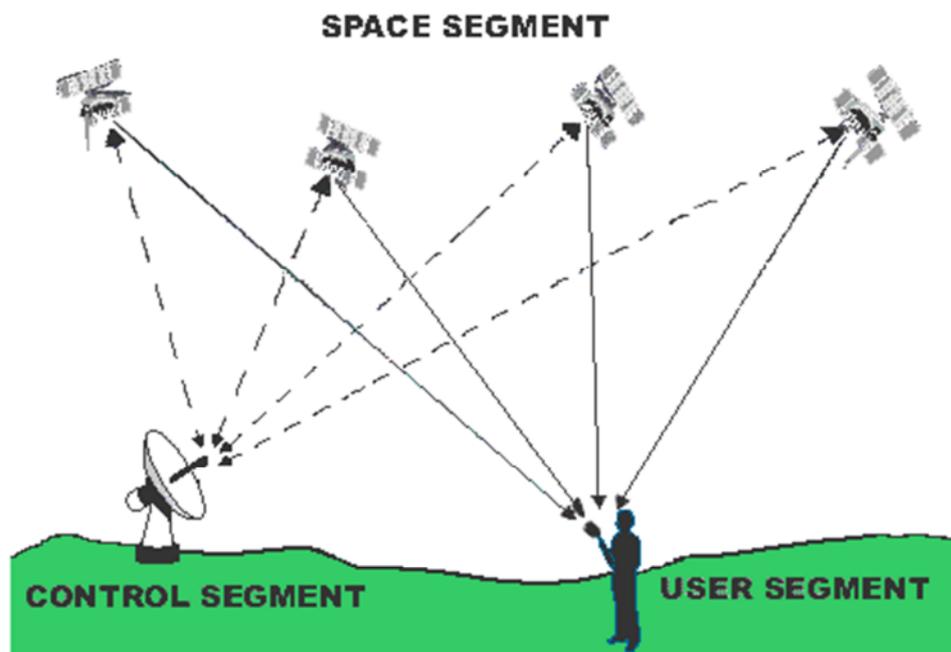


Figure I.2: Les segments du système GPS.

**❖ Segment spatial**

Ce segment se compose des satellites NAVSTAR (Navigation Satellite Timing And Ranging) : au moins 24 doivent être opérationnels pour qu'un GPS soit fonctionnel. Ces satellites se répartissent sur six orbites circulaires, décalés de 60° et à environ 20 000 km au dessus de la surface terrestre. Les satellites transmettent continuellement leurs données, qui sont reçues et traitées par les récepteurs GPS afin de déterminer la position de l'utilisateur (latitude, longitude, altitude), sa vitesse et l'heure.

**❖ Segment contrôle**

Ce segment se compose d'une station de contrôle principale située au Colorado Springs, de stations de poursuite et de trois antennes terriennes réparties autour de la terre. Leur rôle est d'enregistrer toutes les informations émises par les satellites, ainsi que des données météorologiques. C'est le segment qui permet de piloter et de surveiller le système (positionnement, dérive d'horloge etc...).

**❖ Segment utilisateur**

Ce segment comprend les utilisateurs ayant un boîtier GPS qui permet de calculer avec précision leur position, altitude, vitesse et heure.

**I.3.1.1.2 Fonctionnement du système GPS**

Le GPS fonctionne grâce au calcul de la distance qui sépare un récepteur GPS de plusieurs satellites. Les satellites émettent des ondes électromagnétiques qui se propagent à la vitesse de la lumière (qui est de  $3 \cdot 10^8$  m/s), en connaissant le temps que l'onde a mis pour parvenir du satellite au récepteur, dans ce cas on peut calculer la distance qui sépare le satellite du récepteur grâce à la formule suivante :  $d = c \cdot t$  ; où d : la distance, c : la vitesse de la lumière, t : temps mis par l'onde pour arriver du satellite au récepteur.

**I.3.1.1.3 Limites du GPS**

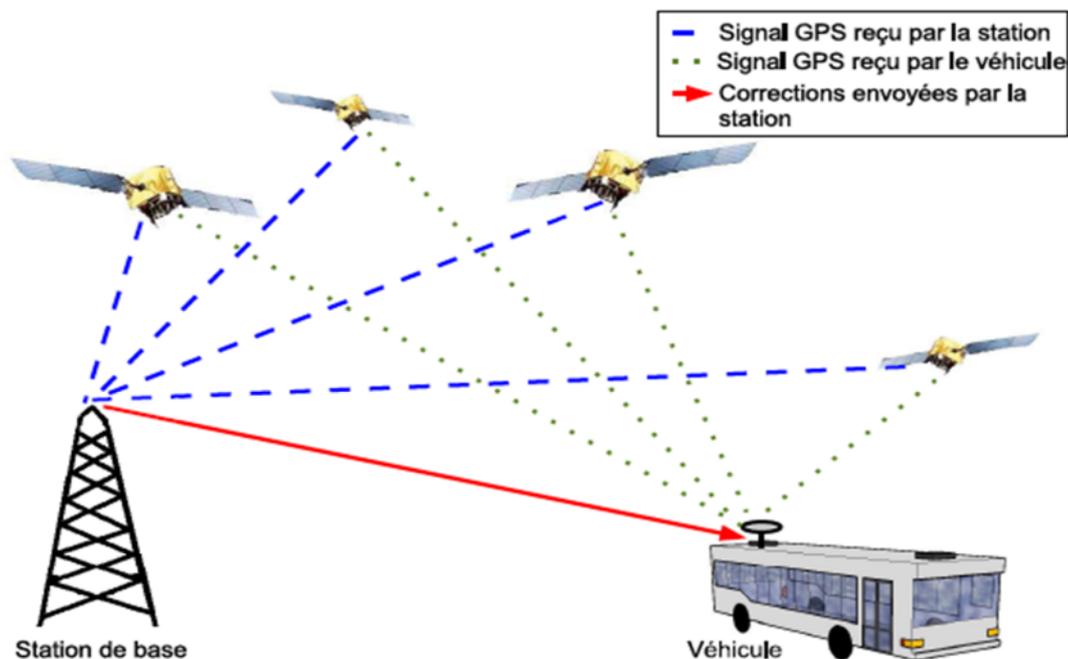
- Le GPS ne fonctionne qu'en des lieux découverts, il est incapable de déterminer la position à l'intérieur des immeubles.
- Le GPS ne fonctionne pas toujours car il arrive parfois que les signaux soient perturbés lors de la traversée de l'ionosphère.

### I.3.1.2 Les améliorations de la précision du système GPS

Le GPS est un système entièrement passif, c'est-à-dire que les récepteurs GPS n'effectuent aucune transmission. Ils se contentent de recevoir les signaux émis par les satellites. Pour déterminer une position (exprimée sous forme de coordonnées géodésiques) en 2 dimensions, il est nécessaire de recevoir le signal provenant d'au moins 3 satellites différents, et de 4 si on désire déterminer une position en 3 dimensions. La précision du système GPS est de 10 mètres, ce qui, dans certaines applications n'est pas forcément suffisant. D'autre part, la fréquence de rafraîchissement des coordonnées est relativement faible (1 seconde) [2], ce qui peut aussi être un inconvénient lors du déplacement à grande vitesse. Des techniques ont donc été présentées afin d'améliorer le système.

#### I.3.1.2.1 Le système D-GPS (Differential-GPS)

L'option D-GPS permet dans certains cas une amélioration considérable de la précision. Cette méthode consiste à corriger l'erreur issue de chaque satellite par des informations calculées par des stations terrestres dont la position est parfaitement connue. Ces corrections sont transmises aux récepteurs par ondes radio distinctes. Ce système permet d'améliorer la précision dans des zones situées aux environs des stations terrestres [4].



**Figure I.3** : Le système D-GPS.

### **I.3.1.2.2 Le système A-GPS (Assisted-GPS)**

L'idée de base du système A-GPS est d'établir un réseau de référence constitué de récepteurs GPS qui fonctionnent continuellement et qui ont une vue dégagée du ciel. Un serveur d'assistance récupère toutes les informations pertinentes provenant du réseau de référence. Ce serveur est aussi relié au réseau utilisé par le terminal mobile et fournit des données telles que la position approximative du terminal, la visibilité des satellites, ... etc. Le système A-GPS est notamment utilisé dans les environnements urbains, où la visibilité du ciel est souvent réduite en raison des habitations.

Lorsque le terminal envoie une requête, les données d'assistance du réseau de référence sont envoyées au récepteur GPS du terminal mobile pour augmenter la précision ainsi que le démarrage du système. En effet, avec un récepteur GPS, il faut un certain temps au système (appelé Time To Fix) avant de pouvoir donner la position de l'équipement [2].

## **I.3.2 Système de localisation par réseau GSM**

Les applications de localisation à l'aide du réseau GSM sont apparues au début des années 2000. C'est d'abord au Japon et aux États-Unis avec l'E-911 que ces besoins de localisation ont apparus [5].

Avant de citer les techniques de localisation dans le réseau GSM, nous allons d'abord donner un aperçu de ce réseau.

### **I.3.2.1 Réseaux GSM**

Le réseau GSM c'est un système entièrement numérique. La norme GSM offre des communications mobiles à travers le réseau, ce réseau a pour rôle de permettre des communications entre abonnés mobiles (GSM) et abonnés du réseau téléphonique commuté (RTC- réseau fixe). Les autres services proposés sont la transmission de la voix et ainsi que des données numériques de faible volume, par exemple des messages textes (SMS, Short Message Service) ou des messages multimédias (MMS, Multimedia Message Service).

### I.3.2.2 Architecture du réseau GSM

Un réseau cellulaire GSM est constitué d'une manière générale de quatre sous ensembles : la station mobile MS, le réseau d'accès BSS, le réseau cœur NSS et le centre des opérations et de maintenance OMC. La figure suivante nous présente l'architecture générale d'un réseau GSM.

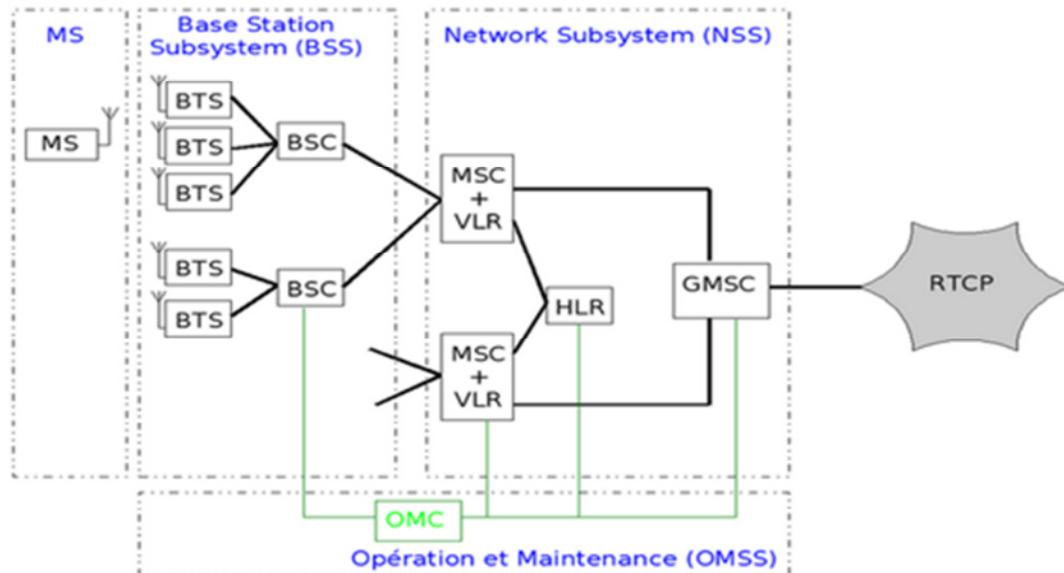


Figure I.4 : Architecture du réseau GSM.

#### I.3.2.2.1 La station mobile MS

Une station mobile se compose de deux entités physiques : l'équipement mobile qui est la partie banalisée du terminal, et le module d'identité d'abonné qui est la partie personnalisée du terminal singularisant un abonné des autres c'est une carte à mémoire appelée carte SIM (Subscriber Identity Module).

Les principales caractéristiques des terminaux sont présentées dans le tableau I.1 [6]

Classe	Puissance d'émission	Type de station
1	20W	Embarquée
2	8W	Embarquée
3	5W	Portatif
4	2W	Portatif
5	0.8W	Portatif

**Tableau I.1** : Classification des terminaux

### **I.3.2.2.2 Les constituants du réseau d'accès GSM (BSS)**

Le réseau d'accès GSM ne comporte que deux types d'équipements : la BTS et le BSC.

#### ➤ **Station de Base BTS (Base Transceiver Station)**

La station de base, l'élément central du sous-système radio, pilotant une ou plusieurs cellules. Elle assure les échanges avec le mobile grâce à l'interface Air ou interface radio. Outre la transmission radio, la station de base gère également le bon déroulement des liaisons radio en réalisant régulièrement des mesure à savoir la qualité de transmission qu'elle transmet au contrôleur de station de base (BSC : Base Station Controller).

#### ➤ **Contrôleur de station de base BSC**

Le contrôleur de station de base est l'organe intelligent du sous-système radio. Il gère une ou plusieurs stations de base, il assure le contrôle de la puissance de signal d'une ou de plusieurs stations de base. Il attribue donc les fréquences radio utilisables pour chacune de ses stations de base, en plus, d'établir le lien physique entre les BTS et le commutateur de service mobile MSC (Mobile Switching Center), que nous verrons dans la section suivante.

### **I.3.2.2.3 Les constituants du réseau cœur GSM (NSS)**

Il comprend l'ensemble des fonctions nécessaires à l'établissement des appels et à mobilité des abonnés ; il se compose de:

➤ **Le centre de communication mobile (MSC)**

Est un commutateur de données et de signalisation. Il est chargé de gérer l'établissement de la communication avec le mobile. Parmi ses principales fonctions, nous citons : la taxation, l'exécution du handover et de tout ce qui est lié à l'identité des abonnés, à leur enregistrement et à leur localisation.

➤ **Le commutateur d'entrée de service mobile (GMSC)**

Est un MSC un peu particulier, servant de passerelle entre le réseau GSM et le RTCP (réseau téléphonique commuté public). Lorsque l'on cherche à joindre un abonné GSM à partir d'un point extérieur au réseau GSM, l'appel passe par le GMSC.

➤ **Le registre des abonnés locaux HLR**

Est la base de données contenant les informations relatives aux abonnés gérées par l'opérateur. Pour chaque abonné, le HLR mémorise les informations suivantes :

- Les informations de souscription (information de l'abonné, débit maximal autorisé, ...etc.) ;
- L'identité du mobile, ou IMSI (International Mobile Station Identity) ;
- Le numéro d'appel de l'abonné ;

Par ailleurs, le HLR mémorise le numéro de VLR sous lequel l'abonné est enregistré de manière à pouvoir joindre facilement l'abonné dans le cas d'un appel qui lui est destiné.

➤ **Le registre des abonnés visiteurs (VLR)**

Est utilisé pour enregistrer des abonnés qui se trouvent dans une zone géographique donnée, appelée LA (Location Area). Ainsi l'opérateur peut savoir à tout instant dans quelle cellule se trouve chacun de ses abonnés. Les données mémorisées par le VLR sont similaires aux données du HLR mais concernent les abonnés présents dans la zone concernée.

A chaque déplacement d'un abonné, le réseau doit mettre à jour le VLR du réseau visite et le HLR de l'abonné afin d'être en mesure d'acheminer un appel vers l'abonné concerné ou d'établir une communication demandée.

### ➤ Le centre d'authentification (AuC)

Est un élément permettant au réseau d'assurer certaines fonctions de sécurité du réseau GSM :

- L'authentification de l'IMSI de l'abonné.
- Le chiffrement de la communication.

Ces deux fonctions de sécurité au début de l'établissement d'appel avec l'abonné. En cas d'échec de l'une ou l'autre des procédures, l'appel est rejeté.

L'AuC est couplé au HLR et contient pour chaque abonné sur clé d'identification lui permettant d'assurer les fonctions d'authentification et de chiffrement.

### ➤ Le registre d'identification d'équipement (EIR)

Est un équipement optionnel des réseaux GSM destiné à lutter contre le vol des terminaux mobiles. L'EIR est en fait une base de données contenant la liste des mobiles interdits, appelée black list.

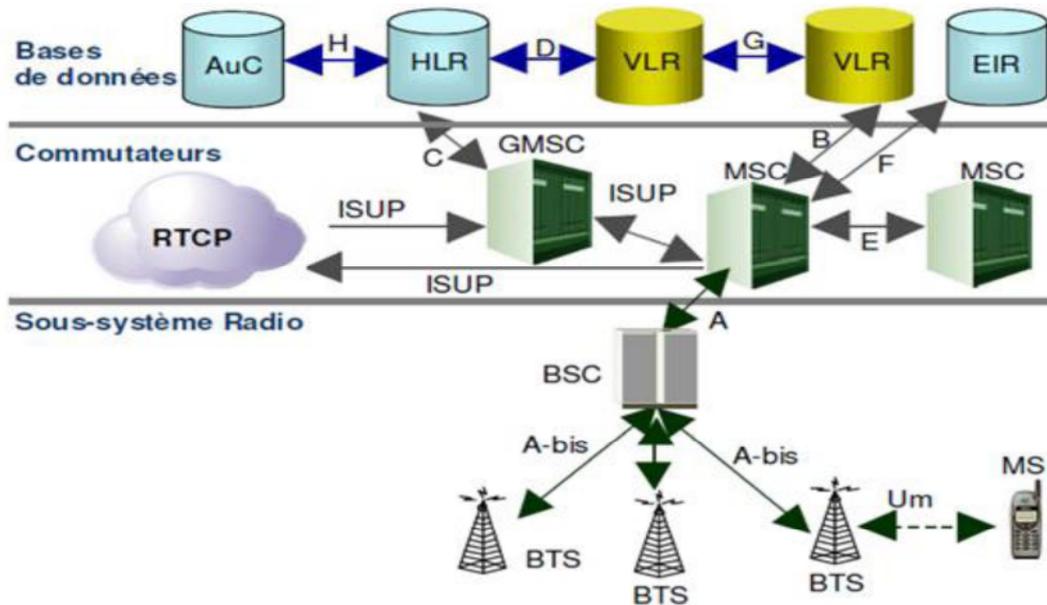
Lors de l'établissement d'un appel, le réseau demande au terminal son identité, ou IMEI (IMEI= numéro d'identifiant). Si l'IMEI retourné par le terminal fait partie de la liste des mobiles interdits, l'appel ne peut être établi.

## I.3.2.2.4 Présentation de l'OMC

Il permet à l'opérateur d'administrer son réseau [7], Cette organisation a été définie afin de permettre aux opérateurs télécoms de gérer la multiplicité des équipements (émetteurs, récepteurs, bases de données, commutateurs ...) et des fournisseurs. Les OMC permettent une supervision locale des équipements (BSC /MSC / VLR) et transmettent au NMC (Network and Management Centre) les incidents majeurs survenus sur le réseau.

## I.3.2.3 Les interfaces du réseau GSM

Les interfaces sont aussi des composants importants d'un réseau. Elles supportent le dialogue entre les équipements et permettent leur interfonctionnement [6]. La disposition des interfaces dans le réseau GSM est présentée dans la figure 1.5



**Figure I.5 :** Illustration des interfaces dans le réseau GSM.

Cette section présente brièvement les différentes interfaces du réseau GSM, ainsi que leurs fonctions principales (Tableau I.2) [7].

Nom de l'interface	Localisation	Fonction principale
<b>Um</b>	MS-BTS	Interface radio
<b>Abis</b>	BTS-BSC	La gestion des fréquences et contrôle des puissances d'émission.
<b>A</b>	BSC-MSC	Elle transporte les commandes relatives à la gestion des canaux radio
<b>C</b>	GMSC-HLR	Interrogation du HLR pour appel entrant
	SM-GMSC-HLR	Interrogation du HLR pour message court entrant
<b>D</b>	VLR-HLR	Gestion des informations d'abonnés et de localisation

	VLR-HLR	Services supplémentaires
<b>E</b>	MSC-MS-GMSC	Transport de messages courts
	MSC-MSC	Exécution des handover
<b>G</b>	VLR-VLR	Gestion des informations des abonnés
<b>F</b>	MSC-EIR	Vérification de l'identité du terminal
<b>B</b>	MSC-VLR	Divers
<b>H</b>	HLR-AuC	Échange des données d'authentification

**Tableau I.2 :** les interfaces radio dans le réseau GSM.

### I.3.2.4 Les bandes de fréquence allouées

La norme GSM prévoit que la téléphonie mobile par GSM occupe deux bandes de fréquence aux alentours des 900 [MHz] :

- La bande de fréquence 890-915 [MHz] pour les communications montantes (du mobile vers la station de base).
- La bande de fréquence 935-960 [MHz] pour les communications descendantes (de la station de base vers le mobile).

Comme chaque canal fréquentiel utilisé pour une communication a une largeur de bande de 200 [kHz], cela laisse la place pour 124 canaux fréquentiels à répartir entre les différents opérateurs. Mais, le nombre d'utilisateurs augmente, il s'est avéré nécessaire d'attribuer une bande supplémentaire aux alentours des 1800 [MHz]. On a donc porté la technologie GSM 900 [MHz] vers une bande ouverte à plus haute fréquence. C'est le système DCS-1800 (Digital Communication System) dont les caractéristiques sont quasi identiques au GSM en termes de protocoles et de service sauf que le nombre de canaux fréquentiels est de 375 [8].

Les communications montantes se font alors entre 1710 et 1785 [MHz] et les communications descendantes entre 1805 et 1880 [MHz].

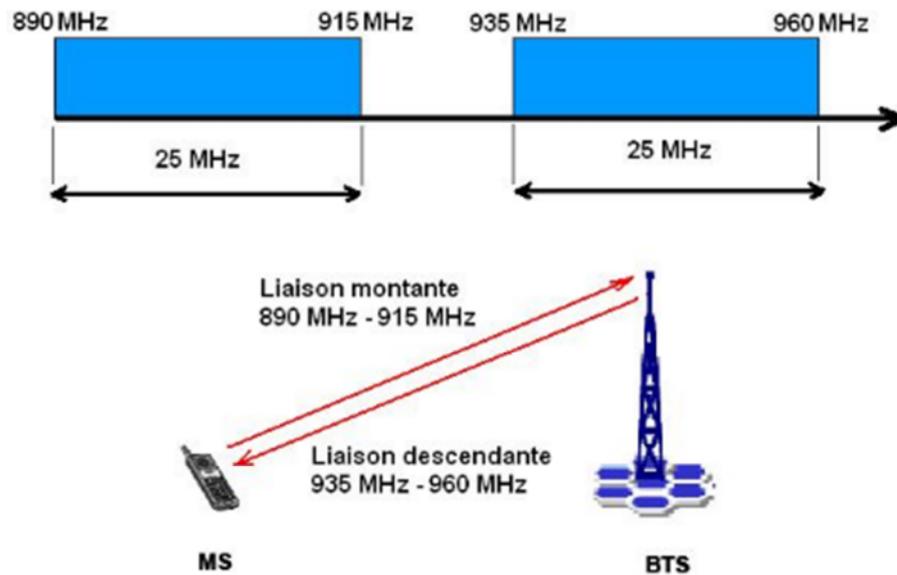


Figure I.6 : Liaison entre mobile et la BTS.

### I.3.2.5 Les caractéristiques de l'interface air

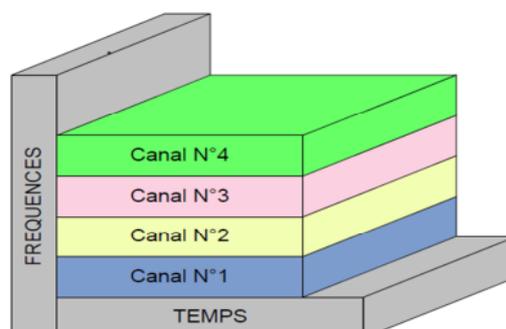
La transmission radio est assurée par l'interface radio ( $U_m$ ), partie la plus complexe et sophistiquée dans le système, nous allons représenter les caractéristiques de base de cette interface.

#### I.3.2.5.1 Partage des sources radio

Un système radio-mobile a besoin d'une partie du spectre radio pour fonctionner, étant une source limitée, partagée par plusieurs utilisateurs. Le premier choix architectural dans le GSM a été donc de partager la bande de fréquence allouée, en utilisant une combinaison des deux techniques de multiplexage FDMA/TDMA [9].

##### ➤ La technique FDMA

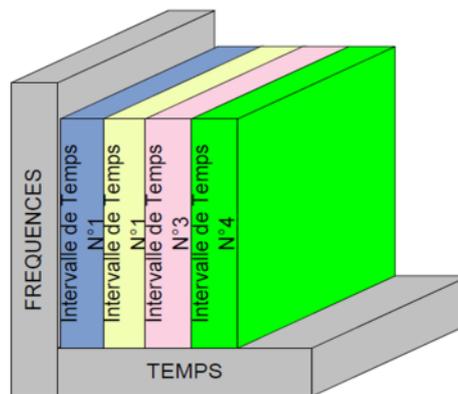
Son principe consiste à découper la bande de fréquence en canaux d'une largeur de 200KHz et à attribuer un canal fréquentiel à chaque utilisateur.



**Figure I.7 :** Partage des ressources radio en fréquence.

➤ **La technique TDMA**

Cette technique consiste à découper chaque porteuse en intervalles de temps (IT) appelée « Time Slots ». La durée élémentaire d'un slot a été fixée pour la norme GSM sur une horloge à 13 MHz, regroupés en trame (frame), chaque utilisateur occupe son propre slot.

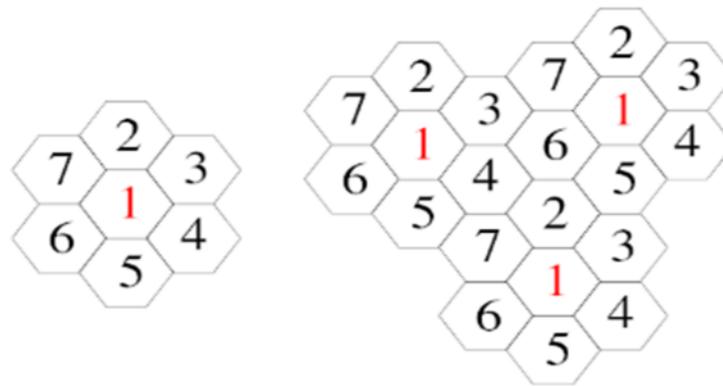


**Figure I.8 :** Partage des ressources radio en temps.

### I.3.2.5.2 Principe de réutilisation des ressources

Le principe de la réutilisation des fréquences repose sur l'atténuation que subissent les ondes radio, on peut alors utiliser la même fréquence que l'émetteur lointain émis sans crainte d'interférences.

Le concept de motif cellulaire a donc été introduit pour permettre la réutilisation d'une même fréquence dans des endroits différents. Un « motif » est le plus petit groupe de cellule contenant une seule fois l'ensemble des canaux radio (fréquences). On répète alors ce motif pour couvrir tout le territoire, permettant ainsi à partir d'un nombre de fréquences limité de mettre en place un grand nombre d'émetteurs.



**Figure I.9** : un motif élémentaire(à gauche) et un ensemble de motifs dans un réseau (à droite).

### I.3.2.5.3 Les canaux logiques

Les canaux logiques transportent soit les données d’une communication, soit des informations de signalisation qui s’adressent à la station mobile ou à la station de base. Deux familles de canaux logiques sont définies [7]:

- Trafic, pour les données des communications,
- Signalisation, pour les données de services entre les équipements.

➤ **Les canaux de trafic**

Une multitrame 26 comporte 24 trames de trafic « traffic Channel »(TCH). Les canaux de trafic transportent soit de la phonie soit de la donnée [7].

➤ **Les canaux de signalisation**

La famille des canaux de signalisation est plus nombreuse que la famille des canaux de trafic avec 51 multitrames. Les canaux de signalisation se partagent en quatre branches qui sont :

- Les canaux de diffusion.
- Les canaux de contrôle commun.
- Les canaux dédiés.
- Les canaux associés.

Le tableau I.3 liste les quatre branches de canaux de signalisation [6] :

Branches	Canal logique	Acronyme	Usage
----------	---------------	----------	-------

Canaux de diffusion	Canaux de diffusion	BCCH	Diffusion des informations générales
	Sous-canal de synchronisation	SCH	Synchronisation des stations mobiles
	Sous-canal de contrôle de fréquence	FCH	Contrôle de fréquence d'une station mobile
Canaux de contrôle commun	Canal d'allocation	AGCH	Allocation de ressource
	Canal de recherche	PCH	Appel d'une station mobile
	Canal à accès aléatoire	RACH	Demande de ressource par la station mobile
Canaux associés	Canal rapide	FCCH	Canal de supervision d'une liaison, lors d'une communication, il sert à exécuter le handover.
	Canal lent	SACCH	Transmission de mesures radioélectriques
Canaux de signalisation dédiés	Canaux associés partageant un même canal physique	SDCCH	Canal de signalisation, mise à jour de localisation ... etc

**Tableau I.3** : les canaux logiques.

### I.3.2.6 Les équipements du service de localisation

Dans le réseau GSM, les stations de base ne sont pas synchronisées entre elles, or les méthodes de localisation temporelles nécessitent que les stations de base soient synchrones. Des éléments notés LMU et MLC sont installés pour fournir une synchronisation entre ces différentes stations de base.

### I.3.2.6.1 Unité de mesure de localisation (LMU)

Les LMU sont des éléments hardware supplémentaires rajoutés au réseau GSM pour réaliser des mesures radio pour déterminer la position du mobile. Deux sortes de mesures sont identifiées la première identifie les mesures spécifiques à un MS pour calculer son emplacement, la deuxième fournit les mesures d'assistance qui sont spécifiques à toutes les stations mobiles dans une zone géographique définie.

Le standard GSM définit deux modes de fonctionnement pour ces LMU. Il existe deux types de LMU (figure I.10) :

- Les LMU de type A : les LMU de type A sont des LMU dont les échanges avec le réseau GSMs s'effectuent par l'intermédiaire d'une interface radio sans fils.
- Les LMU de type B : les LMU de type B sont des LMU interrogeables par le BSC (Base Station Controller) à travers l'interface Abis [5].

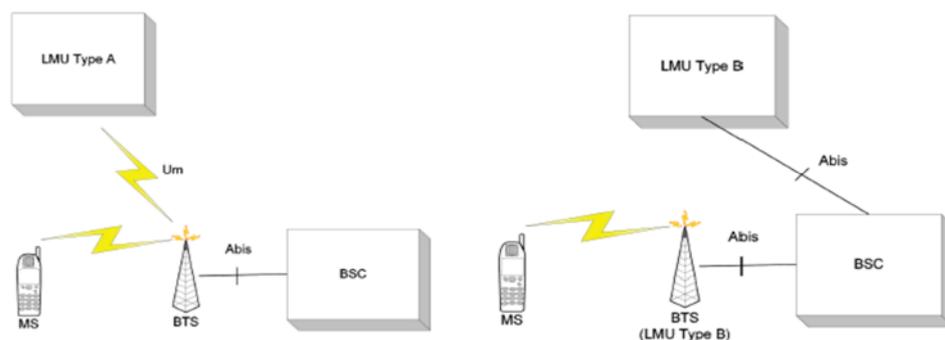


Figure I.10 : Classes de LMU.

### I.3.2.6.2 Centre de localisation de mobile (MLC)

Le MLC est un ensemble de différents éléments qui ne figurent pas dans l'architecture de base du réseau GSM et qui ont été ajoutés pour les besoins de la fonction de localisation et il est responsable d'une série de services :

- L'autorisation et l'authentification,
- Apporter les informations de localisation,
- Pénétrer aux coordonnées de BTS et d'autres paramètres physiques exigés pour la localisation,

- Estimer la localisation finale en se basant sur les mesures du signal reçues du MS et la BTS.

Ces composants sont :

➤ **Centre de localisation de mobile serveur (SMLC)**

Le SMLC est aussi chargé de transmettre aux éléments du réseau concerné la QOS (Quality Of Service) requise par le client LCS. Gère l'ensemble des ressources (BTS, LMU) qui interviennent dans la recherche de la position du mobile. Il calcule également son emplacement exact.

➤ **Centre de localisation de mobile passerelle (GMLC)**

Représente le nœud d'entrée au PLMN (Public Land Mobile Network) qui fournit le service d'estimation de la position des terminaux. En collaboration avec le HLR, il effectue les tâches d'autorisation et d'authentification des serveurs externes qui sollicitent des informations liées à la position géographique de l'abonné, ces informations sont fournies par le VMSC.

➤ **Centre de commutation du mobile visité (VMSC)**

Vérifie les caractéristiques de la souscription du mobile pour lequel nous recherchons la position. Il envoie la requête directement au SMLC, ou passe par le BTS selon l'interface SMLC/VMSC [10].

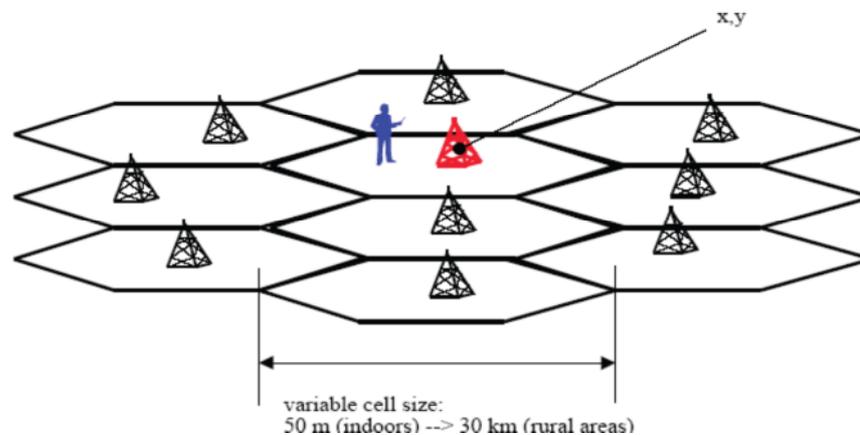
### **I.3.2.7 Techniques de localisation dans le réseau cellulaire GSM**

Les systèmes de positionnement utilisent cinq techniques pour déterminer la position d'un équipement.

#### **I.3.2.7.1 La méthode Cell-ID**

Cette méthode est la plus simple et la moins onéreuse à mettre car elle est compatible avec tous les terminaux existants. Le temps de calcul de la position est très court. Il s'agit seulement du temps de recherche dans la base de données de la position à partir de l'identifiant de la cellule. Elle situe une personne à 250 mètres près en zone urbaine où le réseau est dense contre

une dizaine de kilomètres en milieu rural, ce qui correspond à la plus grande taille de cellule. Une représentation de cette méthode est donnée dans la figure I.11.



**Figure I.11** : la méthode de géolocalisation Cell-ID.

#### ➤ Avantages

- L'avantage de cette méthode est qu'aucun calcul n'est nécessaire pour obtenir l'information d'endroit. Ainsi, l'endroit basé par l'identification est rapide et approprié aux applications exigeant la capacité élevée.
- Cette méthode est choisie par la majorité des opérateurs malgré son manque de précision est qu'elle est moins coûteuse.

#### ➤ Inconvénients

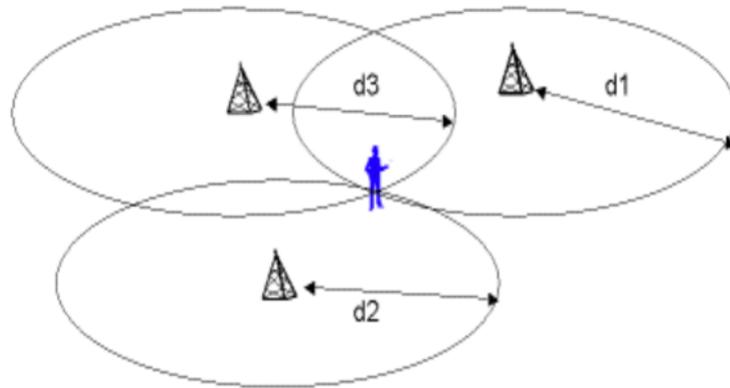
- La localisation de l'équipement n'est vraiment pas précise.
- L'exactitude dépend directement du rayon de cellules, qui peut être très grand particulièrement dans des secteurs ruraux.

### I.3.2.7.2 La puissance du signal

Une autre manière d'estimer une position est de baser le calcul sur la caractéristique physique du canal radio, c'est-à-dire, sur l'indicateur de puissance du signal reçu (RSSI).

Cette méthode utilise la force du signal pour déterminer la position de la station mobile. Si la puissance de transmission de la BTS et la puissance de réception de la station mobile sont connues, il est possible d'estimer la distance qui sépare ces deux équipements, la station mobile se situera sur un cercle qui aura pour rayon la distance entre la BTS et la station

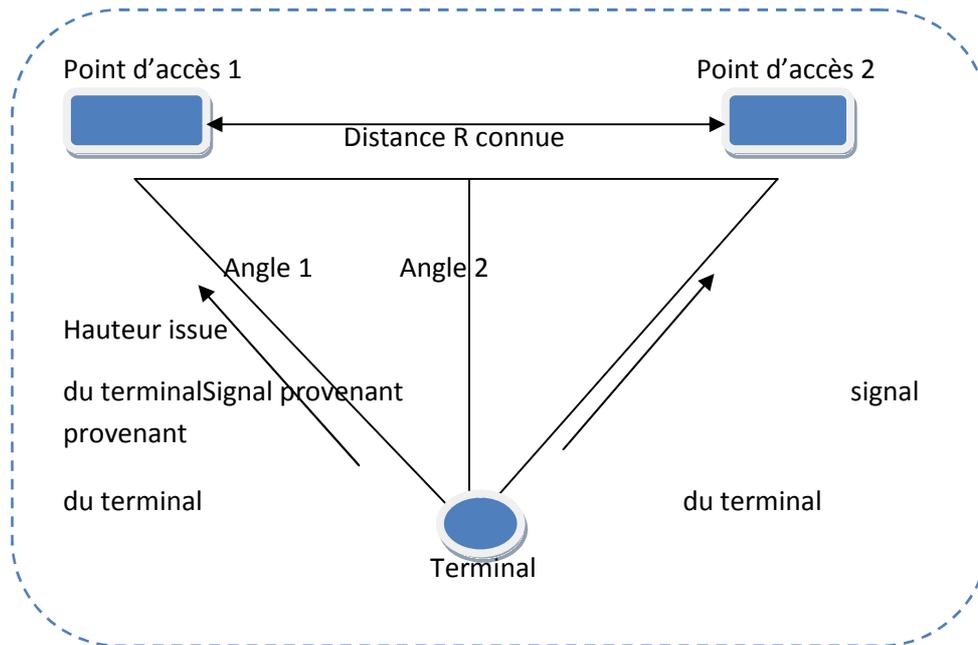
mobile. Si la puissance du signal est estimée entre trois BTS la station mobile se situera à l'intersection des trois cercles.



**Figure I.12 :** la puissance du signal.

### I.3.2.7.3 Angle d'arrivé (AOA)

Cette méthode utilise la différence de phase des signaux reçus pour calculer l'angle entre l'antenne et le mobile. La technique se fonde sur la technologie des réseaux d'antennes. Dans une rangée, les antennes sont séparées par une petite distance. AOA se base sur un principe de triangulation, les signaux émis par un terminal sont interceptés par deux points d'accès qui sont séparés par une distance  $R$  connue à l'avance, chaque point d'accès mesure l'angle d'arrivé du signal émis par le terminal, en se basant sur les identités trigonométriques il est alors possible de déterminer la longueur de la hauteur issue du terminal. Cette méthode est illustrée dans la figure I.13.



**Figure I.13 :** localisation exploitant la méthode AOA.

➤ **Avantage :**

- Moins de stations de base fixes pour localiser un mobile.
- Algorithme de positionnement simple.

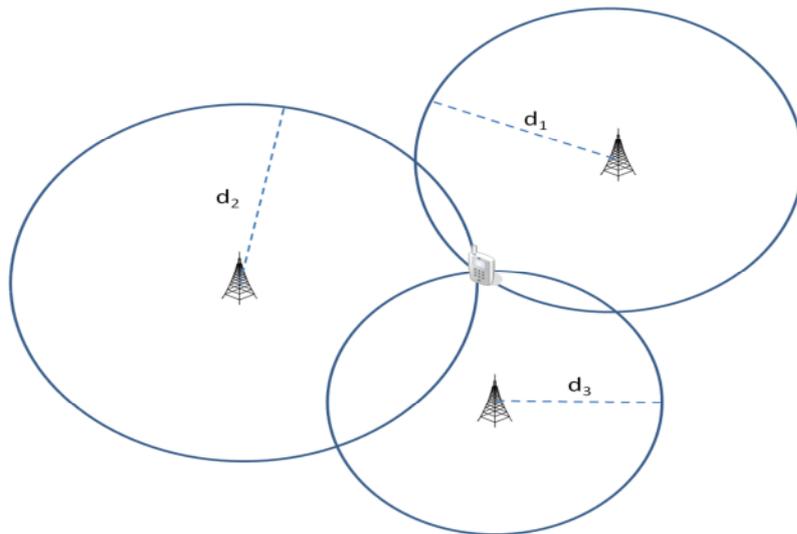
➤ **Inconvénients :**

- Nécessité d'avoir le trajet direct
- Coût d'implantation élevé
- Précision faible
- Performance mauvaise dans un canal ayant un profil de propagation par trajets multiples sévère.
- L'inconvénient majeur de cette technique est lié à la nécessité de disposer des réseaux d'antennes qui augmentent la taille des équipements utilisés et qui impliquent des coûts supplémentaires [11].

#### I.3.2.7.4 Le temps d'arrivée TOA

La méthode TOA exploite une technique de trilatération pour déterminer la position d'un terminal mobile. Le temps de propagation d'un signal étant proportionnel à la distance

traversée, il est faisable d'obtenir un cercle centré sur l'émetteur dont le rayon constitue la distance qui sépare le terminal de cet émetteur, en utilisant au moins trois BTS nous permet de déterminer une position exacte du terminal. Cette technique nécessite une assez bonne synchronisation entre les BTS et les mobiles, ce qui n'est généralement pas le cas. La TOA est représenté sur la figure 1.14.



**Figure I.14 :** Localisation exploitant La méthode TOA à trois stations de base.

➤ **Avantages :**

- Paramètres généralement bien estimés
- Algorithme de positionnement simple
- Précision plus élevée en milieu confiné [11].

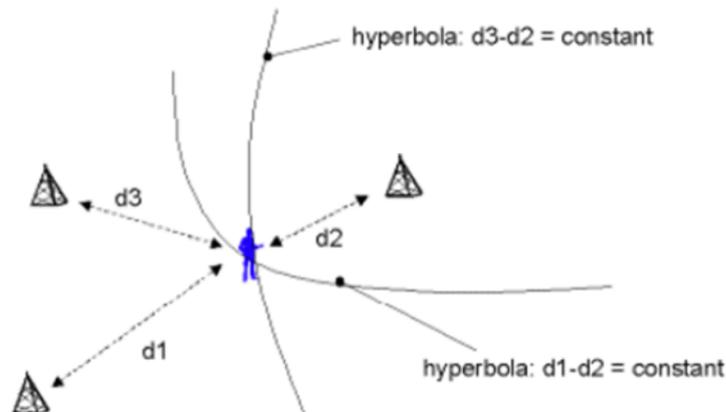
➤ **Inconvénients :**

- Synchronisation nécessaire entre le mobile et les stations de base
- Nécessité d'avoir le trajet direct
- Le coût est relativement élevé par rapport à l'exploit qu'elle offre en matière de précision.

### **I.3.2.7.5 La différence de temps d'arrivé (TDOA)**

Cette technique utilise la différence de temps mesurée plutôt que le temps absolu utilisé dans la méthode TOA. On calcule la différence de temps d'arrivée entre deux signaux provenant de

deux points d'accès différents. Cette différence est ensuite convertie en une distance constante afin d'obtenir une hyperbole qui correspond à la position possible du terminal. L'équation de cette hyperbole caractérise cette distance constante. Pour déterminer une position, il faut donc deux paires d'émetteurs en vue d'obtenir deux hyperboles dont l'intersection donne la position du terminal [2].



**Figure I.15 :** Localisation exploitant la méthode TDOA

➤ **Avantages :**

- Algorithme de positionnement simple
- Précision plus élevée en milieu confiné
- Pas besoin de synchronisation d'horloge entre le mobile et les stations de base.

➤ **Inconvénients :**

- Nécessité d'avoir le trajet direct
- Synchronisation d'horloge nécessaire entre les paires de stations de base
- TDOA est inefficace dans certains environnements comme les zones urbaines où les immeubles peuvent interférer avec les signaux et donc rendre la localisation imprécise [12]

### **I.3.3 Poursuite du mobile GSM basé sur le filtre de Kalman**

Pour estimer la position d'un terminal mobile, le filtre Kalman repose sur les informations de la station de base et de mobile récoltées à partir d'un logiciel (TEMS Investigation) installé sur un ordinateur portable, cette technique utilise les modèles de propagations en collaboration avec le filtre de Kalman étendu (EKF) et inodore (UKF), qui va nous permettre de déterminer d'une manière très précise les coordonnées du mobile.

### **I.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons défini les différentes techniques de localisation qui permettent de déduire la position d'un équipement mobile en se basant sur la réception de signaux. On peut notamment relever la méthode de localisation basée sur le filtre de Kalman qui est très performante et qui utilise les modèles de propagations pour estimer la position du mobile.

# Chapitre II

## II.1 Introduction

Le filtre de Kalman fut introduit par Rudolf E. Kalman en 1960 [5] comme solution optimale au problème du filtrage récursif dans le cadre linéaire dans une structure de type prédiction-correction. Le filtre de Kalman est présenté, en mettant l'accent sur son utilisation dans le contexte de l'estimation des paramètres de modèles. Sachant que l'application du filtre de Kalman nécessite d'avoir les mesures en entrée du filtre. Celles-ci représentent les distances calculées à partir des puissances reçues par le mobile, en utilisant les modèles de propagation selon l'environnement.

Le but de ce chapitre est de présenter quelques éléments de propagation radio ainsi que les modèles de propagation permettant la prédiction de la distance entre le mobile et la station de base. Ensuite, présenter le filtre de Kalman dans le cas linéaire. Comme l'expression de la distance en fonction des positions est non-linéaire, on fait appel à deux versions du filtre de Kalman, à savoir le Filtre de Kalman Étendu (EKF) et le Filtre de Kalman Inodore (UKF). Ces filtres sont appliqués pour la localisation du terminal mobile, qu'il soit statique ou dynamique.

## II.2 Généralités sur la propagation

### II.2.1 Propagation radio-mobile

En communications radio-mobiles, les signaux radioélectriques reçus par les stations comprennent un certain nombre de composantes. Un signal comporte éventuellement l'onde émise en trajet direct mais également et surtout les contributions sur la même fréquence de toutes les ondes réfléchies et réfractées par l'environnement (immeuble, arbre, montagne, etc.). Il est rare que l'émetteur et le récepteur soient en visibilité. Un récepteur ne reçoit très souvent qu'un ensemble d'ondes réfléchies correspondantes à des « trajets multiples » [13].

### II.2.2 Phénomènes de base de la propagation

Lors de la propagation entre un émetteur et un récepteur, le signal émis est souvent soumis à plusieurs phénomènes liés à l'environnement de propagation (Réflexion, Diffraction, transmission, diffusion), comme le montre la figure suivante.

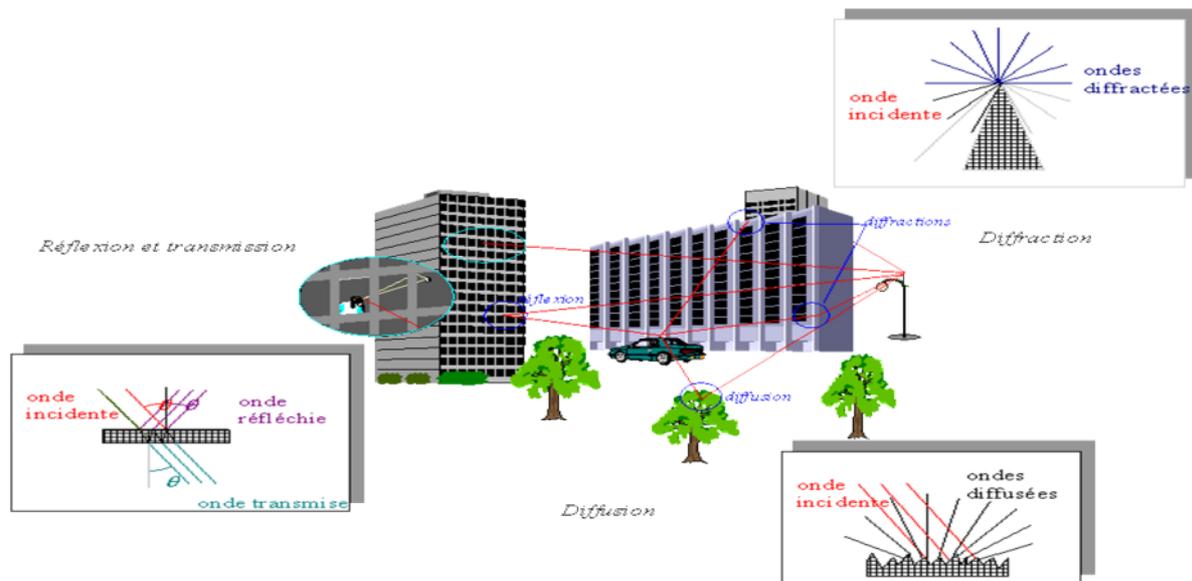


Figure II.1 : les phénomènes de base de la propagation.

### II.2.2.1 Réflexion et la transmission

Une onde qui part d'un point et qui arrive sur un obstacle va donner lieu à deux rayons : un rayon réfléchi et un rayon transmis, ainsi l'onde transmise va subir une atténuation qui dépend de la nature de milieu.

### II.2.2.2 Diffraction

On dit qu'il y a diffraction quand, dans un milieu homogène et isotrope (même vitesse de propagation pour tous les rayons radio quelle que soit leur direction) une onde ne se propage pas en ligne droite. Les phénomènes de diffraction ne se produisent que lorsque l'onde rencontre des trous ou des obstacles dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Dans le cas des environnements indoor, les obstacles et les petits éléments sont souvent nombreux.

### II.2.2.3 Diffusion

Le phénomène de diffusion peut se produire quand une onde n'est pas parfaitement plane et lisse (forêts, falaise,.....) dans de multiples directions.

### II.2.3 Différents phénomènes créant les pertes

Les pertes qui apparaissent entre l'émetteur et le récepteur sont dues à plusieurs phénomènes, certains s'appliquant à toutes les liaisons et d'autres propres au mobile à cause de sa mobilité.

Les différents phénomènes créant les pertes sont divisibles en plusieurs catégories :

#### II.2.3.1 Les pertes dues à la distance parcourue

Elle dépend de plusieurs facteurs comme la fréquence et la hauteur de l'émetteur. En effet, pour les basses fréquences, les pertes sont plus faibles, ainsi comme la puissance du mobile est plus faible que celle de la station de base, le mobile émettra sur une fréquence plus basse appelée canaux montants en opposition aux canaux descendants.

Les pertes sont plus faibles quand l'émetteur est plus haut. De plus à partir d'une certaine distance apparaît un point de rupture, au-delà duquel l'atténuation est plus élevée avec la distance [14].

#### II.2.3.2 Les effets de masque

Le masque représente une variation sur les conditions de propagation, ils sont criés lorsque l'onde traverse les obstacles, les effets de masque peuvent, soit atténuer la puissance du signal, soit modifier les caractéristiques de l'onde.

Lors de la propagation multi-trajets, deux situations de propagation sont généralement distinguées [15]. La première est désignée par le terme NLOS (None Line Of Sight) où il n'y a pas de visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur. Dans ce cas, la densité de probabilité de l'amplitude d'évanouissement du signal total reçu suit la loi de Rayleigh. Alors que, la deuxième situation aura lieu lorsqu'il existe un trajet direct (Line Of Sight, LOS) et par conséquent l'amplitude d'évanouissement est caractérisée par la distribution de Rice.

#### II.2.3.3 Les évanouissements

Le mobile dans la majorité des cas n'est pas en vision directe avec la station de base mais reçoit un signal grâce au réfléchissement du signal sur des obstacles. Cela permet de les contourner mais a aussi pour conséquence que cette onde peut avoir plusieurs trajets possibles. Ainsi le récepteur reçoit plusieurs signaux qui se superposent. La distance n'étant pas la même pour chaque trajet, le temps de transmission est également différent. Il s'opère donc un décalage entre les signaux [14].

#### **II.2.3.4 Les brouillages dus aux interférences**

Les interférences sont le fait qu'un signal utilise la même fréquence et il se passe des interférences Co-canal. Le phénomène des interférences n'est pas propre aux mobiles mais s'applique pour tous les types d'onde. Deux mobiles peuvent avoir leurs signaux qui interfèrent car la bande passante est étroite par rapport au nombre de canaux. Les fréquences sont très proches ainsi il se produit des interférences appelées interférences sur canal adjacent.

#### **II.2.3.5 Les brouillages dus au bruit**

Le bruit peut être provenu de l'extérieur ou des composants eux-mêmes (intérieur).

##### **II.2.3.5.1 Bruit externe**

Ses sources sont les rayonnements divers captés par l'antenne les interférences éventuelles entre les utilisateurs du milieu ou encore d'origine industrielle (moteur, milieu urbain, voitures,.....)

##### **II.2.3.5.2 Bruit interne**

Ils sont dus aux phénomènes électromagnétiques qui font qu'un signal traité est transmis à l'intérieur des équipements émetteur -récepteur, leur capacité est généralement bien maîtrisée.

### **II.3 Modèles de prédiction de propagation**

L'un des besoins fondamentaux dans la conception, l'implantation et l'exploitation d'un système radio-mobile terrestre soit la connaissance de la valeur de la puissance du signal reçu et de ses variations en chaque point de la couverture du système.

Dans le domaine des communications radio-mobiles tels que le réseau GSM, il existe deux approches fondamentales de prédiction de comportement d'un canal de transmission.

La première consiste à modéliser le canal de façon statique (modèles empiriques), la seconde consiste à utiliser une résolution directe des équations de propagation [16].

Dans cette partie nous limitons à la première approche.

### II. 3.1 Méthodes statistiques

Du fait de la complexité des environnements et le nombre de paramètres à prendre en compte, une approche purement statistique est souvent proposée. Ayant effectué un grand nombre de mesures, représentatives des environnements que l'on est censé rencontrer, ayant identifié quelques paramètres caractéristiques des liaisons (par exemple : distance émetteur récepteur, type d'environnement (rural, suburbain, urbain, urbain dense, ...), fréquence, ...) une expression de l'affaiblissement de propagation en fonction des paramètres caractéristiques est proposée à l'aide de techniques de régression à partir des mesures. En général, ces modèles ne nécessitent que peu d'informations caractéristiques sur l'environnement, sont très rapides en temps de calcul.

### II.3.2 Modèle de propagation sur terre plate

La formule de propagation la plus simple est celle de la propagation en espace libre. Elle montre dans ce cas, l'atténuation est inversement proportionnelle au carré de la distance, dans le cas de réflexion sur terre plate, la formule suivante a été proposée par Norton et Bullington [16].

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2} \quad (\text{II.1})$$

$P_r$  : Puissance reçue.

$P_t$  : Puissance transmise.

$G_t$  : gain à l'émission.

$G_r$  : Gain à la réception.

$d$  : Distance entre émetteur/récepteur.

$\lambda$  : Longueur d'onde.

### II.3.3 Formule empirique d'Okumura-Hata

Il s'agit d'un modèle purement statistique, en environnement du type macrocellulaire très général, adapté pour la prédiction grossière du champ dans les bandes UHF et VHF. L'expression analytique de l'affaiblissement de propagation écrite ci-dessous est due à M. Hata. L'auteur s'est basé sur les courbes empiriques proposées par Y. Okumura et reprises dans la recommandation 370 de l'UIT-R. A l'origine, cette formulation a été proposée par Hata pour la prédiction de champ pour les villes de taille moyenne. D'autres expressions de

$a(h_m)$  étaient proposées pour les zones urbaines denses et des facteurs de correction pour les zones rurales ou suburbaines devaient être ajoutées. La recommandation 370 de l'UIT-R (Union International des Télécommunications) n'a retenu que cette formule et a proposé ses propres termes correctifs [W2].

Les conditions d'application du modèle sont les suivants:

- $f$  : fréquence (en MHz) comprise entre 150MHz et 1500MHz,
- $h_b$  : hauteur (en mètre) de la station de base, comprise entre 30m et 300m,
- $h_m$  : hauteur (en mètre) de la station mobile, comprise entre 1m et 20m,
- $d$  : distance (en kilomètre) station de base-mobile, comprise entre 1Km et 20Km.

En milieu urbain, l'affaiblissement en dB appelé  $L_u$  est donnée par

$$L_u = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \log(h_b)] \log(d) \quad (\text{II.2})$$

Le paramètre  $a(h_m)$  est un facteur de correction dépendant de la hauteur de l'antenne de la station mobile et de l'environnement dans la valeur est

$$a(h_m) = [1,1 \log(f) - 0,7] h_m - [1,56 \log(f) - 0,8] \quad \text{pour une ville de taille moyenne.}$$

$$a(h_m) = 3,2 [\log(11,75 h_m)]^2 - 4,97 \quad \text{pour une grande ville (f > 400MHz).}$$

En milieu suburbain, l'affaiblissement  $L_{su}$  exprimé en dB est donné en appliquant la formule milieu urbain affectée d'une correction :

$$L_{su} = L_u - 2 [\log(f/28)]^2 - 5,4 \quad (\text{II.3})$$

En milieu rural, on distingue le cas où l'environnement est totalement dégagé comme dans un désert (affaiblissement  $L_{ro}$ ) ou bien semi-dégagé comme dans une campagne sympathique (affaiblissement  $L_{rqo}$ ).

$$L_{ro} = L_u - 4,78 [\log(f)]^2 + 18,33 \log(f) - 40,94 \quad (\text{II.4})$$

$$L_{rqo} = L_u - 4,78 [\log(f)]^2 + 18,33 \log(f) - 35,94 \quad (\text{II.5})$$

### II.3.4 Formule empirique de Coste 231-Hata

Le modèle COST 231-Hata s'applique aux fréquences comprises entre 1500 et 2000MHz. Les paramètres intervenant dans l'expression du modèle sont les suivants [16] :

- $30m \leq h \leq 200m$ .
- $1m \leq h_m \leq 10m$ .
- $1Km \leq d \leq 20Km$ .

En environnement urbain, l'affaiblissement  $L_u$  exprimé en dB est donné par :

$$L_u = 46,33 + 33,9 \text{ Log}(f) - 13,82 \text{ Log}(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \text{ Log}(h_b)] \text{ Log}(d) + C_m \quad (\text{II.6})$$

Avec:

$$a(h_m) = [1,1 \text{ Log}(f) - 0,7] h_m - [1,56 \text{ Log}(f) - 0,8] \quad \text{pour une ville de taille moyenne}$$

$$a(h_m) = 3,2 (\text{Log}(11,75 * h_m))^2 - 4,97 \quad \text{pour une grande ville (f > 400MHz)}$$

$$C_m = \begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{pour les villes de taille moyenne.} \\ 3 \text{ dB} & \text{pour les grandes villes.} \end{cases}$$

### II.3.5 Formule empirique de Walfish-Ikegami

Ce modèle empirique est une combinaison des modèles de J.Walfish et de F.Ikegami. Il a été développé par le projet du COST 231, il prend en compte la perte de propagation en espace libre, la perte par diffraction et la perte entre les toits des bâtiments voisins. Les paramètres intervenant dans l'expression du modèle sont les suivants [16,W2] :

- $800\text{MHz} \leq f \leq 2000\text{MHz}$ .
- $4m \leq h_b \leq 50m$ .
- $1m \leq h_m \leq 3m$ .
- $0.2m \leq d \leq 5m$ .
- $h_r$  : Hauteur moyenne (m) des bâtiments :  $h_r \geq h_m$ .
- $b$  : Distance (m) entre les centres des bâtiments.
- $W$  : Largeur de la route (m) ou le mobile est situé.
- $\theta$  : Angle (en degrés) qui fait le trajet avec l'axe de la route
- $\Delta h_b = h_b - h_r$  : Hauteur de la station de base au dessus des toits.
- $\Delta h_m = h_r - h_m$  : Hauteur de mobile au dessous des toits.

Ce modèle est composé de trois termes :

$$L_u(\text{dB}) = \begin{cases} L_f + L_{rts}(\text{dB}) + L_{msd}(\text{dB}) \\ L_f & \text{si } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Où

- $L_f$  est l'affaiblissement en espace libre donnée par la formule:

$$L_f = 32,44 + 20 \text{Log}(d) + 20 \text{Log}(f) \quad (\text{II.8})$$

- $L_{rts}$  le terme de perte par diffraction :

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \text{Log}(w) + 10 \text{Log}(f) + 20 \text{Log}(\Delta h_m) + L_{ori} \quad (\text{II.9})$$

$L_{ori}$  : est un facteur de correction prenant en compte l'orientation de la rue.

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,3574\theta & 0 \leq \theta \leq 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\theta - 35) & 35^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \\ 4 - 0,1004(\theta - 55) & 55^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

- $L_{msd}$  L'atténuation due aux diffractions multiples :

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \text{Log}(d) + K_f \text{Log}(f) - 9 \text{Log}(b) \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \text{Log}(1 + \Delta h_b) & \text{pour } h_b > h_r \\ 0 & \text{pour } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

$K_a$  et  $K_d$  : facteurs de correction empirique de la hauteur de l'antenne.

$K_f$  : est un facteur d'adaptation des différentes densités des bâtiments.

$$K_a = \begin{cases} 54 & h_b > h_r \\ 54 - 0,8\Delta h_b & d \geq 0,5 \text{km et } h_b \leq h_r \\ 54 - 0,8\Delta h_b \left(\frac{d}{0,5}\right) & d < 0,5 \text{km et } h_b \leq h_r \end{cases}$$

(II.13)

$$K_d = \begin{cases} 18 & \Delta h_b > 0 \\ 18 - 15 \left(\frac{\Delta h_b}{\Delta h_m}\right) & \Delta h_b \geq 0 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

$$K_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1\right) & \text{moyenne ville} \\ -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1\right) & \text{grande ville} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

En l'absence de données détaillées sur la structure des bâtiments, Walfish-Ikegami recommande les valeurs suivantes :  $20 \leq b \leq 50 \text{m}$ ,  $w = b/2$ ,  $0 \leq \alpha \leq 90$  [16].

Dans la partie pratique (chapitre3), nous utilisons les données suivantes :

Largeur de la route  $w=20\text{m}$ , l'angle (en degré) qui fait le trajet avec l'axe de la route  $\alpha=30^\circ$ , la distance entre les centres de bâtiments  $b=40\text{m}$ , la hauteur moyenne des bâtiments  $h_r=12\text{m}$ .

## II.4 Etude du filtre de Kalman

Le principe de cette partie et de commencer par faire quelques rappels sur les estimateurs, en suite, on d'écrira le principe du filtre de Kalman.

### II.4.1 Estimateur

En mathématiques, un estimateur est une statistique permettant d'estimer qu'un seul paramètre, mais il est possible d'estimer plusieurs paramètres inconnus ou même temps, dans ce cas, on ne parle plus de paramètre à estimer, mais de vecteur à estimer, ou vecteur d'état.

#### A. Estimateur déterministe

Il n'est pas possible de traiter l'estimation des paramètres déterministes comme celle des paramètres aléatoires. Il faut en particulier trouver une formulation de la mesure de performance des estimateurs. Ce que l'on cherche à trouver, c'est un estimateur qui estime au mieux ces paramètres.

##### ▪ Le biais

Un estimateur sans biais signifie que l'espérance de l'estimation doit être égale au vecteur à estimer. Bien sûr, le biais n'est pas calculable en réalité, car on ignore la valeur réelle du paramètre ou du vecteur à estimer. Par contre, il est très utile pour caractériser nos estimateurs [17]

##### ▪ La variance

Un estimateur est dit à variance minimal lorsque l'on a réussi à minimiser les variations entre le vecteur d'état réel et son estimation. On a donc minimisé l'erreur quadratique moyenne RMSE [W3]. Dans ce cas l'estimateur est dit Optimal.

### ▪ **Estimateur optimal**

Un estimateur dont le biais est nul aura une variance toujours supérieure ou égale à ce que l'on appelle la "borne inférieure de Cramer-Rao". Finalement, c'est assez logique. On ne peut pas obtenir une variance nulle et donc, on ne peut pas connaître exactement la valeur du vecteur d'état. On aura toujours une incertitude égale à la borne de Cramer-Rao pour l'estimateur optimal. Si la variance est nulle, alors ce n'est plus un problème d'estimation, car ça voudrait dire que l'on connaît la valeur à estimer dès le départ [W3].

Dans certains cas, pour avoir un estimateur sans biais à variance minimale, il faut que le système respecte quelques exigences :

- Le bruit doit être Gaussien
- Le système doit être linéaire

Cet estimateur est appelé "Estimateur sans biais à variance minimale linéaire gaussien", ou encore "Estimateur optimal linéaire gaussien" ou tout simplement "Méthode des moindres carrés".

## **II.4.2 Filtre de Kalman**

### **II.4.2.1 Mise en œuvre du filtre de Kalman**

Le filtre de Kalman est un outil puissant pour l'estimation et simple à mettre en œuvre. Il combine de manière optimale des informations provenant de lois régissant le système avec des données provenant du monde réel par l'intermédiaire de capteurs. Ce type de filtrage est appliqué dans des domaines aussi variés que la poursuite d'objet sur des images, ou alors l'extraction de contours à partir de séquences vidéo, ou en automatique, etc.

Le filtre de Kalman est défini comme l'estimateur linéaire optimal. Il existe plusieurs manières de définir le terme "optimal", car il est nécessaire de définir le critère suivant lequel on le considère comme optimal. Ce filtre traite toutes les informations dont il dispose et les pondère les unes par rapport aux autres suivant leur précision afin d'obtenir la meilleure estimation possible de l'état du système en tenant compte :

- De la connaissance des lois d'évolution du système et des mesures

- Des propriétés statistiques des bruits du système, des mesures et des incertitudes du modèle
- De toutes les informations sur les conditions initiales des paramètres du système [5].

### II.4.2.2 Modélisation du filtre de Kalman

L'objectif de filtre de Kalman est d'obtenir une estimation récursive de vecteur d'état, c'est-à-dire un algorithme qui à partir d'une estimation du vecteur d'état à l'instant  $k$  fournit une nouvelle estimation, si une mesure est disponible à l'instant  $k+1$ . De plus l'obtention des différentes équations qui constitue le filtre de Kalman est plus aisée si l'on considère les erreurs d'estimation telle qu'elles se propagent à travers la matrice de covariance de l'erreur [W3].

Notre système se modélise de la manière suivante avec une équation prédisant le nouvel état du système en fonction du dernier état connu [5] :

$$x_{k+1} = A_{k+1} * x_k + w_k \quad (\text{II.16})$$

Et d'un système permettant d'obtenir des informations réelles, Cette relation entre mesure et état du système se modélise par l'équation suivante [5]:

$$y_k = H_k * x_k + v_k \quad (\text{II.17})$$

Où,

$A_{k+1}$  la matrice de prédiction de nouvel état du système en fonction du dernier état connu, avant que la mesure à l'instant  $k+1$  ne soit disponible.

$w_k$  est le vecteur bruit qui corrompt la prédiction de moyenne nulle.

$H_k$  est une matrice reliant la mesure à un état du système. Bien sûr cette équation reliant la mesure un état du système est corrompue par le vecteur bruit  $v_k$  de moyenne nulle.

De plus  $w_k$  et  $v_k$  sont des bruits blancs gaussiens, et respectivement de matrice de covariance  $Q_k$  et  $R_k$  sont :

$$E[w_k w_k^T] = Q_k$$

$$E[v_k v_k] = R_k$$

### II.4.2.3 Déroulement du filtrage de Kalman

Après la modélisation du filtre de Kalman, nous allons maintenant suivre la démarche qui mène aux équations du filtre de Kalman. Si les équations (II.16) (II.17) dessus sont réunies, le filtre de Kalman est le filtre optimal pour l'estimation de l'état du système.

Le déroulement du filtre de Kalman se divise en trois étapes :

#### II.4.2.3.1 Etape de Prédiction

Le filtre de Kalman reprend l'estimation précédente des paramètres et de l'erreur et prédit les nouveaux paramètres et la nouvelle erreur en fonction de la modélisation du système.

Par définition :  $\hat{x}_{k+1} = E[x_{k+1} | y_1, \dots, y_k]$

Etant donné (II.16) il vient :

- **Estimation a priori (prédiction) de la nouvelle position**

$$\hat{x}_{k+1/k} = A_{k+1} * \hat{x}_k \quad (\text{II.18})$$

- **La covariance de l'erreur du à cette estimation**

On note l'expression de l'erreur de l'estimation commise sur le vecteur d'état  $\tilde{x}_k = (x_k - \hat{x}_k)$  [17]

$$P_{k+1} = E[(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1})(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1})^T]$$

Et en utilisant les équations (II.16) et (II.18), on aura :

$$P_{k+1} = A_{k+1} P_k A_{k+1}^T + Q_k \quad (\text{II.19})$$

Sachant que  $P_k = E[\tilde{x}_k \tilde{x}_k^T]$  représente la matrice de covariance de l'erreur sur l'estimation a posteriori (correction) de la position obtenue à partir de la mesure.

Nous venons ainsi d'établir une première relation entre la matrice de covariance de l'erreur a priori et la matrice de covariance de l'erreur a posteriori.

### II.4.3.2 Etape de mise à jour

A ce niveau du développement de l'algorithme, nous abordons le point clef de l'estimation récursive du vecteur d'état. A cet effet, nous adoptons une estimation linéaire du vecteur d'état de la forme [17] :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k/k-1} + K_k [y_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}] \quad (\text{II.20})$$

$K_k$  est le gain du filtre de Kalman.

Reprenons l'expression de l'erreur de l'estimation et remplaçons l'estimée par son expression donnée par (II.20), il vient :

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{k/k} &= x_k - \hat{x}_{k/k} \\ &= x_k - \hat{x}_{k/k-1} - K_k [y_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}] \\ &= (1 - K_k H_k) [x_k - \hat{x}_{k/k-1}] - K_k v_k \end{aligned} \quad (\text{II.21})$$

- **La matrice de covariance de l'erreur d'estimation**

$$\begin{aligned} P_k &= E[\tilde{x}_{k/k} \tilde{x}_{k/k}^T] \\ &= E [((1 - K_k H_k) [x_k - \hat{x}_{k/k-1}] - K_k v_k) ((1 - K_k H_k) [x_k - \hat{x}_{k/k-1}] - K_k v_k)^T] \\ &= E [(1 - K_k H_k) [x_k - \hat{x}_{k/k-1}] (1 - K_k H_k)^T [x_k - \hat{x}_{k/k-1}]^T] + E [K_k v_k K_k^T v_k^T] \\ &= (1 - K_k H_k) (1 - K_k H_k)^T E [[x_k - \hat{x}_{k/k-1}] [x_k - \hat{x}_{k/k-1}]^T] + K_k K_k^T E [v_k v_k^T] \\ &= (1 - K_k H_k) (1 - K_k H_k)^T P_{k/k-1} + K_k K_k^T R_k \end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

Nous avons donc établi une relation entre matrice de covariance de l'erreur a posteriori et la matrice de covariance a priori.

- **Expression du gain de filtre de Kalman**

Etant donné (II.21), et en appliquant ça dérivé par rapport à un vecteur  $K_k$ ,  $\frac{\partial P_{k/k}}{\partial K_k} = 0$

On obtient :

$$P_{k/k-1} H_k^T = K_k [H_k H_k^T P_{k/k-1} + R_k] \quad (\text{II.23})$$

D'où:

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T [H_k H_k^T P_{k/k-1} + R_k]^{-1} \quad (\text{II.24})$$

En utilisant l'expression (II.24) du gain de Kalman, on peut alors simplifier l'expression

(II.22) de la matrice de covariance de l'erreur d'estimation :

$$P_{k/k} = [1 - K_k H_k] P_{k/k-1} \quad (\text{II.25})$$

### II.4.2.3.3 Etape d'initialisation

Pour pouvoir utiliser l'ensemble des équations récurrentes constituant le filtre de Kalman, on doit choisir les conditions initiales de l'estimation de vecteur d'état  $\hat{x}_{0/0}$  et de la matrice de covariance de l'erreur  $P_{0/0}$ . Si l'on dispose d'aucune information a priori, on adopte pour l'initialisation du vecteur d'état :

$$\hat{x}_{0/0} = E[x_0] \quad (\text{II.26})$$

Le principe du filtre de Kalman est de minimiser la covariance de l'erreur. Nous avons pour cela besoin de la calculer. Elle vaut :

$$P_{0/0} = P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_{0/0})(x_0 - \hat{x}_{0/0})^T] \quad (\text{II.27})$$

### II.4.2.4 Limites du filtre de Kalman

Nous avons vu que le filtre de Kalman est un ensemble d'équations très efficace permettant d'obtenir le filtrage optimal du point de vue de l'erreur faite sur l'estimation de l'état du système. Le problème est que certains systèmes sont difficilement modélisable et moins linéairement.

Tout d'abord, la théorie prend pour acquis la connaissance des différentes matrices intervenant dans la modélisation de l'évolution de l'état du système auquel est appliqué le filtrage de Kalman. Cependant dans le cas où on ne dispose que d'une connaissance imparfaite des différentes matrices intervenant dans la modélisation, ce qui peut alors mener à la divergence de filtre [18].

Pour pallier à ce problème de modélisation linéaire du système, un filtre de Kalman étendu a été développé et permet de prendre en compte une modélisation non linéaire. Néanmoins, cette technique a quelques défauts. En premier lieu, la covariance de l'erreur (la précision des

estimations) ne converge pas obligatoirement (comme c'était le cas avec une modélisation linéaire).

Une autre limite importante d'une telle méthode est que le filtre de Kalman permet de prendre en compte uniquement un modèle de bruit Gaussien. Cette restriction limite donc l'utilisation du filtre de Kalman. Cependant, dans la réalité les hypothèses concernant le bruit intervenant dans les équations ne sont jamais parfaitement vérifiées et le filtrage est alors susceptible de ne pas produire les résultats escomptés ou même d'échouer.

#### II.4.2.5 Filtre de Kalman Etendu EKF

Il est possible dans certains cas les équations qui permettent de modéliser un système ne sont pas linéaires, dans ce cas il est possible d'estimer les paramètres du système à l'aide d'un filtre de Kalman étendu. Son fonctionnement consiste simplement à linéariser toutes les équations de sorte que le filtre de Kalman classique puisse être appliqué.

##### II.4.2.5.1 Fonctionnement

Dans la partie de modélisation du filtre de Kalman classique avec les équations de vecteur d'état liant l'état nouvel du système en fonction de l'état précédent qui étaient linéaires sont maintenant non linéaire, on remplace donc les équations par [W3] :

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k) + w_k \\ y = h_k(x_k) + v_k \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

De la même manière que dans le cas du Filtre de Kalman classique  $w_k$  et  $v_k$  sont des bruits blancs gaussiens de moyenne nulle et respectivement de covariance  $Q_k$  et  $R_k$ .

Les fonctions  $f$  et  $h$  ne sont pas linéaires. Le principe du filtre de Kalman étendu est d'utiliser l'extension en série de Taylor des fonctions non-linéaires et de prendre le premier ordre, en négligeant les ordres supérieurs de la série de Taylor. Il suffit donc de calculer les matrices des dérivés partielles (du premier ordre) des fonctions non linéaires (aussi appelé matrice Jacobienne). Cette dernière est calculée à chaque instant autour du point d'estimation courant  $\hat{x}$  avec l'objectif de linéariser le système :

$$A_{k+1} = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_k} \quad (\text{II.29})$$

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_k} \quad (\text{II.30})$$

De cette façon les équations de prédiction et de mise à jour deviennent :

- **étape de prédiction**

$$\hat{x}_{k+1} = f(\hat{x}_k) \quad (\text{II.31})$$

$$P_{k+1} = A_{k+1} P_k A_{k+1}^T + Q_k \quad (\text{II.32})$$

- **étape de mise à jour**

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T [H_k H_k^T P_{k/k-1} + R_k]^{-1} \quad (\text{II.33})$$

$$P_{k/k} = [1 - K_k H_k] P_{k/k-1} \quad (\text{II.34})$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k/k-1} + K_k [y_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}] \quad (\text{II.35})$$

Comme le filtre de Kalman classique, le filtre étendu nous permet d'obtenir une estimation de variance minimale à partir d'observations qui ne sont pas exactes. Par contre, c'est une méthode approximative qui n'arrive pas toujours à converger car la précision du modèle dépend en grande partie des valeurs de l'état initial que l'on choisit de façon plus ou moins empirique.

#### II.4.2.6 Filtre de Kalman inodore UKF

Filtre de Kalman inodore est une méthode de calcul des statistiques d'une variable aléatoire qui suit une transformation non linéaire. Nous considérons une variable X qui se propage aléatoirement à travers une fonction non linéaire f. l'UKF (Unscented Kalman Filter) utilise un ensemble de points échantillons soigneusement et attentivement choisis appelés « points sigma » pour représenter la moyenne et la covariance a posteriori. Etant donné le vecteur d'état prédit, les points sigma sont calculés et stockés dans les colonnes d'une matrice de taille  $2*(L+1)$ , où L est la dimension du vecteur d'état. Ces points sont calculés en utilisant un algorithme déterministe [19] :

$$(x_k)_j = \hat{x}_{k/k} \quad (\text{II.36})$$

$$(x_k)_j = \hat{x}_{k/k} + \sqrt{(L + \lambda) P_{k/k}} \quad j=2 : L+1 \quad (\text{II.37})$$

$$(x_k)_j = \hat{x}_{k/k} - \sqrt{(L + \lambda) P_{k/k}} \quad j=L+1 : 2L+1 \quad (\text{II.38})$$

Où,  $W_j$  est l'ensemble des poids associés au point  $j$  :

$$W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{(L+\lambda)} \quad (\text{II.39})$$

$$W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{(L+\lambda)} + 1 - \alpha^2 + \beta \quad (\text{II.40})$$

$$W_j^{(m)} = W_j^{(c)} = \frac{1}{(2*(L+\lambda))} \quad j = 1 : 2 * L + 1 \quad (\text{II.41})$$

Où  $\lambda = \alpha^2(L+\kappa)-L$ , tel que  $\alpha$  est le paramètre de répartition des sigmas points autour de  $\hat{X}$  généralement réglé à  $0 \leq \alpha \leq 1$ .  $\beta \geq 0$  est utilisé pour prendre en compte la connaissance a priori de la distribution de  $X$ . Pour une distribution gaussienne, par exemple,  $\beta = 2$  est une valeur approprié.  $\kappa$  est un paramètre secondaire, habituellement,  $\kappa$  est réglé à zéros pour l'estimation d'état et à  $3-L$  pour l'estimation des paramètres [1].

La transformation est construite suivant les étapes ci-dessous [1.19]:

- Les points sigma sont propagés à travers la fonction non linéaire.

$$(D_k)_j = f((x_k)_j) \quad (\text{II.42})$$

- Génération des sigmas points

$$\hat{D}_k = \sum_{j=0}^{2L} W_j^{(m)} (x_k)_j \quad (\text{II.43})$$

$$P_k = ((x_k)_j - \hat{D}_k) * W_j^{(c)} * ((x_k)_j - \hat{D}_k)' + Q \quad (\text{II.44})$$

$$(x_k)_j = \hat{x}_{k/k} + \sqrt{(L + \lambda)P_k} \quad (\text{II.45})$$

$$(x_k)_j = \hat{x}_{k/k} - \sqrt{(L + \lambda)P_k} \quad (\text{II.46})$$

- Prediction

$$(D)_j = h(x_k)_j \quad (\text{II.47})$$

$$\hat{D}_k = \sum_{j=0}^{2L} W_j^{(m)} (D)_j \quad (\text{II.48})$$

- Gain de Kalman  $K_k$  est défini par :

$$K_k = P_{xd}P_{dd}^{-1} \quad (\text{II.49})$$

Où

$$P_{dd} = \sum_{j=0}^{2L} W_j^{(c)} [(D)_j - \hat{D}_k][(D)_j - \hat{D}_k]^T + R \quad (\text{II.50})$$

$$P_{xd} = \sum_{j=0}^{2L} W_j^{(c)} [(x_k)_j - \hat{x}_k][(D)_j - \hat{D}_k]^T \quad (\text{II.51})$$

Où R est la matrice de covariance du bruit de mesure.

- L'estimation à posteriori du vecteur d'état est donné par :

$$X_k = \hat{X}_k + K_k(y_k - \hat{D}_k) \quad (\text{II.52})$$

- L'estimation a posteriori de la covariance d'erreur qui est donnée par :

$$P_{k+1} = P_k - K_k P_{dd} K_k^T \quad (\text{II.53})$$

## II.5 Conclusion

Ce chapitre avait pour objet d'une part de présenter les modèles de propagation à savoir le modèle Okumura-Hata, Coste 231-Hata et Walfish-Ikegami et d'autre part le filtre de Kalman qui permet de résoudre des problèmes non linéaire.

Dans le prochain chapitre, nous nous intéresserons à l'utilisation du filtrage de Kalman étendu et inodore dans le contexte de localiser un terminal mobile.

# Chapitre III

### III.1 Introduction

Les réseaux téléphoniques sans fil ont été développés pour répondre à la nécessité d'avoir un positionnement très précis. Ils sont composés d'un nombre très important de stations de base (BTS) capables d'opérer on toute autonomie afin de collecter et traiter diverses informations.

Pour s'affranchir ou problème de positionnement dans les réseaux nous proposons le filtre de Kalman étendu et inodore, leurs principe est d'utiliser un logiciel de surveillance du réseau (dans notre cas c'est TEMS Investigation 8.0.3 Data Collection) installé dans un téléphone mobile et sur un ordinateur portable. Après, trois modèles de propagation, ainsi que les deux Filtres de Kalman sont utilisés pour estimer la position du mobile.

### III.2 Méthodologie

Le but est de trouver la position du mobile (MS) en exploitant le réseau cellulaire GSM, le processus comporte plusieurs étapes qui sont d'écrite comme suit :

- ❖ **Etape 1** : en utilisant le logiciel TEMS Investigation 8.0.3 Data Collection qui nous permet de déterminer les informations des stations de base et de mobile chaque 10 seconde:
  - des BTS communiquant avec la station de base.
  - La puissance du signal reçu par la station mobile (RxLev).
  - Le numéro de canal porteur (ARFCN) qui est utilisé pour déterminer la fréquence porteuse(f) en Mhz donnée par l'expression suivante [20] :

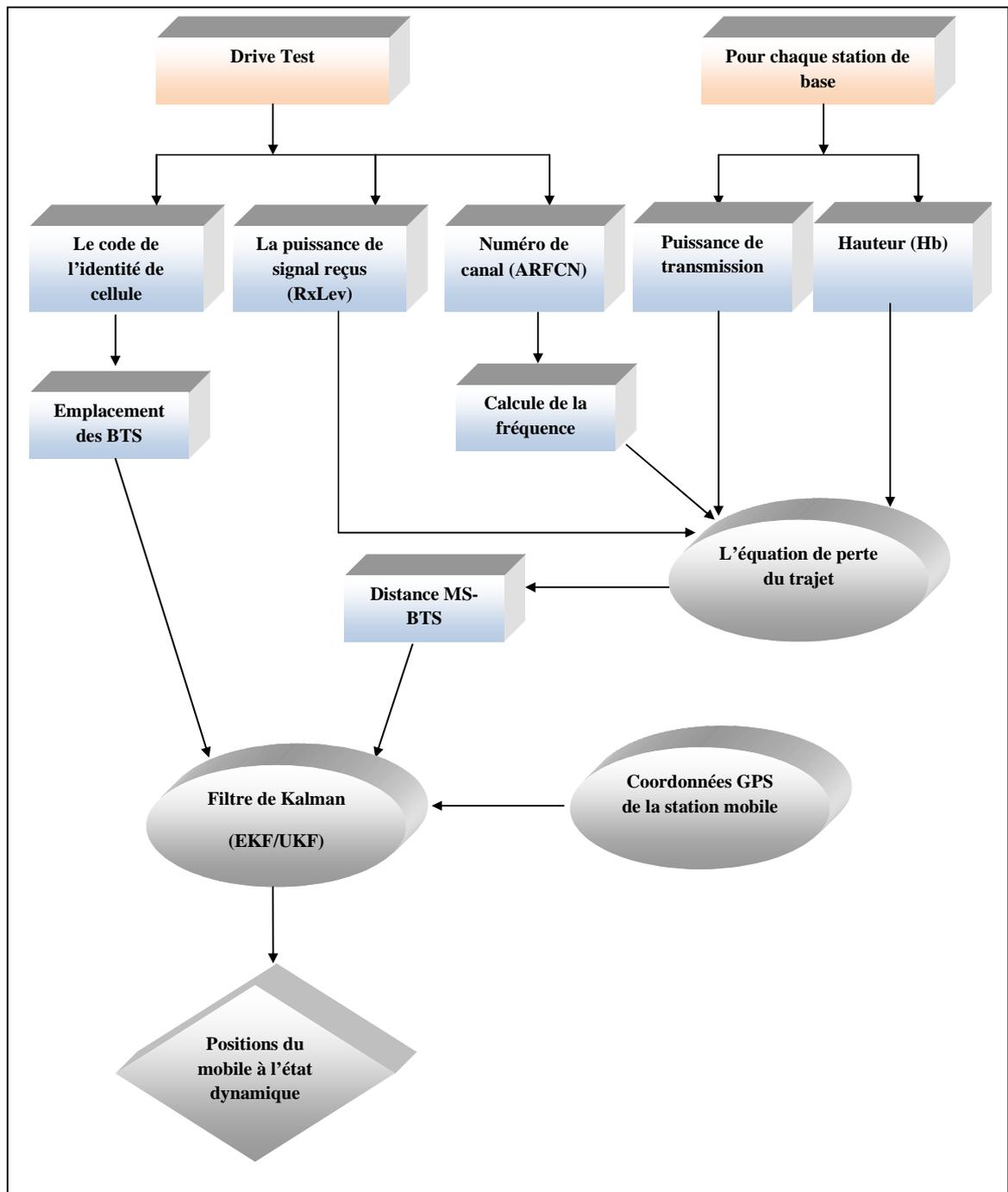
$$f=935+0.2*ARFCN \quad (\text{GSM900}) \quad (\text{III.1})$$

$$f=1805+0.2*(ARFCN-511)(\text{DCS1800})(\text{III.2})$$

- ❖ **Etape 2** : d'après la base de données des sites, on obtient le positionnement en latitude et en longitude de chaque BTS ainsi que la hauteur et la puissance d'émission impliqué dans l'expérience.
- ❖ **Etape 3** : après la collecte de toutes les informations nécessaires, cette étape consiste àcalculer la distance MS-BTS en utilisant trois modèles de propagation empiriques en environnement urbain:Okumura-Hata, Cost 231-Hataet Walfish Ikegami, les paramètres utilisé par les modèles sont présenté dans le chapitre II, par contre

l'affaiblissement étant déterminé par «  $T_x-R_x$  », la distance  $d$  (MS-BTS) est calculée en résolvant l'équation de perte de trajet ayant la distance  $d$  comme inconnue.

- ❖ **Etape 4** : une fois que la distance entre le mobile et la station de base est calculée à l'aide du MATLAB, un modèle dynamique du filtre de Kalman étendu et inodore ont utilisé pour déterminer la position du terminal mobile à l'état dynamique.



**Figure III.1** : Schéma fonctionnelle de la méthodologie générale.

### III.3 Partie expérience

#### III.3.1 Expérience

Puise que l'application du filtre de Kalman nécessite d'avoir les mesures en entrée du filtre et afin de récoltées ces mesures, nous avons été accueillis par un opérateur de téléphonie mobile qui est ATM/MOBILIS par le centre UOP de BEJAIA.

Cette partie présente le drive test effectué à BEJAIA ville, qui est réalisé en environnement urbain ou on a réalisé une expérience pour localiser le terminal mobile dans le cas dynamique.

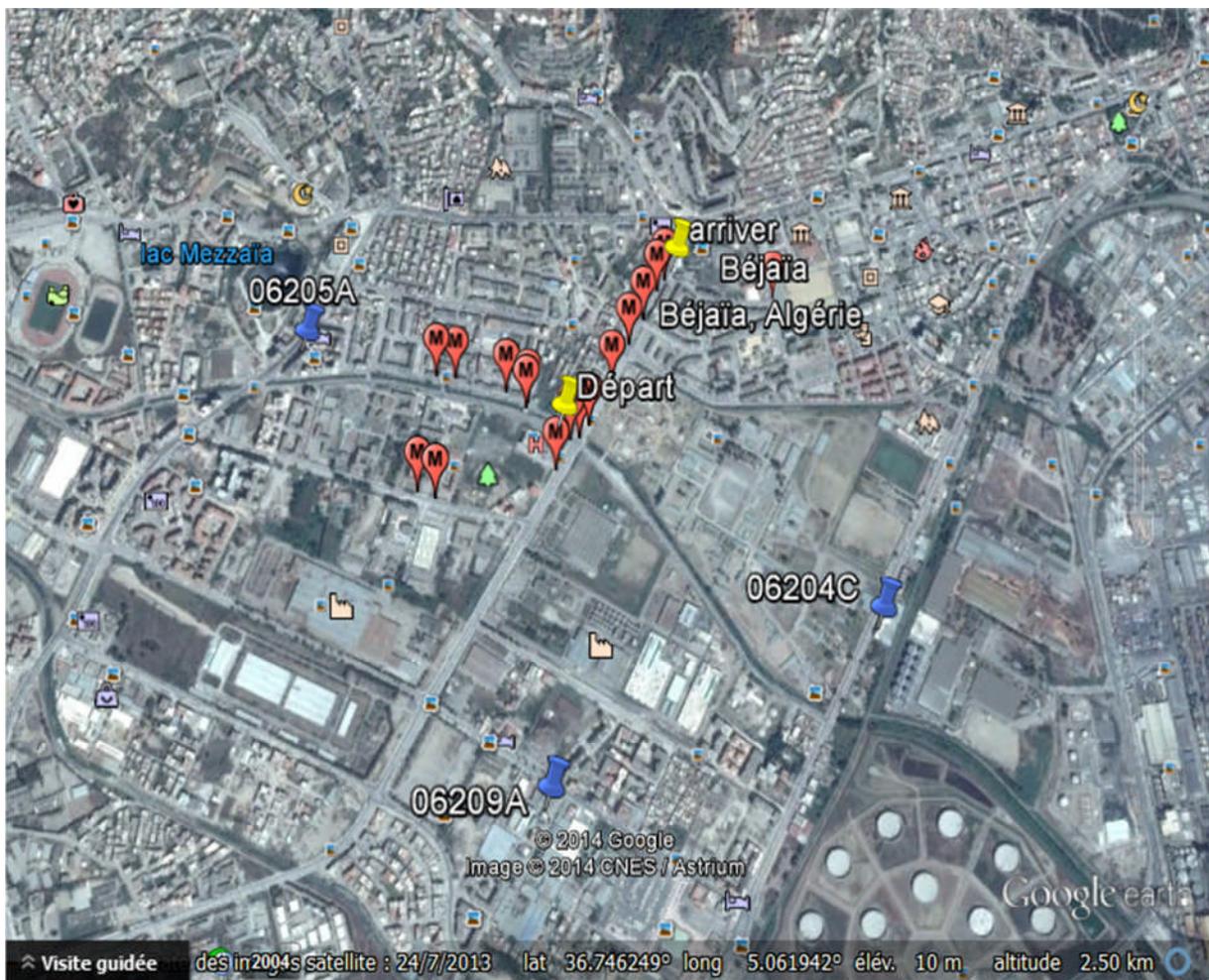


Figure III.2: Présentation de lieu de l'expérience par google earth.

### III.3.1.1 Drive test

Les ingénieurs radio effectuent des sorties d'investigations sur toutes les zones couvertes par le réseau, c'est ce qu'on appelle le drive test. Pendant la sortie qu'on a effectuée nous avons collecté des informations concernant les différents paramètres du signal, les outils utilisés pour la réalisation du drive test sont :

- Logiciel TEMS Investigation 8.0.3 (Data Collection) installé sur un ordinateur portable.
- Un terminal mobile pour effectuer un appel tout ou long de trajet.
- Un GPS placé sur le toit de la voiture utilisé afin de connaître les coordonnées du véhicule (Latitude, Longitude, Altitude) durant tout le trajet.

Pendant ce drive test les mesures sont enregistrées dans un fichier « Log files ».

### III.3.1.2. Dispositifs de mesure

#### III.3.1.2.1 Présentation du Logiciel TEMS Investigation

C'est un outil permettant d'analyser la performance du réseau, la disponibilité de système, capacité de réseau et qualité d'appel. Bien qu'elle donne l'idée seulement du côté de liaison descendante du processus.

#### III.3.1.2.2 TEMS Information

L'information fournie par TEMS est montrée dans des fenêtres de statut. Cette information inclut l'identité de cellules, le code d'identité de station de base, le porteur ARFCN de BCCH, le code de pays mobile, le code mobile de réseau et l'indicatif régional d'endroit de la cellule de portion.

Il y a également des informations sur : la puissance de signal reçus  $Rx Lev$  pour les six cellules voisines; nombre de canal, nombre de créneau horaire, type de canal ; mode de canal [21]. Figure III.2 présente une interface de logiciel TEMS et le drive test effectué.

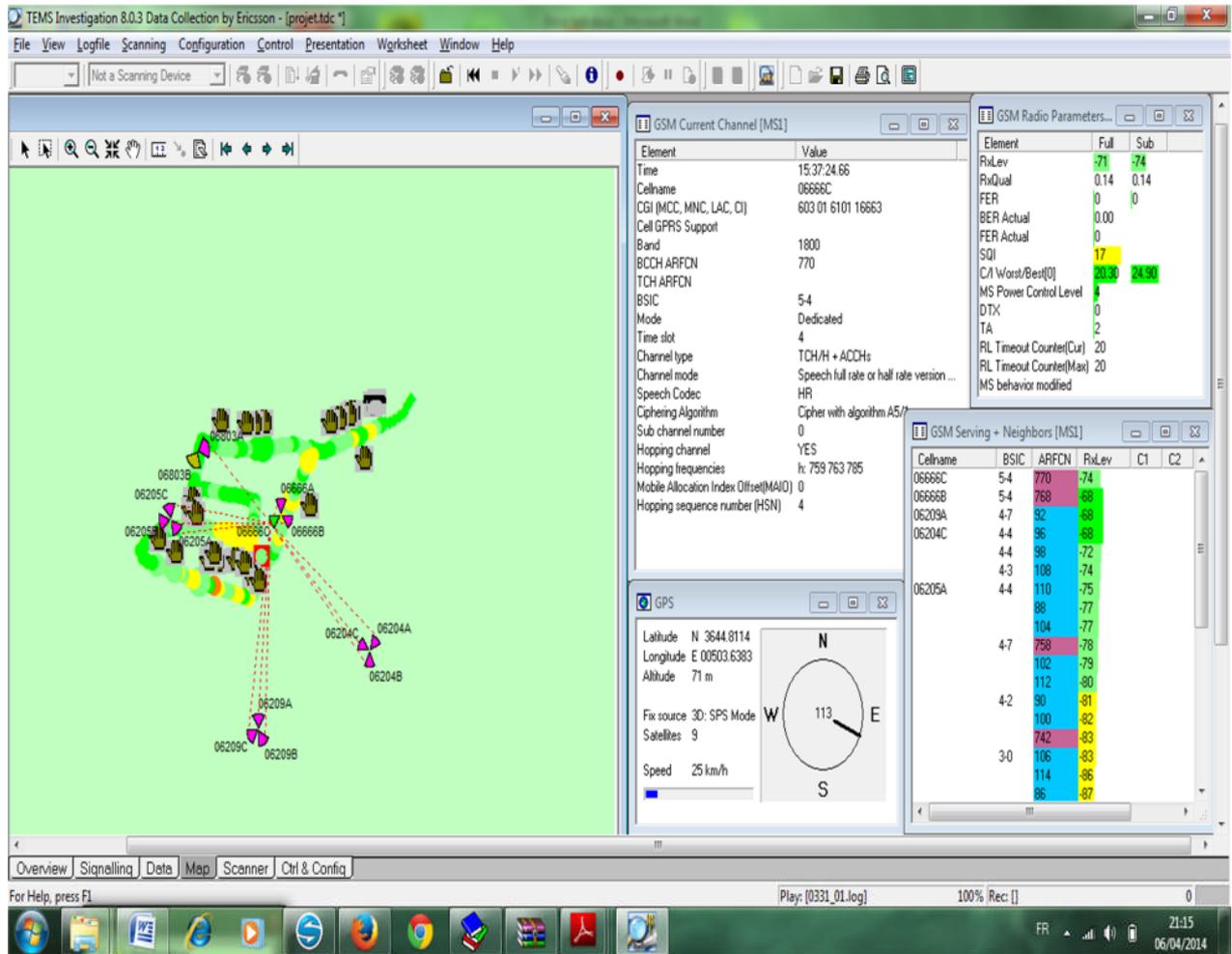


Figure III.3 : Expérience de drive test.

**III.3.1.3 Paramètres utilisés dans la simulation**

Dans notre étude nous avons choisie trois BTS qui sont 06209A, 06204C, 06205A. Le numéro de canal porteur ARFCN et le niveau de la puissance reçus du mobile RxLev durant le trajet ont été mesurés à l'aide de logiciel TEMS Investigation. La hauteur des BTS la puissance d'émission Tx et le positionnement des trois BTS en termes de latitude et de longitude en degré décimal sont récolté à partir de la base de données des sites. La hauteur de mobile est prise par défaut à 1.5 mètre. Les paramètres sont illustrés dans les deux tableaux suivant :

Cell ID	Latitude	Longitude	Hb	Tx	ARFCN
06209A	36.73953	5.06036	20	47	92
06204C	36.74286	5.06914	19	47	96
06205A	36.74839	5.05345	36	33	110

Tableau III.1 : Les paramètres des trois BTS.

Positions du MS	BTS	Rx	Coordonnées GPS
1	06209A	-68	Lat=36.74686
	06204C	-68	Long=5.060638
	06205A	-75	
2	06209A	-68	Lat=36.74661
	06204C	-69	Long=5.060967
	06205A	-80	
3	06209A	-63	Lat=36.746
	06204C	-68	Long=5.06058
	06205A	-77	
4	06209A	-66	Lat=36.74549
	06204C	-74	Long=5.057313
	06205A	-72	
5	06209A	-80	Lat=74559
	06204C	-74	Long=5.056823
	06205A	-69	
6	06209A	-73	Lat=36.74794
	06204C	-82	Long=5.057235
	06205A	-78	
7	06209A	-81	Lat=36.74788
	06204C	-80	Long=5.057768
	06205A	-79	
8	06209A	-79	La=36.74761
	06204C	-74	Long=5.059182
	06205A	-84	
9	06209A	-72	Lat=36.7474
	06204C	-78	Long=5.059788
	06205A	-81	
10	06209A	-67	Lat=36.74727
	06204C	-76	Long=5.059743
	06205A	-76	
11	06209A	-72	Lat=36.74674
	06204C	-70	Long=5.060978
	06205A	-82	

12	06209A	-72	Lat=36.74665
	06204C	-67	Long=5.06122
	06205A	-82	
13	06209A	-70	Lat=36.74691
	06204C	-68	Long=5.06148
	06205A	-84	
14	06209A	-67	Lat=36.74781
	06204C	-74	Long=5.062112
	06205A	-78	
15	06209A	-70	Lat=36.7886
	06204C	-63	Long=5.06259
	06205A	-86	
16	06209A	-75	Lat=36.74916
	06204C	-78	Long=5.062998
	06205A	-87	
17	06209A	-81	Lat=36.74974
	06204C	-85	Long=5.063388
	06205A	-88	
18	06209A	-83	Lat=36.74999
	06204C	-79	Long=5.063605
	06205A	-84	
19	06209A	-80	Lat=36.750210
	06204C	-86	Long=5.063792
	06205A	-85	

**Tableau III.2 :** Paramètres de mobile à chaque position.

### III.4 Calcul des distances MS-BTS

En utilisant les modèles de propagation (Okumura-Hata, Cost 231-Hata et Walfish Ikegami) et les données des deux tableaux III.1 et III.2, nous calculons les distances entre les trois stations de base et le mobile à chaque position ainsi que les distances réelles en coordonnées sphériques et cartésiennes afin de prédire le meilleur modèle en calculant l'erreur moyenne entre la distance réelle et la distance calculée d'après le modèle.

### III.4.1 Calcul des distances réelles

#### a) Coordonnée sphérique

La distance  $D_i(k)$  en coordonnée sphérique est définie comme suit [22]:

$$D_i(k) = R * \text{acos}(\sin(L_k) * \sin(L_i) + \cos(L_k) * \cos(L_i) * \cos(l_i - l_k)) + \varepsilon(k) \quad (\text{III.3})$$

Étant :

R le rayon de la terre R=6378.135km.

$X_k \begin{cases} L_k \\ l_k \end{cases}$  les coordonnées GPS du terminal mobile à l'instant k,  $L_k$  représente latitude et  $l_k$  longitude.

$B_i \begin{cases} L_i \\ l_i \end{cases}$  Représente les coordonnées GPS de la  $i^{\text{ème}}$  station de base (BTS).

#### b) Coordonnées cartésienne

En coordonnée cartésienne  $D_i(k)$  est définie comme

$$D_i(k) = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2} \quad (\text{III.4})$$

Étant  $(x_k, y_k)$  les coordonnées du MS à l'instant k et  $(x_i, y_i)$  les coordonnées de la  $i^{\text{ème}}$  station de base (BTS), sachant qu'avant de calculer la distance  $D_i(k)$  on doit transformer les coordonnées GPS du MS en coordonnées cartésienne en utilisant les formules suivantes [W4]:  $x = R \cdot \cos(\text{Latitude}) \cdot \cos(\text{Longitude})$  (III.5)

$$y = R \cdot \cos(\text{Latitude}) \cdot \sin(\text{Longitude}) \quad (\text{III.6}) \quad z =$$

$$R \cdot \sin(\text{Latitude}) \quad (\text{III.7})$$

Le tableau III.3 illustre les distances réelles entre les points de la trajectoire et les trois BTS. Il est à noter que les valeurs obtenues de la distance, en utilisant les formules sphérique et cartésienne sont identiques.

### III.4.2 Calcul des distances (mesurées) d'après les modèles

En appliquant les équations de la perte de trajet Okumura-Hata, Cost231-Hata et Walfish Ikegami les distances entre le mobile et les trois stations de base sont illustrés dans le tableau III.4.

$D_i(k)$ (Km)	06209A	06204C	06205A
1	0.8164	0.8794	0.6634
2	0.7900	0.8401	0.6992
3	0.7205	0.8398	0.6894
4	0.7170	1.0949	0.4722
5	0.7447	1.1400	0.4332
6	0.9768	1.2031	0.3413
7	0.9578	1.1581	0.3893
8	0.9056	1.0337	0.5186
9	0.8776	0.9754	0.5760
10	0.8634	0.8781	0.6830
11	0.8045	0.8465	0.6962
12	0.7963	0.8229	0.7196
13	0.8276	0.8186	0.7350
14	0.9349	0.8347	0.7753
15	1.0500	0.8083	0.9048
16	1.0975	0.8899	0.8560
17	1.1682	0.9219	0.8991
18	1.1998	0.9347	0.9231
19	1.2277	0.9471	0.9445

**Tableau III.3** : Distances réelle.

Modèles	Okumura-Hata			Cost 231-Hata			Walfish-Ikegami		
	D <sub>i</sub> (k)	06209A	06204C	06205A	06209A	06204C	06205A	06209A	06204C
1	0.3992	0.3989	0.3025	0.3335	0.3333	0.2503	0.6545	0.6539	0.6709
2	0.3992	0.4250	0.4215	0.3335	0.3550	0.3488	0.6545	0.6948	0.9083
3	0.2909	0.3989	0.3454	0.2430	0.3333	0.2858	0.4834	0.6539	0.7574
4	0.3517	0.5832	0.2479	0.2939	0.4872	0.2051	0.5798	0.9407	0.5594
5	0.8532	0.4250	0.2031	0.7128	0.3550	0.1681	1.3542	0.6948	0.4664
6	0.5478	0.9677	0.3691	0.4577	0.8084	0.3055	0.8861	1.5274	0.8047
7	0.9089	0.8527	0.3944	0.7594	0.7123	0.3264	1.4388	1.3531	0.8549
8	0.8009	0.5832	0.5495	0.6691	0.4872	0.4548	1.2746	0.9407	1.1575
9	0.5142	0.7513	0.4504	0.4296	0.6276	0.3727	0.8340	1.1987	0.9651
10	0.3747	0.6620	0.3232	0.3131	0.5530	0.2675	0.6160	1.0619	0.7128
11	0.5142	0.4528	0.4813	0.4296	0.3782	0.3983	0.8340	0.7382	1.0254
12	0.5142	0.3745	0.4813	0.4296	0.3128	0.3983	0.8340	0.6155	1.1575
13	0.4531	0.3989	0.5495	0.3785	0.3333	0.4548	0.7388	0.6539	0.8047
14	0.3747	0.5832	0.3691	0.3131	0.4872	0.3055	0.6160	0.9407	1.3066
15	0.4531	0.2907	0.6275	0.3785	0.2428	0.5193	0.7388	0.4830	1.3882
16	0.6217	0.7513	0.6706	0.5194	0.6276	0.5550	1.0002	1.1987	1.4749
17	0.9089	1.1701	0.7166	0.7594	0.9774	0.5930	1.4388	1.8319	1.1575
18	1.0316	0.8004	0.5495	0.8619	0.6686	0.4548	1.6242	1.2736	1.2298
19	0.8532	1.2466	0.5872	0.7128	1.0413	0.4860	1.3542	1.9464	1.3274

**Tableau III.4 :** Distances calculées par les modèles de propagation.

### III.5 Techniques de localisations utilisées

L'algorithme du filtre de Kalman étendu EKF et le Filtre de Kalman inodore UKF, nous permettent d'estimer la position du terminal mobile.

#### III.5.1 Filtre de Kalman étendu (EKF)

La dynamique de la MS est prise en compte sachant qu'elle est connectée à trois stations de base différentes, le modèle d'état du système est donné par :

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \mathbf{Q}$$

Où :  $\mathbf{Q}$  matrice de covariance de bruit de vecteur d'état.

L'étape de mise à jour (correction) nécessite d'abord le calcul de la distance (bruitée)  $D_i(k)$  entre la  $i^{\text{ème}}$  BTS et les positions du mobile à l'instant  $k$ .

### II.5.1.1 Implémentation

L'implantation du filtre EKF est détaillée dans cette partie ainsi nous montrons, les différentes équations d'obtention de la matrice Jacobienne  $H_i(k)$  de  $\hat{D}_i(k)$  [22].

- **Initialisation**

- ✓ Initialiser  $X_k$ , (position initiale).
- ✓  $P_k$ , (matrice de covariance de  $X$ ).
- ✓  $Q$ , (matrice de covariance de l'erreur sur le modèle d'état (dû ou déplacement)).
- ✓ Initialiser  $R_0$ .

Pour chaque BTS et position

- ✓ Introduire  $D_i(k)$
- ✓ En coordonnées sphériques, la matrice Jacobienne  $H_i(k)$  est exprimée comme suit [22]:

$$H_i(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{D}_i(k)}{\partial L_k} & \frac{\partial \hat{D}_i(k)}{\partial l_k} \end{bmatrix} \tag{III.8}$$

$$\frac{\partial \hat{D}_i(k)}{\partial L_k} = R \left[ \frac{\sin(L_k) \cos(L_i) \cos(l_i - l_k) - \cos(L_k) \sin(L_i)}{\sqrt{1 - [\sin(L_k) \sin(L_i) + \cos(L_k) \cos(L_i) \cos(l_i - l_k)]^2}} \right] \tag{III.9}$$

$$\frac{\partial \hat{D}_i(k)}{\partial l_k} = R \left[ \frac{\cos(L_k) \cos(L_i) \sin(l_i - l_k)}{\sqrt{1 - [\sin(L_k) \sin(L_i) + \cos(L_k) \cos(L_i) \cos(l_i - l_k)]^2}} \right] \tag{III.10}$$

- ✓ Ou en coordonnées cartésiennes, la matrice Jacobienne  $H_i(k)$  est exprimée comme suit [23]:

$$H_i(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{D}_i(k)}{\partial x} & \frac{\partial \hat{D}_i(k)}{\partial y} & \frac{\partial \hat{D}_i(k)}{\partial z} \end{bmatrix} \tag{III.11}$$

$$\frac{\partial \hat{D}_i(k)}{\partial x} = \frac{(x_k - x_i)}{\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2}} \tag{III.12}$$

$$\frac{\partial \hat{D}_i(k)}{\partial y} = \frac{(y_k - y_i)}{\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2}} \tag{III.13}$$

$$\frac{\partial \hat{D}_i(k)}{\partial z} = \frac{(z_k - z_i)}{\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2}} \tag{III.14}$$

- **Prédiction**

- ✓ Calcul de la matrice de covariance d'erreur  $P_k$  en utilisant  $P$  initial et  $Q$ .

- **Mise à jour**

- ✓  $K_k = P_k \cdot H_i' \cdot (H_i \cdot P_k \cdot H_i' + R)^{-1}$  (III.15)

- ✓  $\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + K_k \cdot (D_i(k) - \hat{D}_i(k))$  (III.16)

- ✓  $P_k = P_k - K_k \cdot H_i \cdot P_k$  (III.17)

- Fin de la boucle

### III.5.2 Filtre de Kalman inodore (UKF)

Cette approche a été développée initialement pour traiter les cas fortement non linéaires en évitant la phase de linéarisation (le calcul de la matrice Jacobienne) faite dans l'EKF. En effet, le principe de ce filtre est de prendre un ensemble de points sigma caractérisant les statistiques des données en entrée et d'obtenir ainsi une meilleure estimation de la position du terminal mobile tout ou long du trajet.

#### III.5.2.1 Implémentation

- **Initialisation**

- Utiliser les paramètres initiaux d'EKF
  - $\alpha = 0.001$
  - $\beta = 2$
  - $\kappa = 0$

Pour chaque position  $k$  et  $i^{\text{ème}}$  BTS

- a) **Calcul des Sigmas points**

$$x_{k/k} = [\hat{x}_{k/k} \hat{x}_{k/k} + B_{k/k} \hat{x}_{k/k} - B_{k/k}] \quad (\text{III.18})$$

$$\text{Sachant que } B_{k/k} = \sqrt{(L + \lambda) P_{k/k}} \quad (\text{III.19})$$

- b) **Calcul des  $W_m$  et  $W_c$**

- $\hat{x}_{k+1/k} = \sum_{j=1}^{2L+1} \hat{x}_{k/k} * W_m$  (III.20)

- $P_{k+1/k} = (X_k - \hat{x}_{k+1/k}) W_c (X_k - \hat{x}_{k+1/k})' + Q$  (III.21)

- Génération de  $2L+1$  sigma points

$$B_{k+1/k} = \sqrt{(L + \lambda) P_{k+1/k}} \quad (\text{III.22})$$

$$x_{k+1/k} = [\hat{x}_{k+1/k} \hat{x}_{k+1/k} + B_{k+1/k} \hat{x}_{k+1/k} - B_{k+1/k}] \quad (\text{III.23})$$

### b) Prédiction

- Calcule de la distance  $D_{k+1/k}$  entre les  $i^{\text{ème}}$  BTS et les Sigmas points soit en coordonnées sphérique ou cartésienne,  $\hat{D}_{k+1/k} = \sum_{j=1}^{2L+1} D_{k+1/k} W_j$  (III.24)
- Calcul de gain de Kalman K

### c) Mise à jour

- Mettre à jour l'estimation de la position de MS X en utilisant K et  $\hat{D}_{k+1/k}$  et les distances entre la MS et les  $i^{\text{ème}}$  BTS.
- Mettre à jour la matrice de covariance d'erreur P.

Fin de la boucle

## III.6. Localisation dynamique

### III.6.1 Résultats de la simulation

Dans cette section on présente les résultats obtenus par les méthodes de localisation et de poursuite décrites dans la section précédente ainsi qu'une évaluation de leur performance. Dans notre simulation un mobile a été déployé dans une zone et en ayant connaissance des positions de trois BTS placés dans les trois coins de la zone.

La précision de localisation est un critère très important pour évaluer les algorithmes de localisation, une seule métrique a été retenue pour calculer l'erreur de localisation : l'écart spatial exprimé par la distance entre la position estimée et la position réelle, pour toute la trajectoire l'erreur est la moyenne des écarts entre les positions de la trajectoire réelle et la trajectoire estimée. L'écart est calculé comme suit :

- En coordonnées cartésien

$$\text{Ecart}(k) = \sqrt{(x_{k,r} - x_{k,e})^2 + (y_{k,r} - y_{k,e})^2 + (z_{k,r} - z_{k,e})^2} \quad (\text{III.25})$$

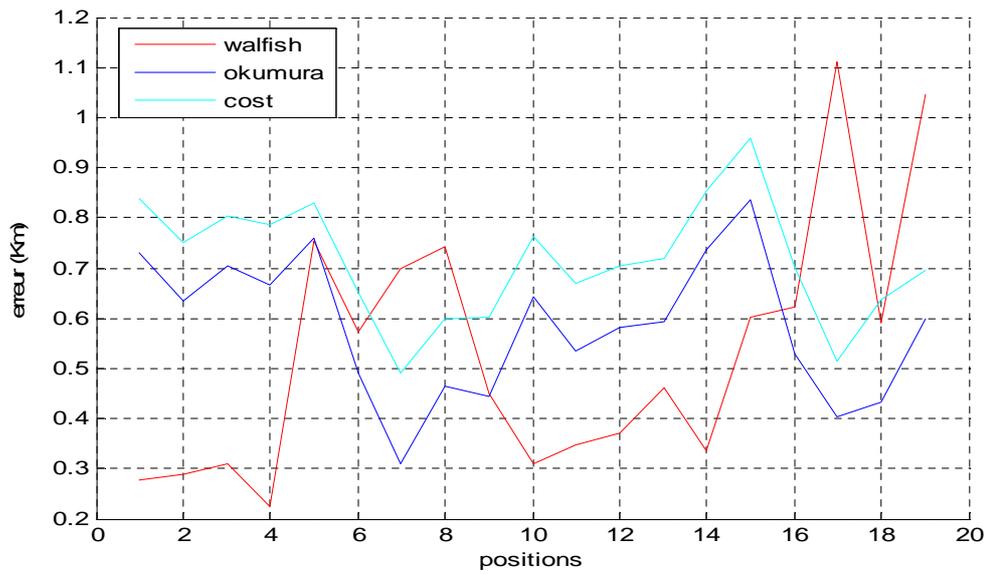
- En coordonnées sphérique

$$\text{Ecart}(k) = R * \text{acos}(\sin(L_{k,r}) * \sin(L_{k,e}) + \cos(L_{k,r}) * \cos(L_{k,e}) * \cos(l_{k,e} - l_{k,r})) \quad (\text{III.26})$$

Où R est le rayon de la terre, l'indice k,r des coordonnées représente la  $k^{\text{ème}}$  position réelle, tandis que l'indice k,e représente la  $k^{\text{ème}}$  position estimée. Les résultats obtenus sont illustrés dans la partie suivante.

### III.6.2 Choix du modèle de propagation

Après avoir obtenu les distances avec les modèles de propagation, la figure (III.4) nous montre l'erreur entre les distances réelles et celles calculées par les modèles à chaque position du mobile.



**Figure III.4:** Erreurs entre les distances réelles et celles des modèles

Modèles	Erreur moyenne(Km)
Okumura-Hata	0.5838
Cost 231-Hata	0.7144
Walfish-Ikegami	0.5328

**Tableau III.5:** Erreur moyenne (Km) entre les distances réelles et celles des modèles.

- ✓ D'après la figure(III.4) on choisit le modèle qui présente moins d'erreur de prédiction, c'est-à-dire, le modèle Walfish-Ikegami avec une erreur égale à 0.5328Km.
- ✓ Après avoir choisi le meilleur modèle, nous allons les introduire dans le filtre de Kalman étendu et inodore.

### III.6.3 Simulation préliminaires

Avant d'appliquer le processus de localisation dynamique en utilisant le filtre de Kalman, nous avons jugé plus raisonnable de faire quelques simulations préliminaires pour mieux observer et comprendre le comportement des filtres de Kalman

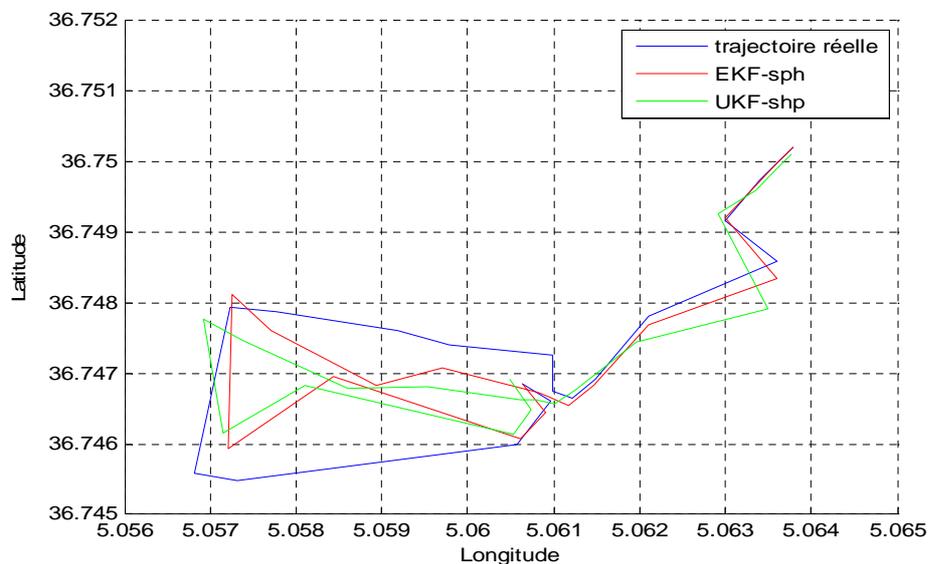
#### Simulation 1 : Influence du choix de $X$ initial

Les mesures (distances)  $D_i(k)$  appliquées à l'entrée du filtre ne sont pas celles calculées par les modèles de propagation mais les distance réelles.

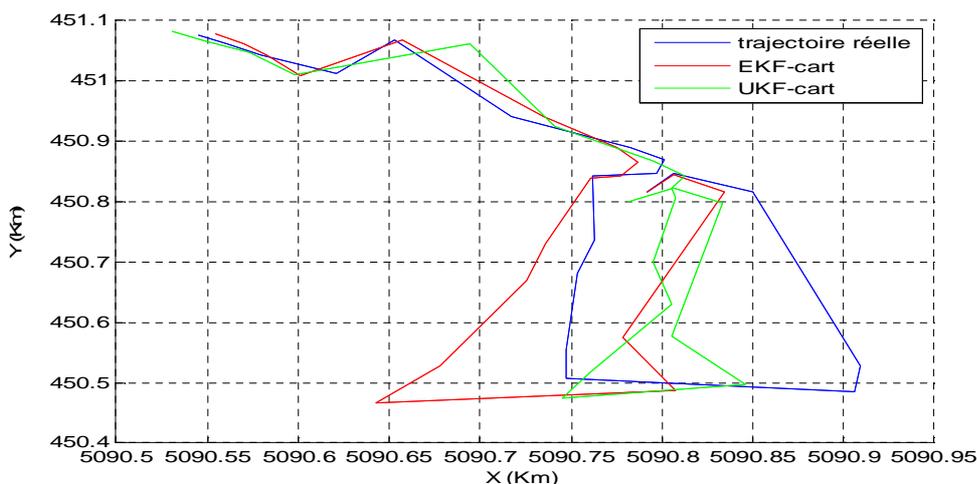
- ✓  $R_0=0$ , (mesures exactes).
- ✓  $P=1e-11*I$ ; exacte ( $I$  : matrice identité)
- ✓  $Q=[0.0015 \ 0 \ 0; 0 \ 0.0022 \ 0; 0 \ 0 \ 0.0022]$  ; exacte (En cartésien)
- ✓  $Q=1.0e-006 * [0.9 \ 0; 0 \ 0.5]$  ; exacte ; (En sphérique)

#### ❖ Simulation 1.1 : $X$ initial au départ de la trajectoire

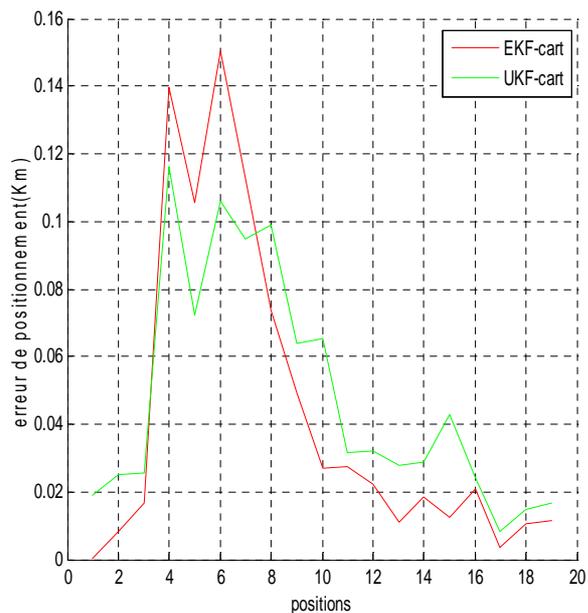
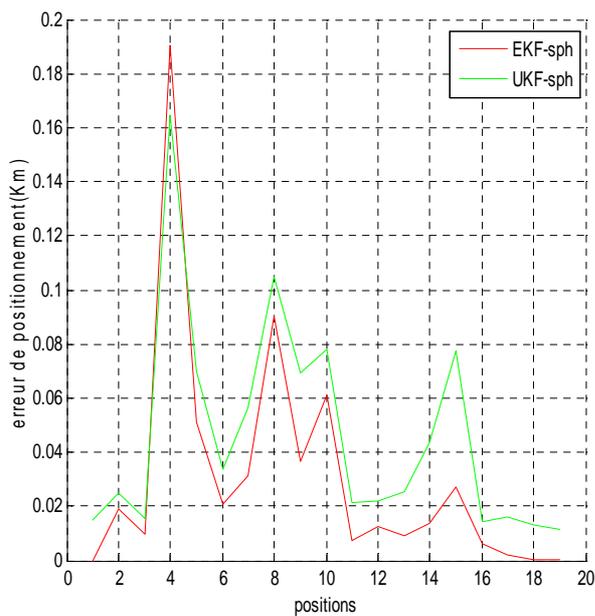
- ✓  $X_0=[36.74686 \ 5.060638]$  ou en coordonnées cartésiennes :  
 $X_0=[5090.79204664865, 450.816088448993, 3815.91499779534]$ .



**Figure III.5 :** Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec les deux filtres en sphérique.



**Figure III.6:**Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec les deux filtres en coordonnée cartésiennes.



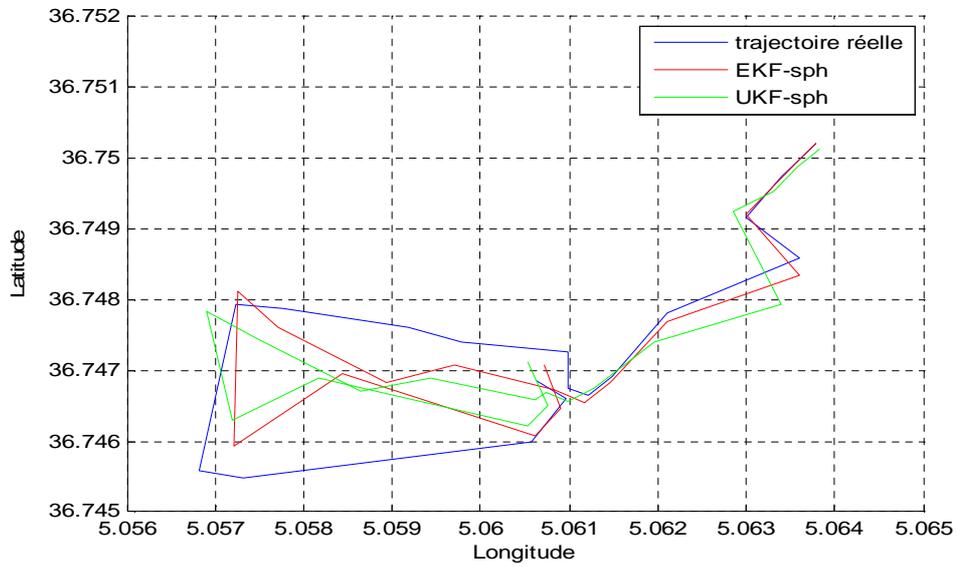
**Figure III.7:**Erreur de positionnement sans bruit obtenues avec différents filtres en sphérique et cartésien.

Erreur moyenne (Km)	Sphérique	Cartésien
Filtre EKF	0.0310	0.0432
Filtre UKF	0.0462	0.0492

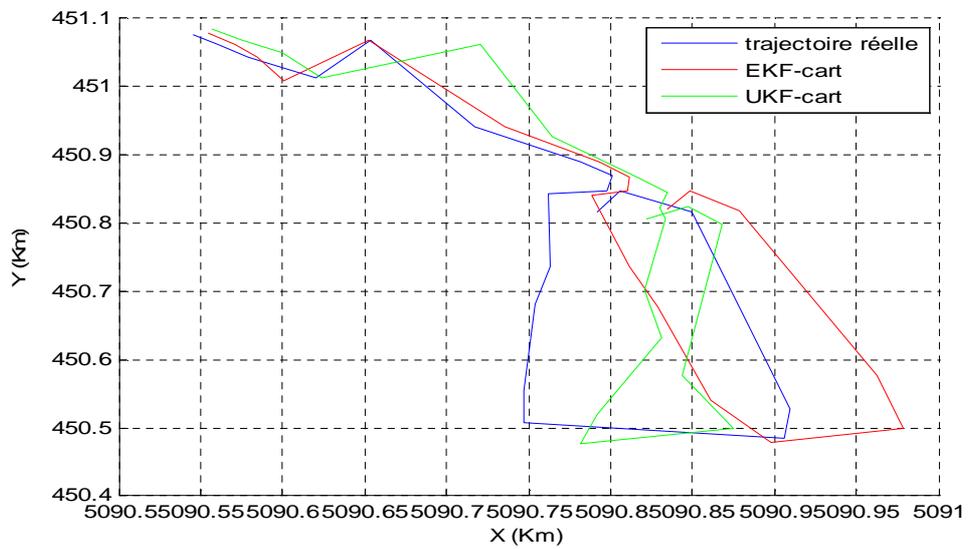
**Tableau III.6:** Erreur moyennede la simulation 1.1

❖ **Simulation 1. 2 X initial aléatoire**

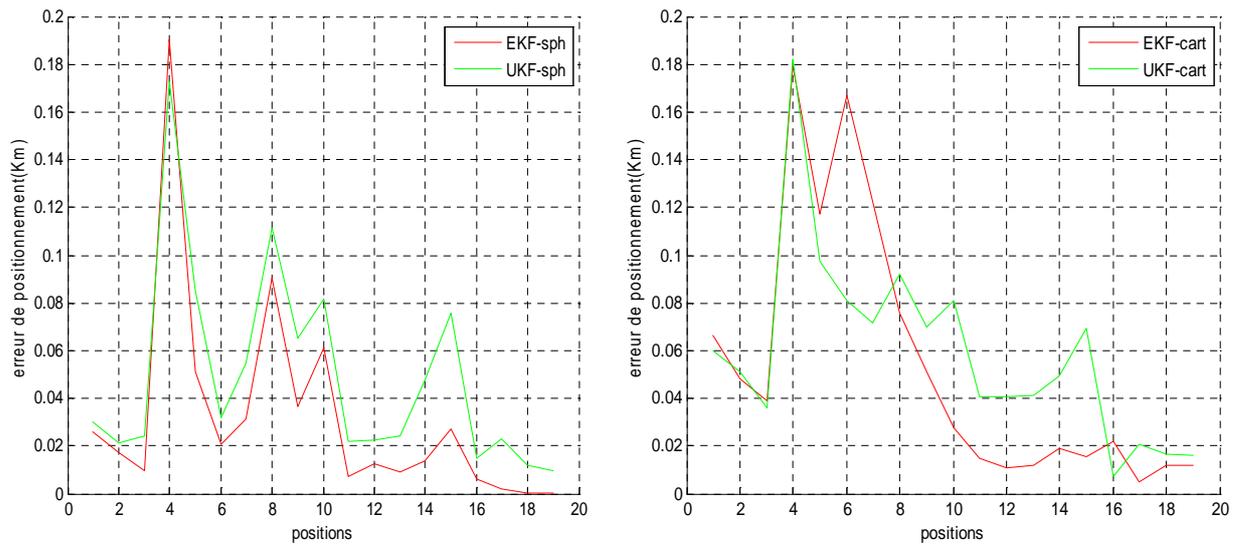
- $X_0 = E[X]$ , au milieu des trois BTS.



**Figure III.8 :** Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec les deux filtres en sphérique.



**Figure III.9 :** Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec les deux filtres en cartésien



**Figure III.10 :** L'erreur de positionnement sans bruit obtenues avec les deux filtres en sphérique et cartésien.

Erreur moyenne (Km)	Sphérique	Cartésien
Filtre EKF	0.0323	0.0535
Filtre UKF	0.0490	0.0673

**Tableau III.7 :** Erreur moyenne de la simulation 1.2

❖ **Discussion des résultats**

La précision des filtres de Kalman dépend de la bonne initialisation de la position initiale.

On remarque que le filtre de Kalman étendu ou inodore estime bien la trajectoire réelle avec  $X_0$  au départ du trajet.

D'après la simulation 1, cas où les mesures sont exactes, EKF est plus précis qu'UKF.

**Simulation 2 : Test de l'effet du mauvais choix de l'un des paramètres P, Q et R0**

Dans les tableaux suivants, on test l'effet de choisir un paramètre trop petit, trop grand ou exact en mettant les autres paramètres aux bonnes valeurs dites exactes :

$R_0=0$  ; exacte

$R_0=0.2$  ; trop grand

$P=1e-11*I$ ; exacte (I : matrice identité)

$P=1e-15*I$ ; trop petite

$P= [100\ 0;0\ 100]$ ; trop grande

**Simulation 2.1** :En coordonnées sphériques

$Q=1.0e-006 * [0.9\ 0;0\ 0.5]$  ; exacte

$Q=1.0e-0010 * [0.9\ 0;0\ 0.5]$ ; trop petite

$Q= [0.9\ 0;0\ 0.5]$ ; trop grande

$R_0$  exact,  $Q$  exacte

Erreur moyenne (Km)	P (trop petite)	P(exacte)	P(trop grande)
EKF	0.0310	0.0310	0.0310
UKF	0.0458	0.0462	0.2957

**Tableau III.8** : Erreur moyenne en coordonnées sphériques on variant P.

$R_0=0$ ,  $P=exact$

Erreur moyenne (Km)	Q (trop petite)	Q (exacte)	Q (trop grande)
EKF	0.0310	0.0310	0.0310
UKF	0.0771	0.0462	6.3259

**Tableau III.9**: Erreur moyenne en coordonnées sphériques en variant Q.

$P= exact$ ,  $Q=exact$

Erreur moyenne (Km)	$R_0=0$	$R_0$ (grande)
EKF	0.0310	0.1175
UKF	0.0462	0.1539

**Tableau III.10** : Erreur moyenne en coordonnées sphériques en variant  $R_0$ .

**Simulation 2.2** :En coordonnées cartésien

$Q=[0.0015 \ 0 \ 0;0 \ 0.0022 \ 0;0 \ 0 \ 0.0022]$  ; exacte

$Q=[0.00000015 \ 0 \ 0;0 \ 0.00000022 \ 0;0 \ 0 \ 0.00000022]$ ; trop petite

$Q= [15 \ 0 \ 0;0 \ 22 \ 0;0 \ 0 \ 22]$ ; trop grande

❖  $R_0=0$ ,  $Q$ =exact

Erreur moyenne(Km)	P (trop petite)	P (exacte)	P (trop grande)
EKF	0.0432	0.0432	0.0938
UKF	0.0492	0.0492	0.2970

**Tableau III.11** :Erreur moyenne en coordonnées cartésiennes en variant P.

❖  $R_0=0$ ,  $P$ =exact

Erreur moyenne (Km)	Q (trop petite)	Q (exacte)	Q (trop grande)
EKF	0.0432	0.0432	0.0432
UKF	0.0502	0.0492	0.3262

**Tableau III.12** :Erreur moyenne en coordonnées cartésiennes en variant Q.

❖  $P$ = exact,  $Q$ =exact

Erreur moyenne (Km)	$R_0$ (exacte)	$R_0$ (grande)
EKF	0.0432	0.1502
UKF	0.0492	0.1778

**Tableau III.13** :Erreur moyenne en coordonnées cartésiennes en variant  $R_0$ .

❖ **Discussion des résultats**

Dans cette simulation, on rappelle que  $X$  est au départ de la trajectoire, et les mesures sont exacts. On remarque dans ce cas qu'EKF est insensible aux mauvais choix des paramètres  $P$ ,  $Q$ , alors que pour  $R_0$  grand, la précision se dégrade.

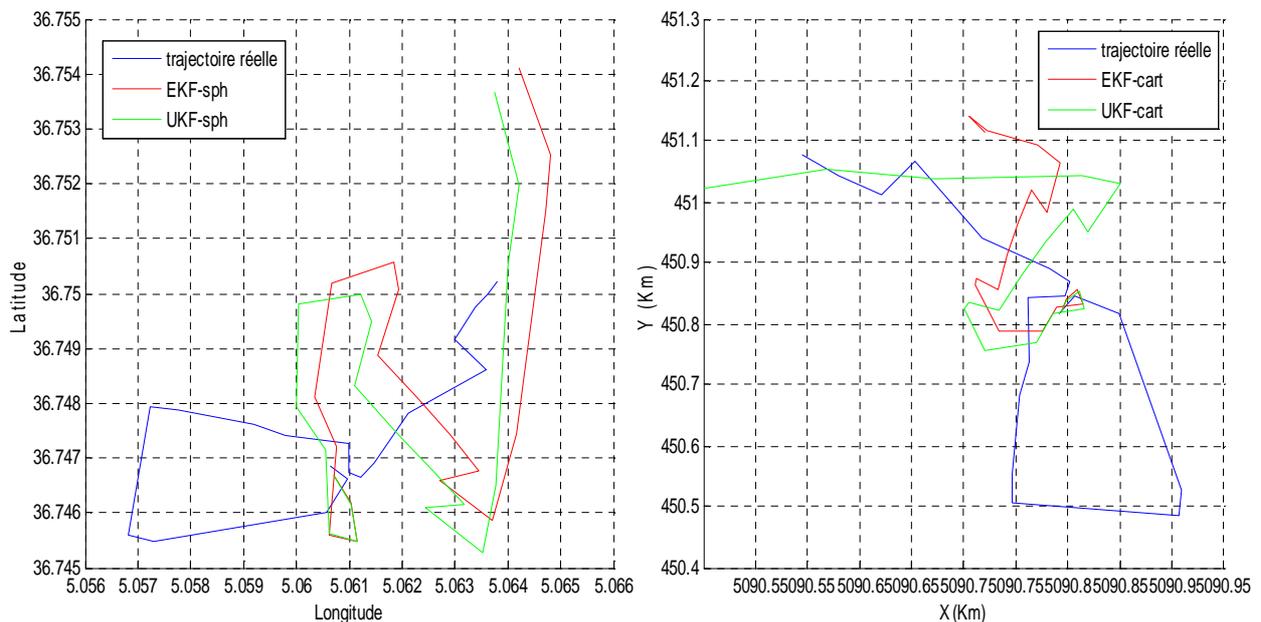
Le filtre UKF, par contre est plus sensible aux mauvais choix des paramètres, spécialement lorsqu'ils sont choisis trop grand.

### III.6.4 Localisation dynamique en utilisant les mesures réelles

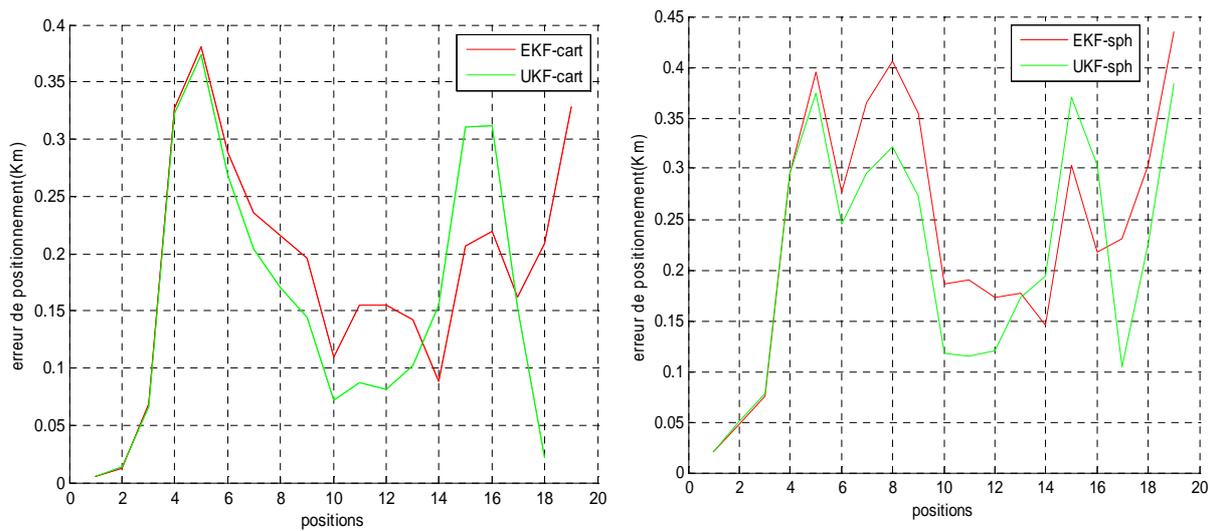
Les mesures (distances) appliquées à l'entrée des filtres sont celles calculées avec le modèle de propagation choisi c'est-à-dire le modèle Walfish-Ikegami, comme les puissances reçues ( $R_x$ ) appliquées dans les modèles de propagations sont bruitées, donc on met le bruit de mesure  $R_0$  grand, la matrice  $P$  trop petite et la matrice  $Q$  exacte.

Dans les figures III.11, III.13, la trajectoire réelle du mobile ainsi que les trajectoires estimées par l'EKF et l'UKF en coordonnées sphériques et cartésiennes sont illustrées ; Les figures III.12, III.14 montre une évaluation des résultats en termes des erreurs de positionnement obtenues en fonction des positions du mobile.

#### 1) Cas 1 : Lorsque la position initiale est connue



**Figure III.11 :** Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec les deux filtres en coordonnées sphériques et cartésiennes.



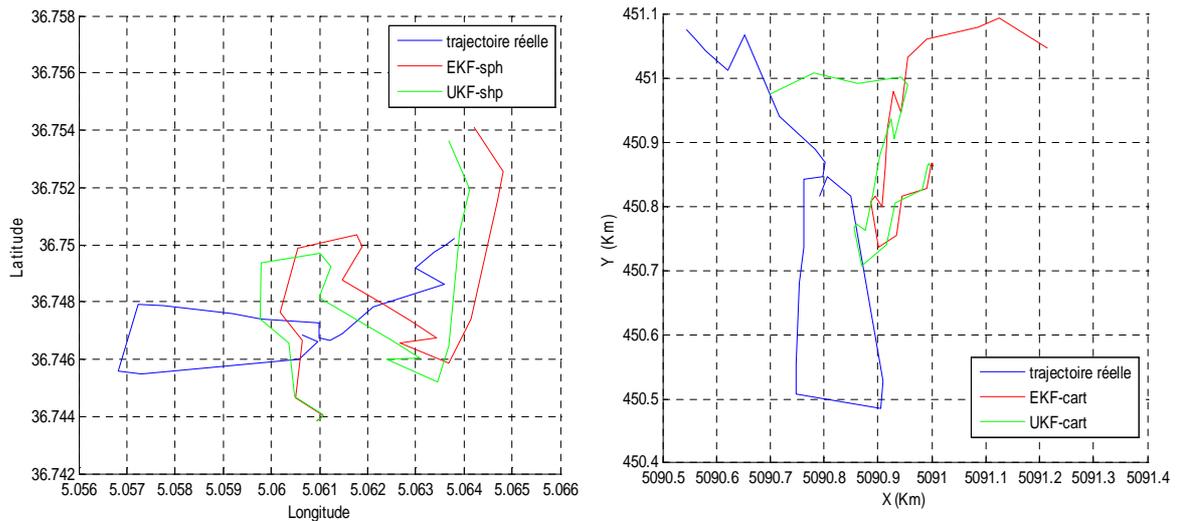
**Figure III.12** :L’erreur des positionsobtenues avec les deux filtres.

Erreur moyenne (Km)	Sphérique	Cartésien
Filtre EKF	0.2420	0.1845
Filtre UKF	0.2116	0.1586

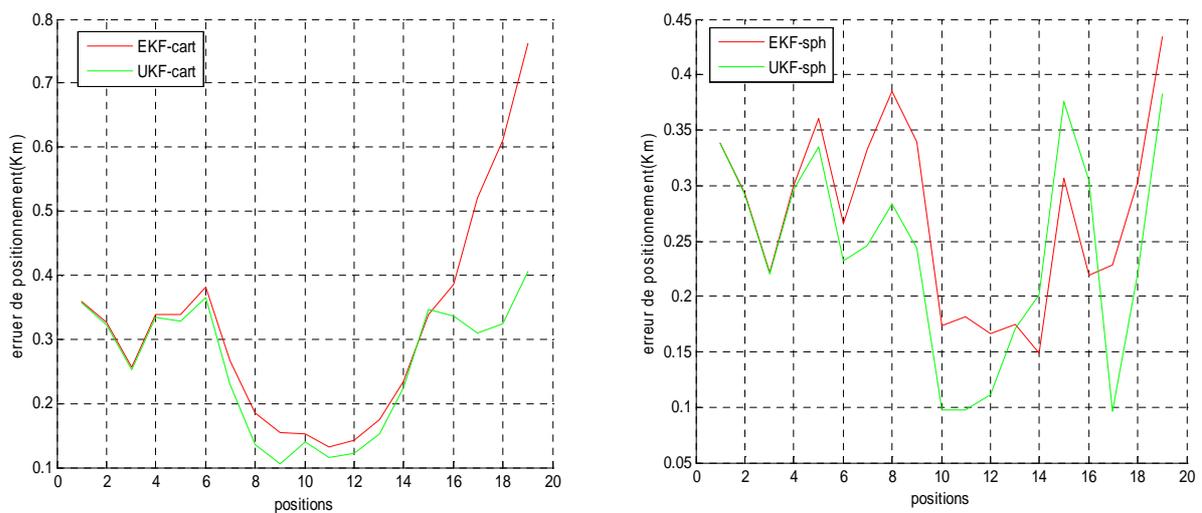
**Tableau III.14** : Erreur moyenne de positionnement.

2) **Cas 2** : Lorsque la position initiale est inconnue

Dans ce cas, on prend par défaut, la position initiale comme étant le centre des trois BTS.



**Figure III.13 :** Trajectoire réelle et trajectoire estimée avec les deux filtres en coordonnées cartésiennes et sphériques.



**Figure III.14 :** L'erreur des positions obtenues avec les deux filtres

Erreur moyenne (Km)	Sphérique	Cartésien
Filtre EKF	0.2720	0.3189
Filtre UKF	0.2392	0.2430

**Tableau III.15:** Erreur moyenne de positionnement.

### III.6.4.1 Commentaires

D'après les résultats, il s'est avéré que le meilleur modèle de propagation en terme de précision est celui de Walfish Ikegami, les figures(III.11,III.12, III13, III14), et les deux tableaux (III.14,III.15) nous montre que le choix du X initial au départ du trajet donne de meilleur estimation de la position du mobile et que l'UKF est plus performant et plus robuste que l'EKF, en effet les positions obtenues avec l'UKF sont plus précises

Suite à cette étude, on peut mettre comme remarque que d'une manière générale, l'estimation de la trajectoire d'un terminal mobile avec le filtre EKF et UKF est plus précise en utilisant les coordonnées sphériques.

La différence obtenue entre la trajectoire réelle et celle de modèle peut être due :

- Les informations relatives à la station de base et à la station mobile.
- Au logiciel TEMS.
- Les caractéristiques de l'environnement dont laquelle l'expérience s'est réalisés (la largeur de la route, la hauteur moyenne des bâtiments, l'angle (en degré) qui fait le trajet avec l'axe de la route, les obstacles...).
- A l'affaiblissement de la puissance d'émission.

## III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté deux méthodes de localisation et de poursuite dans le réseau GSM. Les deux méthodes sont basées sur le filtrage de Kalman non linéaire en utilisant des mesures de puissances des signaux échangés entre les stations de base (BTS) du réseau.

Les résultats de simulation montrent que l'EKF et L'UKF fournissent de meilleurs résultats concernant l'estimation de la trajectoire d'un mobile en utilisant les coordonnées sphériques, et que l'UKF dépasse l'EKF en termes de précision dans le cas où les mesures sont bruitées. Le filtre UKF est plus sensible aux mauvais choix des paramètres P, Q, alors qu'un mauvais choix de la variance du bruit de mesure  $R_0$  affecte la performance des deux filtres.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

Notre projet s'inscrit dans le contexte de la localisation d'un terminal mobile à l'état dynamique dans les réseaux mobiles de deuxième génération (GSM). L'exploitation d'estimateurs comme le filtrage de Kalman permet de déterminer la position de mobile en fonction des mesures réelles et des modèles de propagation choisis pour le mouvement.

L'étude portant sur la localisation est d'autant plus importante qu'il a fait l'objet de nombreuses recherches. En effet, pouvoir localiser un mobile au cours de son déplacement, permet de lui acheminer les appels dans les délais. Pour cela, notre travail a été très bénéfique tant sur le plan personnel que sur le plan professionnel. Nous avons saisi cette opportunité pour acquérir de nouvelles connaissances théoriques et pratiques sur la localisation des terminaux mobiles pour les environnements urbains.

Pour ce faire, nous avons d'abord étudié l'architecture du réseau cellulaire, les méthodes existantes pour la localisation pour ensuite choisir la méthode qui répond le mieux aux contraintes de robustesse. Ensuite, nous avons procédé à l'implémentation de filtre de Kalman étendu et inodore pour l'estimation de la trajectoire de mobile en zone urbaine ainsi la distance entre le mobile (MS) et la station de base (BTS) est déterminée à partir des modèles de propagation.

En pratique cette étude nous a permis de résoudre des problèmes réels liés à la localisation de telle manière qu'on a abouti aux résultats suivants :

Une expérience a été portée dans la ville de Bejaia à travers un stage pratique au sein de l'opérateur public ATM Mobilis. L'approche utilise le logiciel TEMS Investigation pour identifier le numéro du canal, l'identité cellulaire (Cell-ID) et l'intensité du signal reçu (Rx) pour chaque BTS connectée avec la station mobile (MS). Un appariement avec la base de données des sites va nous permettre d'identifier la position et la hauteur de chaque BTS sous-jacentes, ensuite un modèle de propagation des ondes est utilisé pour calculer la distance entre MS et chaque BTS. Enfin, un modèle du filtre de Kalman étendu et inodore a été développé pour combiner les différentes distances afin de déterminer le positionnement précis de la station mobile à l'état dynamique en termes de coordonnées sphériques et cartésiennes.

En comparant les performances des deux filtres utilisées. Le filtre de Kalman inodore est plus performant que le filtre de Kalman étendu en termes de précision, d'une manière générale l'estimation de la trajectoire du terminal mobile en coordonnées sphérique a accompli la meilleure exactitude.

Comme perspectives de ce travail nous proposons :

- La localisation du mobile utilisant le modèle PV (Position Vitesse), où la vitesse est constante et l'accélération peut être traitée comme bruit.
- La localisation du mobile utilisant le modèle PVA (Position Vitesse Accélération), où l'accélération est constante.

# Bibliographie

# *Référence bibliographique*

- [1] Y.K.BENKOUIDER, M.KECHE. « Filtrage de Kalman non linéaire pour la localisation de mobile dans un réseau de capteurs sans fil » Université des sciences et de la Technologie, USTO –MB. Oran Algérie. ICEE2013.
- [2] J. MONTAVONT. « Gestion des déplacements des terminaux IPv6 mobiles assistée par géolocalisation ». Thèse Doctorat, Université Louis Pasteur, Décembre 2006.
- [3] J. COSAUDIER. « Principes généraux de la localisation par satellites ». Avril 2003.
- [4] H. PIERRE, D. STRIVAY, T. BASTIN. « Le GPS et la physique » Université de Liège, I.P.N.A.S. Sart-Tilman B15, B4000, Liège, Belgique
- [5] F. EVENNOU. « Techniques et technologies de localisation avancées pour terminaux mobiles dans les environnements indoor ». Thèse de doctorat. Université Joseph FOURIER. Janvier 2007.
- [6] J. TISAL. « Le réseau GSM ». Edition Dunod, 2003.
- [7] P. LESCUYER. « Réseaux 3G Principes, architecture et services de l'UMTS », Edition Dunod, 2006.
- [8] C. DEMOULIN, M. VAN DROOGENBROECK. « Principes de base du fonctionnement du réseau GSM ». Revue de l'AIM, pages 3-18, N04, 2004.
- [9] S. GOURDACHE. « Gestion des ressources radio dans un réseau hétérogène ». Mémoire Magister. Université Hadj Lakhdar-Batna. Mars 2011.
- [10] A. MEDERREY, A. CAVALLI. « Test de services basés sur la localisation ». Laboratoire CNRS SAMOVAR. Institut National des télécommunications.
- [11] P. STEFANUT. « Application des algorithmes des hautes résolutions à la localisation de mobiles le milieu confiné ». Thèse doctorat. Université des sciences et Technologies de Lille. Janvier 2010.
- [12] H. SEKANDARY. « La localisation mobile et ses applications ». Université de Friboury-suisse. juillet2008.

- [16] S.TABBANE. « Réseaux Mobiles ». Editions HERMES. Paris, 1997.
- [17] M.NAGIM. « Modélisation, estimation et filtrage optimal en traitement du signal ». Publication HERMES science Lavoisier, 2006.
- [18] C. KERAMSI, T. POITEBOEUF, F.THOREY. « Les filtres de Kalman ». Mars 2011.
- [13] X. LAGRANE, P.GODLENKI, S. TABANE. « Réseau GSM » 5ème édition revue et augmentée, 2000.
- [14] A.BENNANI, H.GUEMOUNI, A.LOUKILI « Radio mobile : un outil d'aide à la planification radio ». Université Abdel Malek Essaâdi, 2009.
- [15] A. CHOUMANE. « Synthèse d'un canal de propagation par système multi-antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité ». Thèse de doctorat. Université de LIMOGES. Juin 2011.
- [19] A.NDJENG NDJENG. « Localisation robuste multi-capteurs et multi-modèles ». Thèse de Doctorat de l'université d'Evry Val d'Essonne. Septembre 2009.
- [20] Laboratory Manual. « Mobile station Measurements ». University of Gavle. 2004.
- [21] S. GOKSEL. « Optimization and log File analysis in GSM». January 26. 2003.
- [22] M. OUSSALAH, S. HAMANI. «Combination of GSM and GPS signals for mobile Positioning and location service using Kalman Filter ». University of Birmingham; Electronics, Electrical and Computer Engineering Edgbaston, Birmingham B15 2TT. 2007.
- [23] A.SHAREEF .Y. ZHU. « Localization using Extended Kalman Filters in wireless sensor Networks». Source: Kalman Filter: Recent Advances and Applications, Book edited by: Victor M. Moreno and Alberto Pigazo, ISBN 978-953-307-000-1, pp. 584, April 2009, I-Tech, Vienna, Austria

# Webographies

# *Webographies*

[W1] [www.anr-prodige.com/indesc.php?n=technologies.geolocalisation](http://www.anr-prodige.com/indesc.php?n=technologies.geolocalisation).

[W2] <http://fr.scribd.com/doc/153252531/PFE-Calibration-modele-de-propagation-GSM-3G-LTE>

[W3] <http://www.ferdinondpiette.com/blog/20011/04/le-filtre-de-Kalmen-de-lestimateur-optimal-filtre-deKalman/>

[W4] [www.mathworks.com/matlab/ref/sph2cart.html](http://www.mathworks.com/matlab/ref/sph2cart.html).