POLYPUBLIE

# Radiolocalisation en extérieur dans les espaces bidimensionnel et tridimensionnel

Nadia Réguigui

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

| | |
|---|---|
| **Date** | 2006 |
| **Type** | Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis<br>Mémoire de maîtrise/Master's thesis |
| **URL de PolyPublie**<br>PolyPublie URL | https://publications.polymtl.ca/7825/ |
| **Conditions d'utilisation**<br>Terms of use | © Tous droits réservés / All rights reserved |
| **Référence**<br>Citation | Réguigui, N. (2006). Radiolocalisation en extérieur dans les espaces bidimensionnel et tridimensionnel [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/7825/ |

**Détails de la thèse**
Thesis details

| | |
|---|---|
| **Directeurs de recherche**<br>Advisors | Jean Conan |
| **Programme**<br>Program | Non spécifié |

**Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal**
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

# RADIOLOCALISATION EN EXTÉRIEUR DANS LES ESPACES BIDIMENSIONNEL ET TRIDIMENSIONNEL

NADIA RÉGUIGUI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
NOVEMBRE 2006

© Nadia Réguigui, 2006.

Library and Archives Canada

Published Heritage Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et Archives Canada

Direction du Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

*Your file Votre référence*
*ISBN: 978-0-494-25569-8*
*Our file Notre référence*
*ISBN: 978-0-494-25569-8*

NOTICE:
The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:
L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

# RADIOLOCALISATION EN EXTÉRIEUR DANS LES ESPACES BIDIMENSIONNEL ET TRIDIMENSIONNEL

présenté par: RÉGUIGUI Nadia

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. Christophe Caloz, Ph.D., président

M. Jean Conan, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. Chahé Nerguizian, Ph.D., membre

À mes parents, qui ont sacrifié leur vie pour leurs enfants,

À mon frère et ma soeur, pour l'amour qu'ils me portent,

À ma famille et mes amis, pour leur fidélité et leurs encouragements.

# REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma plus sincère reconnaissance à mon directeur de recherche, Dr Jean Conan, pour son encadrement, sa confiance, sa patience, ses encouragements et pour l'ambiance de travail exceptionnelle qu'il nous a accordée dans notre laboratoire tout au long de ma maîtrise.

Je tiens aussi à remercier tous les professeurs qui ont contribué à ma formation ainsi que tout le personnel fort sympathique de l'école à qui j'ai souvent eu affaire pour leur disponibilité, leur aide et leur compréhension.

Une pensée particulière s'adresse à mes camarades du laboratoire: Olfa, Oualid, Éric, Zouheir, Stéphane, Anis, Ali, Samuel et Ji pour leur aide précieuse, l'ambiance très agréable et les merveilleux moments que j'ai passé en leur compagnie.

# RÉSUMÉ

Ce travail de recherche se situe dans le cadre de la géolocalisation cellulaire en extérieur. La position d'un mobile par rapport à plusieurs stations de base peut être estimée en ayant recours à différentes méthodes de positionnement. Parmi ces systèmes figurent les systèmes hyperboliques basés sur les retards de transmission des signaux de la source mobile aux stations réceptrices. D'autres systèmes se basent sur des mesures d'angles d'arrivée de ces signaux. Des méthodes hybrides basées sur ces deux types de mesure peuvent également aboutir à de meilleures précisions. Une simulation des méthodes hyperboliques et hybrides a permis d'analyser et de comparer leurs performances, permettant ainsi de localiser le mobile en deux dimensions.

Cependant, pour des applications comme les systèmes d'appels d'urgence par exemple, le besoin de connaître l'altitude du mobile est devenu une nécessité. Si la personne qui détient le mobile se trouve dans un immeuble, il est important de savoir à quel étage se situe cette personne en détresse. Ainsi, une localisation de la source mobile ne doit plus se limiter à l'espace bidimensionnel, mais doit être réalisée dans l'espace tridimensionnel.

Pour cet effet, une méthode de localisation basée sur des facteurs d'échelle est proposée dans ce travail. Une technique d'ajustement de ces facteurs est intégrée dans cette méthode afin de maximiser la précision de la localisation du mobile. Une étude de performance de cet estimateur permet de présenter un niveau de précision fort avantageux pour déterminer l'altitude du mobile et une réduction des erreurs que peuvent générer l'estimateur hyperbolique bidimensionnel pour déterminer les coordonnées de la source en deux dimensions.

# ABSTRACT

Positioning in wireless networks with external geolocation cellular systems has used several methods to locate a mobile among different base stations. In this thesis, two methods are considered: the hyperbolic systems based on the time difference of arrival of a signal propagating from the mobile source to the base stations and hybrid systems based on these time differences and the angle of arrival of the signal. A study of the performance of these methods showed that the combination of these types of measurements can provide better accuracy than the hyperbolic systems alone in locating the mobile in two dimensions.

However, for some applications such as emergency call services, the need to know the altitude of the mobile has become necessary to identify for example on which floor of a building is the person in trouble. So locating the mobile in three dimensions is an important issue.

In this thesis, a three dimension location method based on scale factors is proposed. An adaptive technique is integrated in this system to adjust these factors in order to better locate the mobile. A performance study of this estimator proved that high location accuracy levels are achieved for any position of the source. The proposed scheme even gives better performance that the hyperbolic positioning method to locate the mobile in two dimensions.

# TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE . . . . . iv

REMERCIEMENTS . . . . . v

RÉSUMÉ . . . . . vi

ABSTRACT . . . . . vii

TABLE DES MATIÈRES . . . . . viii

LISTE DES FIGURES . . . . . xi

LISTE DES TABLEAUX . . . . . xiv

LISTE DES ANNEXES . . . . . xv

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES . . . . . xvi

CHAPITRE 1 INTRODUCTION . . . . . 1

1.1 Motivations . . . . . 1

1.2 Contributions . . . . . 2

1.3 Organisation du mémoire . . . . . 3

CHAPITRE 2 TECHNIQUES DE LOCALISATION EN EXTÉRIEUR . 4

2.1 Revue des systèmes de radiolocalisation existants . . . . . 4

2.1.1 Loran C . . . . . 4

2.1.2 Systèmes satellitaires . . . . . 5

2.1.3 Systèmes terrestres : Géolocalisation cellulaire . . . . . 7

2.2 Classification des systèmes de géolocalisation cellulaire . . . . . 8

2.2.1 Méthode basée sur les mesures d'angles . . . . . 8

2.2.2 Méthodes basées sur les retards de transmission . . . . . 10
2.2.2.1 Les systèmes de positionnement sphériques (cas du système GPS) . . . . . 10
2.2.2.2 Les systèmes de positionnement elliptiques . . . . 11
2.2.2.3 Les systèmes de positionnement hyperboliques . . 13
2.2.3 Autres critères de classification utilisés . . . . . 15

CHAPITRE 3 TECHNIQUES DE RADIOLOCALISATION EN EXTÉRIEUR DANS L'ESPACE BIDIMENSIONNEL . . . . . 17
3.1 Systèmes hyperboliques . . . . . 17
3.1.1 Méthode de linéarisation des séries de Taylor . . . . . 20
3.2 Technique hybride basée sur les TDOA et les AOA . . . . . 24
3.3 Résultats de simulation et étude de performance . . . . . 28
3.3.1 Borne de Cramér Rao . . . . . 29
3.3.2 Résultats de simulation . . . . . 31
3.4 Conclusion . . . . . 47

CHAPITRE 4 TECHNIQUES DE RADIOLOCALISATION DANS L'ESPACE TRIDIMENSIONNEL . . . . . 48
4.1 Méthode d'introduction des facteurs d'échelle dans les systèmes hyperboliques en 3D . . . . . 49
4.1.1 Introduction des facteurs d'échelle dans la méthode des séries de Taylor en 3D . . . . . 50
4.1.2 Méthode adaptative pour le choix des facteurs d'échelle . . 54
4.2 Résultats de simulation et étude de performance . . . . . 57
4.3 Conclusion . . . . . 70

CHAPITRE 5 CONCLUSION . . . . . 72
5.1 Bilan de la recherche réalisée . . . . . 72

5.2 Améliorations envisageables et travaux futurs . . . . . 73

REFERENCES . . . . . 74

ANNEXES . . . . . 77

# LISTE DES FIGURES


Figure 2.1 Triangulation . . . . . 9

Figure 2.2 Méthode sphérique . . . . . 10

Figure 2.3 Méthode elliptique . . . . . 12

Figure 2.4 Méthode hyperbolique . . . . . 13

Figure 3.1 Localisation du mobile avec deux stations de base . . . . . 24

Figure 3.2 Approximation linéaire de l'équation du AOA . . . . . 26

Figure 3.3 Positions des différentes stations de base considérées . . . . 28

Figure 3.4 Étude comparative des performances des méthodes hyperbolique et hybride pour $\sigma_t = 100m$, $\sigma_\beta = 1$ degré, $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et $M = 4$ . . . . . 34

Figure 3.5 Étude comparative des performances des méthodes hyperbolique et hybride pour $\sigma_t = 200m$, $\sigma_\beta = 1$ degré, $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et $M = 4$ . . . . . 35

Figure 3.6 Étude comparative des performances des méthodes hyperbolique et hybride pour $\sigma_t = 400m$, $\sigma_\beta = 1$ degré, $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et $M = 4$ . . . . . 36

Figure 3.7 Amélioration des performances des systèmes hyperboliques par les systèmes hybrides avec différents bruits angulaires, $\sigma_t = 200m$, $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et $M = 4$ . . . . . 37

Figure 3.8 Étude comparative des performances des méthodes hyperbolique et hybride pour $\sigma_t = 100m$, $\sigma_\beta = 0.5$ degré, $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et $M = 4$ . . . . . 38

Figure 3.9 Effet de l'ajout d'une mesure d'angle supplémentaire sur les systèmes hybrides . . . . . 39

Figure 3.10 Étude des effets de la proximité mobile-station de base sur la performance du système hyperbolique . . . . . 40

Figure 3.11 Génération de positions aléatoires du mobile proches de la station de base $BS_1$ . . . . . 42
Figure 3.12 Valeurs des bornes de Cramér Rao générées par la méthode hyperbolique pour une variance de l'erreur $\sigma_t = 50m$ avec $M = 3$ . . . . . 43
Figure 3.13 Valeurs des bornes de Cramér Rao générées par la méthode hyperbolique pour une variance de l'erreur $\sigma_t = 50m$ avec 4 stations de base . . . . . 44
Figure 3.14 Erreur quadratique moyenne générée par la localisation du mobile initialement à la position $c$ avec la méthode hyperbolique pour différentes valeurs de $\sigma_t$ . . . . . 46
Figure 4.1 Modélisation de la méthode des facteurs d'échelle . . . . . 55
Figure 4.2 Ajustement des facteurs d'échelle . . . . . 57
Figure 4.3 Résultats de l'erreur quadratique moyenne dans le cas de la méthode d'introduction des facteurs d'échelle en 3D pour $(x_0, y_0, z_0) = (3km, 3km, 27m)$, $\sigma_t = 200m$ et $M = 4$ . . . . 59
Figure 4.4 Erreurs quadratiques générées par le système basé sur les facteurs d'échelle en 3D pour les variances $\sigma_t = 200m, 100m, 50m, 10m$ et $5m$, avec $(x_0, y_0, z_0) = (3km, 3km, 27m)$ et $M = 4$ . . . . 60
Figure 4.5 Localisation de la source initialement à la position $(x_0, y_0, z_0) = (5km, 2km, 100m)$ grâce au système tridimensionnel basé sur l'introduction des facteurs d'échelle optimisés pour les variances $\sigma_t = 200m, 100m, 50m, 10m$ et $5m$ avec $M = 4$ . . . . 63
Figure 4.6 Localisation en 2D du mobile initialement à la position $(x_0, y_0, z_0) = (5km, 2km, 100m)$ avec $M = 4$ et $\sigma_t = 200m$ en utilisant les méthodes bidimensionnelle et tridimensionnelle . . . . . 65

Figure 4.7 Comparaison de la proximité MSE/CRLB entre les méthodes de localisation en 2D et en 3D pour un mobile initialement à la position $(3km, 3km, 27m)$ avec $M = 4$ et $\sigma_t = 50m$ . . . 67
Figure 4.8 Zoom sur la figure 4.7 . . . . . 68
Figure 4.9 Erreurs quadratiques de l'estimation de la composante $z$ pour un mobile initialement à la position $(3km, 3km, 27m)$ avec $M = 4$ et $\sigma_t = 200m$ . . . . . 69
Figure 4.10 Erreurs quadratiques de l'estimation de la composante $z$ pour un mobile initialement à la position $(5km, 2km, 100m)$ avec $M = 4$ et $\sigma_t = 200m$ . . . . . 70
Figure I.1 Utilisation de la méthode hyperbolique pour la localisation du mobile avec $M = 4$, $(x_0, y_0) = (5, 2)km$ et *noise-var*$= 0.1km$ 79
Figure I.2 Comparaison des méthodes hyperbolique et hybride pour la localisation du mobile avec $M = 4$, $(x_0, y_0) = (5, 2)km$, *noise-var*$= 0.1km$ et $varb = 0.017453rad$ . . . . . 81
Figure I.3 Erreurs de positionnement du mobile en 3D pour un mobile initialement à la position $(x_0, y_0, z_0) = (3, 3, 0.027)km$ avec *noise-var*$= 50m$ et $M = 4$ . . . . . 84

# LISTE DES TABLEAUX


Tableau 3.1 Comparaison de l'erreur quadratique moyenne au CRLB dans le cas des méthodes hyperboliques pour une source située à la position $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et pour une variance d'erreur $\sigma_t = 100m$ . . . . . 32

Tableau 3.2 Comparaison de l'erreur quadratique moyenne au CRLB dans le cas des systèmes hybrides basés sur les TDOA et les AOA pour un mobile situé à la position $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et pour des variances d'erreur $\sigma_t = 100m$ et $\sigma_\beta = 1$ degré . . . . . 32

Tableau 3.3 Évaluation des estimateurs en fonction de la proximité mobile-station de base pour $\sigma_t = 200m$ . . . . . 41

Tableau 4.1 Coordonnées des différentes stations de base utilisées (en km) 58

Tableau 4.2 Exemple de recherche des facteurs d'échelle adéquats pour la localisation du mobile initialement à la position $(3km, 3km, 27m)$ avec $M = 4$ et $\sigma_t = 200m$ . . . . . 58

Tableau 4.3 Recherche des facteurs d'échelle adéquats pour la localisation du mobile initialement à la position $(5km, 2km, 100m)$ avec 4 stations de base et $\sigma_t = 200m$ . . . . . 61

Tableau 4.4 Recherche des facteurs d'échelle adéquats pour la localisation du mobile initialement à la position $(5km, 2km, 100m)$ avec 4 stations de base et $\sigma_t = 50m$ . . . . . 61

Tableau 4.5 Recherche optimisée des facteurs d'échelle adéquats pour la localisation du mobile initialement à la position $(5km, 2km, 100m)$ avec 4 stations de base et $\sigma_t = 50m$ . . . . . 62

Tableau 4.6 Recherche des facteurs d'échelle optimisés pour la localisation du mobile initialement à la position $(8km, 4.75km, 100m)$, proche d'une station de base avec $M = 4$ et $\sigma_t = 100m$ . . . 64

# LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I GUIDE D'UTILISATION DU SIMULATEUR . . . . . 77
I.1 La fonction *tdoa-taylor* . . . . . 77
I.1.1 Paramètres d'entrée . . . . . 77
I.1.2 Paramètres de sortie . . . . . 78
I.1.3 Exemple de simulation . . . . . 78
I.2 La fonction *tdoa-aoa-taylor* . . . . . 79
I.2.1 Paramètres d'entrée . . . . . 79
I.2.2 Paramètres de sortie . . . . . 80
I.2.3 Exemple de simulation . . . . . 80
I.3 La fonction *best-weight* . . . . . 81
I.3.1 Paramètres d'entrée . . . . . 82
I.3.2 Paramètres de sortie . . . . . 82
I.3.3 Exemple de simulation . . . . . 83

# LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

| | |
|---|---|
| GPS | Global Positioning System |
| DGPS | Differential Global Positioning System |
| TIDGET | Tracknig Widget |
| GLONASS | Global Navigation Satellite System |
| AOA | Angle Of Arrival |
| DOA | Direction Of Arrival |
| TOA | Time Of Arrival |
| TDOA | Time Difference Of Arrival |
| UWB | Ultra Wide Band |
| STI | Systèmes de Transports Intelligents |
| 2D | Dimension 2 |
| 3D | Dimension 3 |
| RMS | Root Mean Square Error |
| MSE | Mean Square Error |
| CRLB | Cramér Rao Lower Bound |
| LOS | Line Of Sight |
| NLOS | Non Line Of Sight |

# CHAPITRE 1

# INTRODUCTION

## 1.1 Motivations

La localisation en extérieur dans les réseaux sans fil a reçu une attention considérable au cours des dernières années. La fonction principale d'un système de localisation consiste à collecter des informations pour déterminer la position d'une station mobile. Le traitement de cet ensemble de données fournit une estimation de la position du mobile. L'une des approches les plus populaires est la radiolocalisation. Des signaux radio se propagent entre une station mobile considérée comme source et un ensemble de stations réceptrices fixes. Le traitement des données collectées fournit une estimée de la position recherchée. Dans ce contexte, plusieurs systèmes de localisation ont vu le jour. On distingue les systèmes satellitaires d'une part tels que le système GPS (Global Positioning System) par exemple. Les systèmes terrestres, d'autre part, se basent sur des technologies cellulaires. Tous ces systèmes ont recours à des méthodes de positionnement. Chaque méthode vise à localiser le mobile en traitant un ensemble de mesures. Le choix de ce type de mesures varie selon leur complexité et leur performance pour le positionnement. Certaines méthodes traitent des mesures de retards de transmission des signaux à partir de la source mobile aux stations de base. D'autres se basent sur les mesures des angles d'arrivée de ces signaux. Une utilisation de différents types de mesures dans un même système est également envisageable formant ainsi des méthodes de positionnement dites hybrides, pouvant améliorer la précision de la localisation de la source. Cette localisation est généralement réalisée en deux dimensions. Cependant, de nos jours, il est important de pouvoir aussi positionner le mobile dans

l'espace tridimensionnel. Dans le cadre des services d'appels d'urgence par exemple, il est fondamental de savoir à quel étage d'un bâtiment se situe l'utilisateur du mobile. Ainsi, la localisation bidimensionnelle ne suffit plus pour répondre de manière efficace à ce type de services. Cependant, l'ordre de grandeur des altitudes des stations de base ou d'un mobile en hauteur peuvent être négligeables par rapport aux distances séparant les stations réceptrices. Dans ce cas, l'effet des erreurs de mesure des retards de transmission des signaux se propageant entre la station de base et le mobile devient trop important pour aboutir à une précision acceptable afin d'estimer l'altitude de la source. Pour relever ce défi et remédier à cet inconvénient, nous proposons dans ce mémoire une méthode de positionnement tridimensionnelle introduisant des facteurs d'échelle permettant d'équilibrer l'effet de ces erreurs suivant les trois dimensions.

## 1.2 Contributions

Les contributions que présente ce travail de recherche peuvent se résumer en ce qui suit:

- Conception d'un simulateur permettant de localiser une station mobile en utilisant deux méthodes bidimensionnelles et une méthode tridimensionnelle à l'aide du logiciel de simulation Matlab.
- Étude de l'effet de la proximité station mobile-station de base sur la précision de la localisation de la source dans le cadre des méthodes bidimensionnelles.
- Proposition d'une méthode de localisation tridimensionnelle basée sur des facteurs d'échelle et élaboration d'une méthode adaptative pour le choix de ces facteurs dans le but de maximiser la précision de la localisation du mobile.

- Analyse de performance de la méthode tridimensionnelle et comparaison de sa précision par rapport aux méthodes bidimensionnelles pour localiser un mobile en deux dimensions.

## 1.3 Organisation du mémoire

Ce mémoire comprend quatre chapitres. À la suite du présent chapitre introductif, ce travail est subdivisé de la façon suivante:

- Le deuxième chapitre présente une revue de littérature des systèmes de radiolocalisation existants les plus populaires. Plus particulièrement, une classification des méthodes de géolocalisation cellulaire est exposée. D'autres classifications sont brièvement présentées également.

- Le troisième chapitre présente de façon plus approfondie deux méthodes de géolocalisation cellulaire en deux dimensions: les systèmes hyperboliques basés sur les retards de transmission des signaux et les systèmes hybrides basés sur ces retards et sur les angles d'arrivée des signaux. Une analyse de la performance de ces estimateurs est étudiée à l'aide d'un ensemble de résultats de simulations.

- Le quatrième chapitre propose une méthode tridimensionnelle introduisant des facteurs d'échelle. Une technique adaptative pour le choix de ces facteurs est également exposée. Des résultats de simulation sont présentés par la suite permettant d'illustrer la méthode et d'étudier la performance de l'estimateur.

- Finalement, le cinquième chapitre résume l'ensemble des travaux présentés et expose quelques idées envisageables pour des travaux futurs.

# CHAPITRE 2

# TECHNIQUES DE LOCALISATION EN EXTÉRIEUR

Nous présentons dans ce chapitre les systèmes de radiolocalisation existants les plus populaires. Nous nous intéresserons dans ce travail plus particulièrement aux systèmes de géolocalisation cellulaires. Plusieurs classifications de ces systèmes sont disponibles dans la littérature. Nous en présenterons les principales d'entre elles et nous en détaillerons une qui nous permettra d'étudier deux méthodes en particulier dans le chapitre suivant. Le choix de ces deux méthodes sera expliqué tout au long de ce chapitre.

## 2.1 Revue des systèmes de radiolocalisation existants

Une revue des systèmes de radiolocalisation sans fil en extérieur les plus populaires est présentée dans cette section. De façon générale, ces systèmes peuvent être classés en deux catégories: les systèmes satellitaires [1] et les systèmes terrestres. L'évolution de ces systèmes a été progressive au fil des années. Le système Loran C peut être considéré comme l'un des premiers systèmes qui ait été implémenté pratiquement avant l'apparition des technologies satellitaires.

### 2.1.1 Loran C

Il a été développé dans les années cinquante par le département de la défense Américaine. C'est un système qui transmet des impulsions dans la bande de fréquence 90-110 kHz, faisant partie des ondes longues. Il utilise une méthode

dite hyperbolique basée sur la triangulation [2]. Une station maîtresse transmet une série d'impulsions synchronisées sur une fréquence porteuse de 100 kHz. Des stations esclaves transmettent une série d'impulsions identiques à des intervalles prédéterminés. La différence des retards de transmission de ces signaux définit une ligne de position hyperbolique dont les foyers sont les stations émettrices [3]. L'intersection de deux lignes de position permet de localiser le mobile recherché. C'est un système qui a été appliqué essentiellement dans le domaine de la radio-navigation pour localiser des véhicules terrestres ou maritimes. Sa précision est d'une centaine de mètres. Cependant, son bon fonctionnement dépend du calibrage local et de la topographie étant donné que la propagation se fait le long de la surface de la terre. Ce système a été sujet à plusieurs améliorations au fil des années jusqu'à son remplacement par le système GPS dans la plupart des applications.

### 2.1.2 Systèmes satellitaires

Le système GPS est le système d'aide radio le plus populaire dans le domaine de la navigation. Il doit son succès à sa haute précision, sa couverture mondiale et son coût assez raisonnable. Pour les systèmes de transport intelligents (STI), il est souvent rattaché à un système de communication sans fil pour acheminer l'information de localisation à des réseaux téléphoniques publics commutés ou à des points de réponse au niveau de la sécurité publique.

C'est un système qui est composé d'un ensemble de satellites et de récepteurs GPS [4]. Le principe de son fonctionnement est relativement simple: un récepteur GPS capte des signaux provenant des différents satellites et en mesurant les écarts relatifs entre l'horloge du récepteur lui même et celles des satellites, il est capable d'évaluer sa distance par rapport à ces satellites. Les positions de ces derniers lui étant transmises régulièrement, le récepteur peut ainsi déterminer sa propre position grâce à la technique de triangulation. En théorie, trois satellites suffisent pour

une localisation en 3D. Cependant, il est difficile de synchroniser parfaitement les horloges des satellites et celle du récepteur. C'est pour cette raison qu'en pratique, un quatrième satellite est nécessaire afin de déterminer non seulement la position du récepteur en trois dimensions mais aussi le décalage de l'horloge du récepteur par rapport à celles des satellites, permettant ainsi de compenser le manque de précision. La position du récepteur est retrouvée grâce à l'intersection des trois sphères décrivant le temps écoulé par chacun des signaux émis par le satellite. Ainsi, les coordonnées du récepteur sont fournies en longitude, latitude et altitude. Une précision de 20 m peut être atteinte grâce au système GPS. Une amélioration a été fournie pour des fins militaires avec les systèmes différentiels DGPS, en ayant recours à un signal de référence additionnel transmis à partir d'un emplacement connu, réduisant ainsi des erreurs au niveau du GPS standard et fournissant une précision de quelques mètres.

Au fur et à mesure, d'autres systèmes ont vu le jour dans le même principe tels que le TIDGET [5] qui transmet l'information via des systèmes radio cellulaires à une station de relais où la localisation du récepteur est déterminée. Une base de données géographiques peut être intégrée au système pour la localisation du récepteur avec trois satellites uniquement. Ce système a été conçu comme gadget de véhicules automobiles pour répondre à des situations d'urgence au niveau des autoroutes par exemple. Il s'agit d'un récepteur GPS qui se contentera de transmettre un bref aperçu des données au service de secours où elles seront traitées afin de calculer la position de l'automobiliste.

Nous pouvons également citer le système de navigation globale satellitaire nommé GLONASS [6] qui a été conçu par le gouvernement Russe pour fournir un système similaire au GPS, utilisant le même principe mais de période de synchronisation plus courte, soit le tiers de celle du GPS.

Parmi tous ces systèmes, le système GPS est bel et bien le système de localisation le plus connu. Cependant, son utilisation au niveau de la radiolocalisation

cellulaire reste limitée: même si le GPS est capable d'atteindre des niveaux de précision intéressants dans les milieux externes, il reste néanmoins limité dans les milieux urbains ou à forte densité, et à l'intérieur des bâtiments [7]. Dans le cas de la géolocalisation cellulaire, les gros bâtiments et les forêts denses empêchent complètement l'opérabilité du GPS. D'où la nécessité du positionnement en utilisant l'infrastructure cellulaire terrestre déjà existante dans ce cas. Aussi peut-on ajouter que l'utilisation du système GPS pour la localisation d'un mobile nécessite forcément que ce dernier soit équipé d'un récepteur GPS également, ce qui risque d'augmenter considérablement le coût, la taille, le poids et la consommation énergétique du mobile dans ce type de configuration.

### 2.1.3 Systèmes terrestres : Géolocalisation cellulaire

Le géolocalisation cellulaire se base sur l'infrastructure des stations de base cellulaires existantes. La position des mobiles qui transmettent dans la bande de fréquence cellulaire standard est estimée. Dans ce contexte, plusieurs applications ont été développées telles que le système d'urgence E-911 par exemple. La plupart des appels d'urgence se font à partir de téléphones cellulaires et dans une grande partie des cas, une localisation assez précise de ces stations mobiles est nécessaire. D'autres applications telles que la détection d'incidents, de fraudes, la gestion de parcs de véhicules dans le domaine des transports ont été implémentées. La gestion des réseaux sans fils a permis également d'établir un suivi des téléphones cellulaires standard. Ainsi, les fournisseurs de service peuvent utiliser la géolocalisation pour déterminer avec précision les besoins en terme de capacité pour une région bien déterminée et peuvent adapter le réseau en conséquence. L'équipement nécessaire à la localisation se trouve au niveau des stations de base pour collecter les statistiques d'usage du téléphone et pour localiser les stations mobiles. Plusieurs stations de base reçoivent le signal mobile et la position est déterminée en combinant plusieurs

données telles que les angles d'arrivée estimés à chaque station de base ainsi que les temps d'arrivée des signaux au niveau de ces stations ou, en d'autres termes, les retards de transmission. Ces différents paramètres permettent de distinguer plusieurs méthodes de localisation. Une revue de littérature de ces méthodes est fournie dans la section suivante.

## 2.2 Classification des systèmes de géolocalisation cellulaire

Plusieurs classifications des systèmes cellulaires de radiolocalisation en extérieur sont fournies dans la littérature. Certaines se basent sur le type d'information collectée pour déterminer la position du mobile. Dans ce contexte, on observe deux catégories principales: la première se base sur la collecte d'information de direction, la deuxième se base sur les retards de transmission des signaux. Tous ces systèmes peuvent être utilisés individuellement ou combinés de sorte à former différentes techniques de localisation dites hybrides.

### 2.2.1 Méthode basée sur les mesures d'angles

Les systèmes basés sur la direction estiment la position de la source mobile en mesurant l'angle d'arrivée ou la direction d'arrivée du signal à la station de base (AOA: Angle Of Arrival ou DOA: direction of arrival). Les valeurs de ces angles sont estimées grâce à une série d'algorithmes plus connus sous les noms de Music et Esprit [8]. L'utilisation de plusieurs mesures d'angles d'arrivée simultanément à partir de plusieurs stations de base permet l'utilisation de la méthode de triangulation. Ainsi une estimation de la localisation de la source est déterminée grâce à l'intersection des lignes définissant les angles d'arrivée obtenus. En théorie, deux stations de base suffisent pour localiser la source (figure 2.1). Mais en pratique,

l'utilisation de plus que deux stations de base s'avère nécessaire pour remédier aux problèmes de bruit et de multi-trajets afin de satisfaire les exigences au niveau de la précision. Une seule petite erreur de mesure risque de fausser considérablement les résultats du positionnement dans le cas de vue directe entre le mobile et les stations de base (LOS: line of sight). Bien que cette méthode semble être capable de donner des résultats assez satisfaisants si les conditions nécessaires sont fournies, certains inconvénients peuvent être notés. Les techniques d'estimation des angles d'arrivée se basent sur le signal reçu le plus puissant et il est supposé être en visibilité directe à partir de la source. Cependant, en pratique, le signal subira plusieurs déviations dans un environnement urbain dense (NLOS: non line of sight), ce qui risque d'erroner considérablement les résultats de l'estimateur.

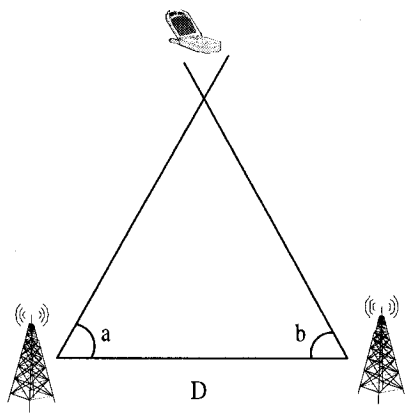



Figure 2.1 Triangulation

C'est pour cette raison que les systèmes les plus utilisés dans ce contexte se basent sur les retards de transmission.

### 2.2.2 Méthodes basées sur les retards de transmission

Ces systèmes peuvent être classés selon la géométrie qu'ils identifient pour le positionnement [8]. Ainsi, trois différentes techniques peuvent être distinguées : les systèmes de positionnement sphériques, elliptiques et hyperboliques.

#### 2.2.2.1 Les systèmes de positionnement sphériques (cas du système GPS)

Ces systèmes se basent sur la mesure du retard de transmission T du signal (TOA: Time Of Arrival) à partir de la source mobile au récepteur. Ainsi, la distance parcourue par l'onde propagée est donnée par l'expression:

$$R = cT, \tag{2.1}$$

$c$ représentant la célérité de la lumière. Le temps de vol du signal entre la station mobile et la station de base réceptrice est estimé. Cette estimation définit une sphère autour du récepteur. Plusieurs mesures de retards de transmission par rapport à d'autres stations de base forment alors plusieurs sphères dont l'intersection fournit la position du mobile (figure 2.2).

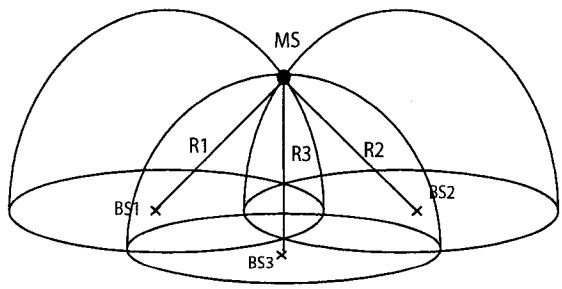



Figure 2.2 Méthode sphérique

Si les mesures manquent de précision, une estimée fournie par une station de base additionnelle pourrait éventuellement améliorer la précision de la position. Pour illustrer le concept, nous considérons un système de localisation dans un espace tridimensionnel utilisant un nombre $M$ de stations de base. Ainsi, le temps d'arrivée du signal à chaque récepteur est déterminé par l'équation :

$$R_i = cT_i. \tag{2.2}$$

$R_i$ représente la distance entre la station de base i et la source. Elle est donnée par:

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2}, \quad i = 1, ..., M \tag{2.3}$$

où $(X_i, Y_i, Z_i)$ sont les coordonnées de la station de base et $(x, y, z)$ sont celles de la source mobile.

Pour un nombre de stations de base minimal égal à 3, nous obtenons un système de trois équations à trois inconnues $x$, $y$ et $z$ qui a pour unique solution la position du mobile. Pour un nombre de stations de base supérieur à 3, un critère d'erreur et des techniques itératives doivent être utilisés pour déterminer une solution.
Certains inconvénients peuvent être notés également dans cette méthode: les erreurs qui s'ajoutent à l'estimation du temps d'arrivée des signaux aux différents récepteurs ne peuvent être traitées avant d'estimer la position de la source. Une synchronisation avec le mobile au niveau des stations de base s'avère également nécessaire pour ce type de système.

#### 2.2.2.2 Les systèmes de positionnement elliptiques

Ces systèmes mesurent la somme $T_{i,j}$ des temps d'arrivée des signaux de la source vers deux stations de base. Ainsi, cette estimation définit géométriquement un

ellipsoïde ayant pour foyers les deux stations de base et qui est donné par la formule:

$$R_{i,j} = cT_{i,j} = R_i + R_j \tag{2.4}$$

Ainsi, dans un espace tridimensionnel:

$$R_{i,j} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} + \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2 + (Z_j - z)^2} \tag{2.5}$$

où $(X_i, Y_i, Z_i)$ et $(X_j, Y_j, Z_j)$ représentent les coordonnées des récepteurs $i$ et $j$ et $(x, y, z)$ les coordonnées de la source.

Si plusieurs valeurs des sommes des temps d'arrivée sont fournies, la position de la station mobile se trouve à l'intersection des ellipsoïdes obtenus (figure 2.3).

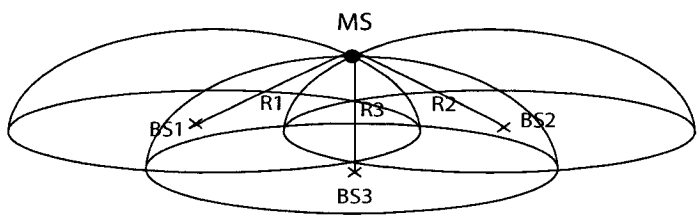



Figure 2.3 Méthode elliptique

Un minimum de trois stations de base est nécessaire pour aboutir à une estimation. Des données supplémentaires fournies par une quatrième station de base pourraient éventuellement améliorer les résultats estimés. Cependant, en pratique, mis à part le fait que la synchronisation avec le mobile au niveau des récepteurs n'est plus nécessaire, ce type de système n'améliore pas de façon très considérable les résultats fournis par les autres méthodes qui se basent sur le traitement des retards de transmission [9] [10].

#### 2.2.2.3 Les systèmes de positionnement hyperboliques

Ces systèmes mesurent la différence des retards de transmission (TDOA: Time Difference Of Arrival) du signal entre la station mobile et deux stations de base. La relation entre la différence de ces retards et la différence des distances parcourues par les ondes correspondantes est donnée par :

$$R_{i,j} = cT_{i,j} = R_i - R_j \tag{2.6}$$

Ainsi, chaque mesure définit un hyperboloïde dont les foyers sont représentés par les deux stations de base réceptrices. Cette géométrie est donnée, en trois dimensions (3D), par la relation:

$$R_{i,j} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} - \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2 + (Z_j - z)^2} \tag{2.7}$$

La collecte de plusieurs mesures définit plusieurs hyperboloïdes dont l'intersection fournit la position de la source recherchée (figure 2.4).

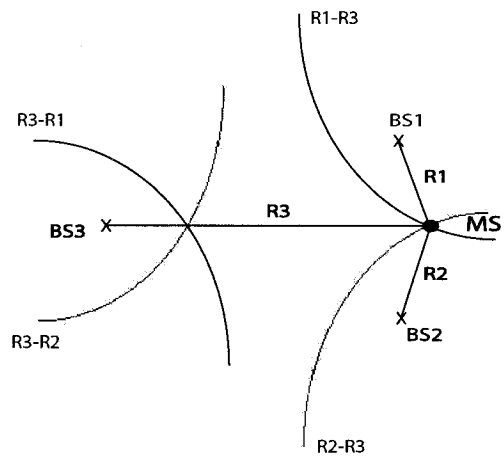



Figure 2.4 Méthode hyperbolique

Dans un espace tridimensionnel, au minimum trois stations de base doivent fournir des mesures de retards de transmission pour estimer la position du mobile. Une station réceptrice additionnelle pourrait améliorer les résultats avec un recours à des critères de minimisation d'erreurs pour optimiser la solution. Grâce à cette méthode, une synchronisation avec le mobile n'est plus obligatoire au niveau des stations de base. Aussi est-il nécessaire de préciser que contrairement aux méthodes précédentes, la localisation hyperbolique est capable de réduire les erreurs accumulées au niveau des récepteurs à cause du canal. Elle présente également de meilleures estimations de la position du mobile lorsque la distance entre ce dernier et les stations de base augmente puisque l'intersection des hyperboloïdes générés se fait plus en un seul point, qui n'est autre que la position recherchée. Cependant, l'augmentation de cette distance peut affecter la précision des résultats obtenus. Nous en convenons alors que la variation de cette distance peut être bénéfique ou pas, dépendamment du compromis le plus intéressant lors de l'utilisation d'un système donné.

Les systèmes hyperboliques et les systèmes à mesure d'angles sont les deux systèmes les plus utilisés pour la géolocalisation terrestre. Les systèmes à mesure d'angles exploitent les différences de phase entre les éléments d'antennes étroitement espacés et utilisent des méthodes d'alignement de phase pour estimer la direction d'arrivée du signal provenant du mobile, tandis que les systèmes hyperboliques traitent les différences des retards d'arrivée du signal à différentes stations de base. G. A. Mizusawa a comparé ces deux systèmes dans sa thèse [9] et le choix entre ces deux méthodes se résume entre des systèmes basés sur les mesures d'angles qui sont complexes mais assez performants et des systèmes beaucoup plus simples basés sur les TDOA mais qui nécessitent des stations de base assez éloignées. C'est pour cette raison que dans notre projet, nous nous intéressons essentiellement aux systèmes hyperboliques et aux systèmes hybrides basés sur les TDOA et les AOA afin d'améliorer les résultats de localisation pouvant être fournis par une seule de

ces deux techniques.

### 2.2.3 Autres critères de classification utilisés

Les systèmes de radiolocalisation peuvent être classés également selon le nombre de stations de base nécessaires pour déterminer la position du mobile. Les systèmes de localisation multilatéraux sont ceux qui nécessitent quatre stations de base ou plus pour estimer la position de la source en trois dimensions. Les systèmes de localisation trilatéraux fournissent des mesures à partir de trois stations de base pour déterminer la position de la station mobile en deux dimensions.

Une autre classification peut se faire également selon les fréquences opérationnelles des systèmes de positionnement [11]. La valeur de la fréquence indique généralement la précision avec laquelle le positionnement est effectué. Plus la fréquence du système de positionnement est élevée plus la position de la station mobile sera précise. Ainsi, nous distinguons:

**Les systèmes de positionnement à basse fréquence:** Ils sont utilisés généralement pour résoudre les problèmes de navigation à longue portée. Un calibrage au niveau des appareillages est nécessaire si un certain niveau de précision veut être atteint.

**Les systèmes de positionnement à moyenne fréquence:** Nous trouvons dans cette bande de fréquence les systèmes qui opèrent avec les différences de phases et qui requièrent aussi un calibrage et un contrôle continu.

**Les systèmes de positionnement à très haute fréquence:** Les micro-ondes et les transmissions en bande ultra large (UWB: Ultra Wide Band) sont généralement utilisées pour des distances limitées à une centaine de mètres entre la source et les récepteurs et peuvent atteindre un niveau de précision élevé. L'application type de ce domaine de fréquence est la localisation et le suivi de personnes ou d'objets à l'intérieur des bâtiments par exemple, ou plus généralement pour la localisation en intérieur.

# CHAPITRE 3

# TECHNIQUES DE RADIOLOCALISATION EN EXTÉRIEUR DANS L'ESPACE BIDIMENSIONNEL

Dans ce travail, nous nous intéressons essentiellement aux deux techniques de radiolocalisation formées par les systèmes hyperboliques et les systèmes hybrides utilisant les différences des retards d'arrivée (TDOA) et les angles d'arrivée (AOA) des signaux. Dans ce chapitre, nous présentons et étudions les modèles d'estimation en deux dimensions (2D). Des résultats de simulations sont également présentés afin d'évaluer la performance de ces estimateurs. Les stations de base seront supposées en ligne de vue directe avec le mobile tout au long de ce travail de recherche.

## 3.1 Systèmes hyperboliques

Pour un nombre M de stations de base dans un environnement 2D, le signal observé au niveau de la station de base $i$ est donné par:

$$u_i(t) = s(t - t_i) + n_i(t), \tag{3.1}$$

$s(t)$ est le signal envoyé par la source, $t_i$ représente le retard de transmission associé à la station de base $i$ et $n_i(t)$ le bruit additif. Le signal et le bruit sont supposés gaussiens, indépendants et de moyenne nulle. Pour localiser la source, la technique consiste à estimer le TDOA du signal reçu par chaque station $i$ par rapport à une station de base de référence [12] [13]. Nous noterons par $t_{i,1}$ les différences des retards de transmission du signal reçu aux stations de base $i$ et 1, la station de

base 1 étant choisie arbitrairement comme référence. En présence d'un bruit additif gaussien, ces retards sont exprimés par:

$$t_{i,1} = t^0_{i,1} + n_{i,1} \tag{3.2}$$

Si $(x, y)$ est la position du mobile et $(x_i, y_i)$ représentent les coordonnées de la station de base $i$, alors la distance $r_i$ entre le mobile et la station de base $i$ est donnée par la relation:

$$r_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 \tag{3.3}$$

avec $K_i^2 = x_i^2 + y_i^2$. Si $c$ représente la vitesse de propagation du signal alors

$$r_{i,1} = ct_{i,1} = c(t^0_{i,1} + n_{i,1}) = r_i - r_1 + cn_{i,1} \tag{3.4}$$

Ainsi, en tenant compte du bruit, nous obtenons un ensemble de $M - 1$ équations non linéaires ayant pour solution $(x, y)$. Ces équations sont données par:

$$t_{i,1} = \frac{r_i - r_1}{c} + n_{i.1}, i = 2...M. \tag{3.5}$$

Pour résoudre ce système, nous pouvons le présenter sous la forme d'un modèle d'estimation ayant pour inconnue $\theta = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$. Ce modèle est donné par les équations suivantes:

$$m_i = f_i(\theta) + n_i, \tag{3.6}$$

avec $i = 2...M$, $M$ étant le nombre de mesures fournies par les $M$ stations de base.

Ainsi,

$$\begin{cases} m_i = t_{i,1} \\ f_i(\theta) = \frac{r_i - r_1}{c} \\ n_i = n_{i,1} \end{cases}$$

Nous supposerons que $n_i$ est un bruit gaussien de moyenne nulle et de variance $\sigma_{t_i}$ et que ces erreurs de mesure sont également indépendantes [14].

Pour un modèle d'estimation plus général et pour les $M$ stations de base, nous considérerons l'équation suivante:

$$m = f(\theta) + n \tag{3.7}$$

où:

$$m = \begin{pmatrix} m_2 \\ . \\ . \\ . \\ . \\ m_M \end{pmatrix}, f(\theta) = \begin{pmatrix} f_2(\theta) \\ . \\ . \\ . \\ . \\ f_M(\theta) \end{pmatrix}, n = \begin{pmatrix} n_2 \\ . \\ . \\ . \\ . \\ n_M \end{pmatrix}.$$

$n$ est un vecteur de variable aléatoires de matrice de covariance donnée par:

$$\psi = E[(n - E(n))(n - E(n))^T] \tag{3.8}$$

L'estimateur de maximum de vraisemblance vise à minimiser:

$$Q(\theta) = [m - f(\theta)]^T \psi^{-1} [m - f(\theta)] \tag{3.9}$$

Si $f(\theta)$ est une fonction linéaire alors $f(\theta) = G\theta$, avec $G$ une matrice constante. Ainsi,

$$Q(\theta) = (m^T\psi^{-1}m) - (m^T\psi^{-1}G\theta) - (\theta^T G^T\psi^{-1}m) + (\theta^T G^T\psi^{-1}G\theta). \tag{3.10}$$

Le but étant de minimiser $Q(\theta)$, ils suffit de résoudre l'équation:

$$\frac{dQ(\theta)}{d\theta} = 0 \tag{3.11}$$

Nous obtenons alors:

$$(G^T\psi^{-1}m)^T + (G^T\psi^{-1}m) = (G^T\psi^{-1}G\theta) + (G^T\psi^{-1}G\theta)^T \tag{3.12}$$

Une solution optimale serait:

$$G^T\psi^{-1}m = G^T\psi^{-1}G\theta \tag{3.13}$$

D'où une solution à maximum de vraisemblance peut être donnée par:

$$\theta = (G^T\psi^{-1}G)^{-1}G^T\psi^{-1}m \tag{3.14}$$

Si $f(\theta)$ est non linéaire, un recours à des méthodes de linéarisation s'avère nécessaire. Dans ce travail, nous utiliserons la méthode dite des séries de Taylor.

### 3.1.1 Méthode de linéarisation des séries de Taylor

La méthode de linéarisation par les séries de Taylor [15] [16] est une méthode qui sert à résoudre un ensemble d'équations non linéaires. Elle considère au début grossièrement une solution initiale au problème étudié, puis elle améliore cette

solution au cours de plusieurs étapes en déterminant les erreurs ou les déviations par rapport à cette valeur initiale par la méthode des moindres carrés.

Dans notre cas, nous disposons d'un ensemble d'estimations des TDOA $t_{i,j}$. La méthode des séries de Taylor considère la position initiale du mobile $\theta_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}$. Le choix de cette position sera explicité ultérieurement. $f(\theta)$ sera linéarisée autour de $\theta_0$. En retenant uniquement les deux premiers termes, nous obtenons:

$$f(\theta) \approx f(\theta_0) + G(\theta - \theta_0) \tag{3.15}$$

avec:

$$G = \begin{pmatrix} \frac{df_1}{dx} & \frac{df_1}{dy} \\ . & . \\ . & . \\ . & . \\ . & . \\ \frac{df_M}{dx} & \frac{df_M}{dy} \end{pmatrix}_{\theta_0}, M \geq 4$$

Si nous supposons que la matrice $G^T \psi^{-1} G$ est inversible, alors une estimation à maximum de vraisemblance peut être donnée par:

$$\theta = \theta_0 + (G^T \psi^{-1} G)^{-1} G^T \psi^{-1} (m - f(\theta_0)) \tag{3.16}$$

où:

$$G = \frac{1}{c}\begin{pmatrix} \frac{x_2-x}{r_2} - \frac{x_1-x}{r_1} & \frac{y_2-y}{r_2} - \frac{y_1-y}{r_1} \\ \frac{x_3-x}{r_3} - \frac{x_1-x}{r_1} & \frac{y_3-y}{r_3} - \frac{y_1-y}{r_1} \\ \cdot & \\ \cdot & \\ \cdot & \\ \frac{x_N-x}{r_N} - \frac{x_1-x}{r_1} & \frac{y_N-y}{r_N} - \frac{y_1-y}{r_1} \end{pmatrix}, m - f(\theta) = h = \frac{1}{c}\begin{bmatrix} r_{2,1} - (r_2 - r_1) \\ r_{3,1} - (r_3 - r_1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_{M,1} - (r_M - r_1) \end{bmatrix}$$

Les erreurs de mesure des TDOA étant supposées indépendantes et de variances $\sigma_{t_i}^2$, la matrice $\psi$ est donnée par:

$$\psi = \begin{pmatrix} \sigma_{t_2}^2 & 0 & ..... & 0 \\ 0 & \sigma_{t_3}^2 & ..... & 0 \\ & & & \\ & & & \\ 0 & 0 & ..... & \sigma_{t_M}^2 \end{pmatrix},$$

Ainsi, à chaque itération les déviations par rapport à la position initiale $\theta_0$ sont calculées:

$$\begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{bmatrix} = (G^T \psi^{-1} G)^{-1} G^T \psi^{-1} h \tag{3.17}$$

Les valeurs de $r_i$ sont calculées avec $x$ et $y$ initialisées au début à $x = x_0$ et $y = y_0$. Une fois les déviations calculées, elles sont ajoutées à $x_0$ et $y_0$. Ainsi,

$$\begin{cases} x = x_0 + \Delta_x \\ y = y_0 + \Delta_y \end{cases}$$

Le même processus se répète jusqu'à ce que les déviations soient suffisamment faibles.

La méthode des séries de Taylor donne des résultats précis à condition que la position initiale considérée $\theta_0$ soit proche de la vraie valeur initiale. Dans le cas contraire, la convergence de la méthode ne sera pas garantie. Le seul inconvénient que pourrait présenter cette méthode serait le fait qu'il s'agisse d'une approche itérative qui pourrait éventuellement présenter quelques lourdeurs au niveau opératoire lorsque le même processus se répète au cours des simulations. Par contre, de nombreux avantages sont à noter. Grâce à cette méthode, plusieurs mesures sont combinées de manière assez simple dans un même système, facilitant ainsi la résolution du problème. Le nombre d'itérations nécessaires pour aboutir à des résultats stables n'est pas élevé. Il est de l'ordre de 3 ou 4 itérations. Nous en utiliserons 5 pour s'assurer de la stabilité des valeurs des déviations. Aussi peut-on ajouter que les cas de divergence peuvent être détectés facilement et par conséquent nous pouvons éviter de les prendre en compte pour ne pas fausser les résultats obtenus. Ce test de convergence sera explicité dans le chapitre suivant.

**Choix de la position initiale $\theta_0$:** Le choix de cette position peut être obtenu dans le cas où nous disposons de trois stations de base. Dans ce cas de figure, le problème considéré a pour unique solution:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} r_{2,1} \\ r_{3,1} \end{bmatrix} r_1 + 1/2 \begin{bmatrix} r_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \tag{3.18}$$

Cette solution est obtenue en combinant une équation en $r_1$ avec l'équation (3.3), puis en la remplaçant dans l'équation (3.18). Ainsi, les valeurs de $x_0$ et $y_0$ sont fixées.

## 3.2 Technique hybride basée sur les TDOA et les AOA

Cette méthode, dite hybride, tient compte des informations de retard de transmission et d'angles d'arrivée des signaux au niveau des stations de base. Les erreurs de mesure des TDOA et des AOA seront supposées gaussiennes, indépendantes, de moyennes nulles et de variances respectives $\sigma_t$ et $\sigma_\beta$ connues. En théorie, deux stations de base suffisent pour pouvoir localiser la source (figure 3.1).

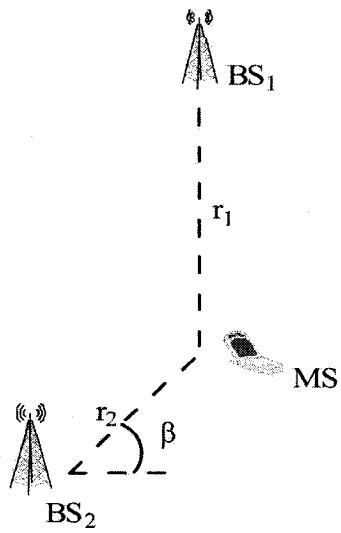



Figure 3.1 Localisation du mobile avec deux stations de base

La différence des retards de transmission entre les deux stations de base et l'angle $\beta$ d'arrivée du signal à la station $BS_1$ sont notés par [14]:

$$t_{2,1} = \frac{r_2 - r_1}{c} \tag{3.19}$$

et

$$\tan\beta = \frac{y - y_1}{x - x_1}; \tag{3.20}$$

$\beta$ étant compris dans l'intervalle $[0, \pi]$.

En réalité, les mesures de TDOA et de AOA dans ce cas contiennent des erreurs qui peuvent empêcher d'aboutir à de bonnes estimations. Un minimum de 3 stations de base est donc requis pour obtenir des résultats satisfaisants. Ainsi, pour $i = 1, 2, ..., M$ avec $M \geq 3$:

$$t_i = \frac{r_i - r_1}{c} + n_i \tag{3.21}$$

$$\tan(\beta + n_\beta) = \frac{y - y_1}{x - x_1} \tag{3.22}$$

$(\beta + n_\beta)$ étant compris dans l'intervalle $[0, \pi]$.

$n_i$ est l'erreur de mesure du TDOA associée à la station de base $i$ et $n_\beta$ l'erreur de mesure du AOA. Si nous considérons une forme linéaire de l'équation du AOA, nous disposons de la relation suivante (figure 3.2):

$$r_1 \sin n_\beta = x \sin\beta - y \cos\beta \tag{3.23}$$

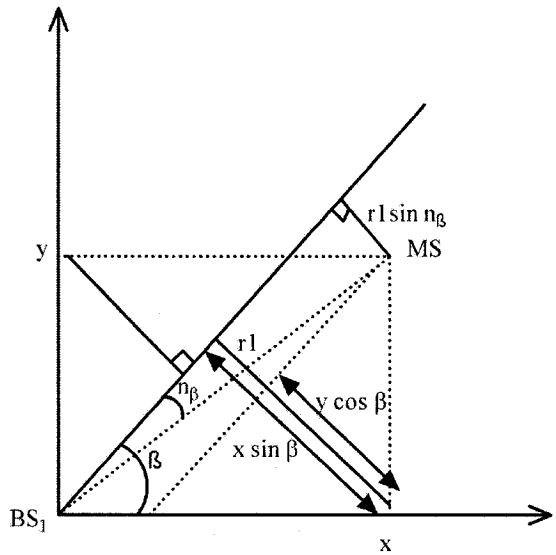



Figure 3.2 Approximation linéaire de l'équation du AOA

Etant donné que $|n_\beta| << 1$,

$$\sin n_\beta \approx n_\beta \tag{3.24}$$

et l'équation peut se réécrire comme suit:

$$-x \sin \beta + y \cos \beta + r_1 n_\beta \approx 0 \tag{3.25}$$

Par conséquent, nous pouvons incorporer les équations (3.21) et (3.25) dans le modèle d'estimation général:

$$m = f(\theta) + n.$$

où:

$$m = \begin{pmatrix} t_{2,1} \\ t_{3,1} \\ . \\ . \\ . \\ t_{M,1} \\ 0 \end{pmatrix}, f(\theta) = \begin{pmatrix} \frac{r_2 - r_1}{c} \\ \frac{r_3 - r_1}{c} \\ . \\ . \\ . \\ \frac{r_M - r_1}{c} \\ -x \sin\beta + y \cos\beta \end{pmatrix}, n = \begin{pmatrix} n_{2,1} \\ n_{3,1} \\ . \\ . \\ . \\ n_{M,1} \\ r_1 n_\beta \end{pmatrix}$$

Ainsi, nous reprenons l'équation (3.16) donnée par:

$$\theta = \theta_0 + (G^T \psi_t^{-1} G)^{-1} G^T \psi_t^{-1} (m - f(\theta_0))$$

$G$ et $\psi_t$ prennent les valeurs suivantes:

$$G = \frac{1}{c} \begin{pmatrix} \frac{x_2 - x}{r_2} - \frac{x_1 - x}{r_1} & \frac{y_2 - y}{r_2} - \frac{y_1 - y}{r_1} \\ \frac{x_3 - x}{r_3} - \frac{x_1 - x}{r_1} & \frac{y_3 - y}{r_3} - \frac{y_1 - y}{r_1} \\ . & \\ . & \\ . & \\ \frac{x_N - x}{r_N} - \frac{x_1 - x}{r_1} & \frac{y_N - y}{r_N} - \frac{y_1 - y}{r_1} \\ -c \sin\beta & c \cos\beta \end{pmatrix}, \psi_t = \begin{pmatrix} \sigma_{t_2}^2 & 0 & ..... & 0 \\ 0 & \sigma_{t_3}^2 & ..... & 0 \\ & & & \\ & & & \\ 0 & ..... & \sigma_{t_M}^2 & 0 \\ 0 & ..... & 0 & r_1^2 \sigma_\beta^2 \end{pmatrix}$$

$n$ est un vecteur de variables aléatoires de moyenne nulle et de matrice de covariance

$\psi_t$ donnée par:

$$\psi_t = \begin{pmatrix} \psi & 0 \\ 0 & r_1^2\sigma_\beta^2 \end{pmatrix}$$

où $\psi$ est la matrice de covariance pour les erreurs du TDOA et $\sigma_\beta^2$ est la variance des erreurs de mesure du AOA. Ainsi, comme précédemment, nous calculons les déviations $\Delta_x$ et $\Delta_y$ par rapport à la position initiale durant 5 itérations et nous obtenons par la suite la valeur finale de la position du mobile.

### 3.3 Résultats de simulation et étude de performance

Pour une localisation de la source en $2D$, nous considérons une cellule hexagonale entourée de six cellules identiques à la première avec un rayon de $r = 5km$ (figure 3.3).

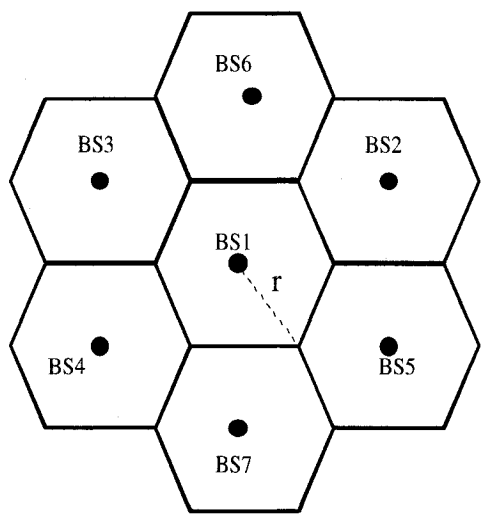



Figure 3.3 Positions des différentes stations de base considérées

Au cours des simulations, les stations de base considérées seront les stations $BS_1$,

$BS_2$, ..., $BS_M$, $M$ étant le nombre total des stations réceptrices utilisées variant de 3 à 7.

Grâce à la méthode des séries de Taylor, nous avons pu estimer la position du mobile. Afin d'évaluer la performance de chacune des méthodes étudiées, nous avons calculé l'erreur quadratique moyenne entre la position estimée et la position initiale du mobile, et cela au bout de 10000 itérations. Cette dernière est donnée par la relation :

$$RMS = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\sqrt{(x_{v_k} - x_0)^2 + (y_{v_k} - y_0)^2} \tag{3.26}$$

où $(x_{v_k}, y_{v_k})$ représente la position estimée, $(x_0, y_0)$ la position initiale et $N$ le nombre d'itérations choisi pour estimer l'erreur quadratique moyenne. Une fois calculée, cette erreur est comparée à une borne théorique de référence: la variance de l'erreur d'un estimateur non-biaisé est bornée inférieurement par une limite connue sous le nom de borne de Cramér Rao. Il s'agit de la valeur minimale que peut prendre l'erreur quadratique moyenne d'un estimateur.

### 3.3.1 Borne de Cramér Rao

La borne de Cramér-Rao (CRLB: Cramér Rao Lower Bound) est un critère de performance lié à l'erreur quadratique moyenne des estimateurs. Dans un problème d'estimation en général, si nous notons par $\theta$ l'ensemble des paramètres à estimer, $r$ l'ensemble des observations et par $p(.)$ la loi de probabilité décrivant l'effet des paramètre à estimer sur les observations, alors la variance de l'erreur de l'estimateur est bornée inférieurement par l'expression [17] [18] [19]:

$$E(\theta(r)^2) \geq \frac{1}{E([\frac{d}{d\theta}\ln p(r|\theta)]^2)} \tag{3.27}$$

Dans notre cas, étant donné que les mesures des retards de transmission et des angles de la matrice $m$ de l'équation (3.7) sont supposées gaussiennes, de moyenne nulle et de matrice de covariance $\psi$, la fonction de densité de probabilité est donnée par:

$$p(m|\theta) = \frac{\exp[-\frac{1}{2}(m - f(\theta))^T \psi^{-1}(m - f(\theta))]}{(2\pi)^{M/2}|\psi|^{1/2}} \tag{3.28}$$

Or, la valeur de la borne de Cramér Rao dans notre cas est donnée par l'équation suivante:

$$CRLB = [E((\frac{d}{d\theta}\ln p(m|\theta))(\frac{d}{d\theta}\ln p(m|\theta))^T)]^{-1} \tag{3.29}$$

Pour calculer cette valeur, nous considérons tout d'abord la dérivée:

$$\frac{d}{d\theta}\ln p(m|\theta) = \frac{d}{d\theta}(-\frac{1}{2}[(m - f(\theta))^T \psi^{-1}(m - f(\theta))]) \tag{3.30}$$

Donc, nous avons:

$$\frac{d}{d\theta}\ln p(m|\theta) = -\frac{1}{2}[\frac{d}{d\theta}(m - f(\theta))^T]\psi^{-1}(m - f(\theta)) + [(m - f(\theta))^T]\psi^{-1}\frac{d}{d\theta}(m - f(\theta)) \tag{3.31}$$

La matrice $\psi$ étant symétrique, nous pouvons écrire [1]:

$$\frac{d}{d\theta}\ln p(m|\theta) = -\frac{1}{2}(D + D^T) \tag{3.32}$$

avec

$$D = [\frac{d}{d\theta}(m - f(\theta))^T]\psi^{-1}(m - f(\theta)) \tag{3.33}$$

D'où:

$$\frac{d}{d\theta}\ln p(m|\theta) = -D = \frac{df^T(\theta)}{d\theta}\psi^{-1}(m - f(\theta)) \tag{3.34}$$

Ainsi,

$$CRLB = [E(\frac{df^T(\theta)}{d\theta}\psi^{-1}(m-f(\theta))(m-f(\theta))^T\psi^{-1}\frac{df(\theta)}{d\theta})]^{-1} = (\frac{df^T(\theta)}{d\theta}\psi^{-1}\frac{df(\theta)}{d\theta})^{-1} \tag{3.35}$$

En utilisant les variables définies précédemment, nous pouvons alors écrire:

$$CRLB = c^2(G^T\psi^{-1}G)^{-1} \tag{3.36}$$

### 3.3.2 Résultats de simulation

L'étude de performance des méthodes considérées est présentée sous différents angles. En premier lieu, une comparaison des erreurs générées par chacune des méthodes par rapport à la borne de Cramér Rao est exposée. Ensuite, les deux méthodes sont comparées entre elles tout en faisant varier différents paramètres permettant de mieux comprendre leurs effets sur les résultats du positionnement. Finalement, une étude des effets de la distance entre le mobile et les stations de base sur l'estimation de la position est présentée dans le cadre des systèmes hyperboliques.

- **Comparaison MSE/CRLB:**

  Afin d'évaluer la performance des estimateurs étudiés, nous avons calculé l'erreur quadratique moyenne obtenue pour chacun des systèmes présentés et nous les avons comparées aux valeurs des bornes de Cramér Rao correspondantes. Nous avons fait varier le nombre de stations de base utilisées pour la radiolocalisation. Ainsi, pour les systèmes basés sur les TDOA, en variant M de 3 à 7 stations comme présentées précédemment dans la figure 3.3, nous obtenons le tableau 3.1. La variance du bruit utilisé pour le

| Nb de BS | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|
| MSE | 0.16662 | 0.1599 | 0.10216 | 0.053761 | 0.050389 |
| CRLB | 0.16254 | 0.1571 | 0.10118 | 0.053317 | 0.050169 |

Tableau 3.1 Comparaison de l'erreur quadratique moyenne au CRLB dans le cas des méthodes hyperboliques pour une source située à la position $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et pour une variance d'erreur $\sigma_t = 100m$

| Nb de BS | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|
| MSE | 0.14316 | 0.14102 | 0.092257 | 0.051431 | 0.048288 |
| CRLB | 0.1225 | 0.11977 | 0.086877 | 0.049521 | 0.046963 |

Tableau 3.2 Comparaison de l'erreur quadratique moyenne au CRLB dans le cas des systèmes hybrides basés sur les TDOA et les AOA pour un mobile situé à la position $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et pour des variances d'erreur $\sigma_t = 100m$ et $\sigma_\beta = 1$ degré

TDOA est $\sigma_t = 100m$. Nous remarquons alors que les valeurs du MSE sont proches de celles du CRLB, ce qui garantit la bonne précision et l'efficacité de l'estimateur. En outre, plus le nombre de stations de base augmente, plus l'erreur quadratique moyenne diminue tout en se rapprochant de la valeur de la borne de Cramér Rao. À chaque configuration donnée en faisant augmenter la valeur de $M$, le nombre d'informations récoltées sur la position du mobile devient plus important, réduisant ainsi les erreurs de mesures. Pour les systèmes hybrides basés sur les TDOA et les AOA, les valeurs des MSE et des CRLB en fonction du nombre de stations de base sont données par le tableau 3.2. Nous constatons que les valeurs du CRLB obtenues grâce à la méthode hybride sont inférieures à celles de la méthode hyperbolique, ce qui prouve le plus de précision apporté par l'information angle de cette méthode. Nous remarquons ici également que la valeur de l'erreur quadratique moyenne diminue au fur et à mesure que le nombre de stations de base augmente. Ces valeurs sont également assez proches de celles des CRLB correspondants. Notons aussi que les erreurs générées par la méthode hy-

bride diminuent par rapport à celles obtenues avec les TDOA uniquement. L'information sur l'angle pourrait donner plus de précision à l'estimation de la position de la source et pourrait éviter éventuellement l'utilisation d'un nombre important de stations de base.

- **Comparaison des performances des méthodes hyperboliques et hybrides:**

  Pour mieux comparer les deux méthodes entre elles, nous avons tracé des courbes qui présentent la précision de la localisation en utilisant un système basé sur le TDOA et le AOA comparativement à un système basé sur le TDOA uniquement. Dans le cas de la figure 3.4, la variance des bruits utilisés pour le TDOA et le AOA sont respectivement $\sigma_t = 100m$ et $\sigma_\beta = 1$ degré. La source a pour coordonnées initiales $(3, 3)$ km. Les stations de base utilisées sont au nombre de 4.

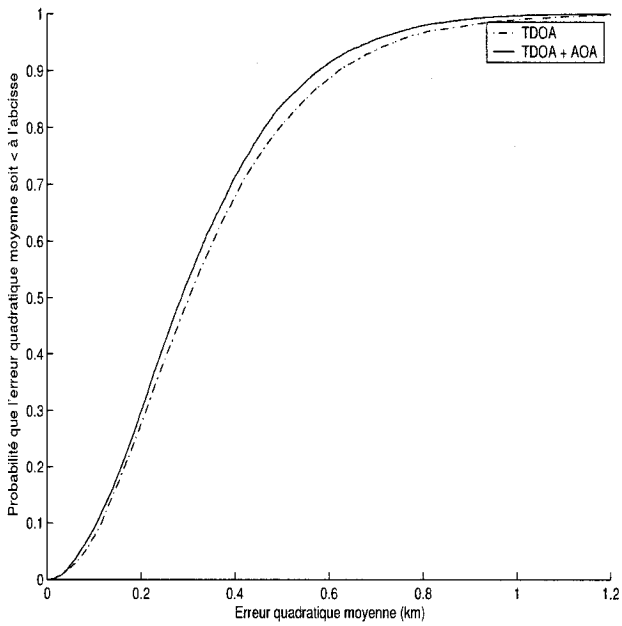



Figure 3.4 Étude comparative des performances des méthodes hyperbolique et hybride pour $\sigma_t = 100m$, $\sigma_\beta = 1$ degré, $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et $M = 4$

Il est clair d'après la figure 3.4 que la localisation avec les informations TDOA/AOA donne de meilleures performances par rapport au TDOA seulement. Nous remarquons que l'erreur quadratique moyenne de la méthode hybride est inférieure à celle de la méthode hyperbolique. Ainsi, l'ajout de l'information sur les angles d'arrivée permet encore une fois de réduire les erreurs et d'améliorer la précision de la localisation.

Si nous gardons la même variance de l'erreur au niveau des angles et que nous augmentons la variance du bruit utilisé pour les retards de transmission, nous remarquons que la diminution de l'erreur quadratique moyenne est encore plus flagrante (figures 3.5 et 3.6).

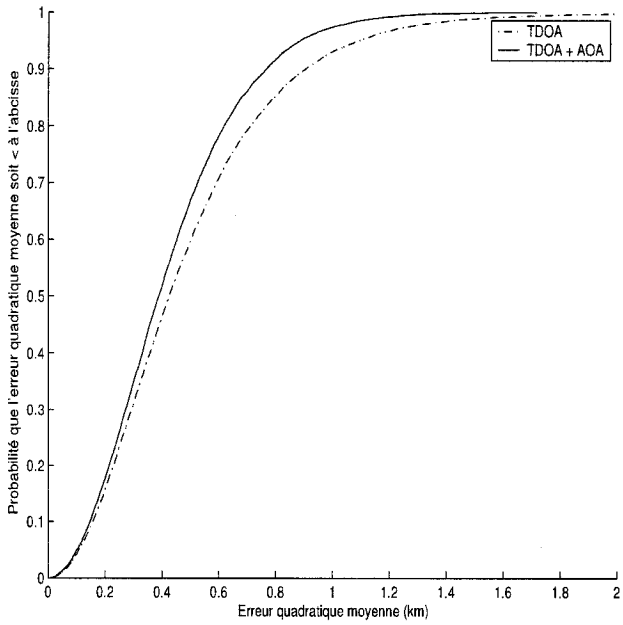



Figure 3.5 Étude comparative des performances des méthodes hyperbolique et hybride pour $\sigma_t = 200m$, $\sigma_\beta = 1$ degré, $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et $M = 4$

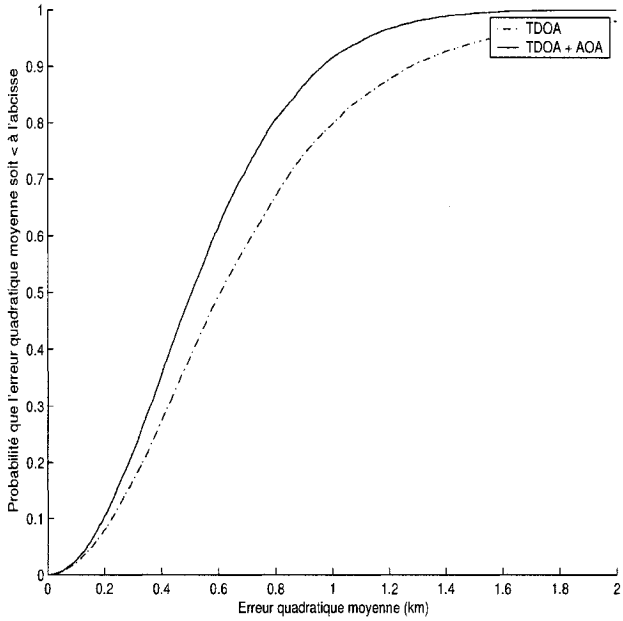



Figure 3.6 Étude comparative des performances des méthodes hyperbolique et hybride pour $\sigma_t = 400m$, $\sigma_\beta = 1$ degré, $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et $M = 4$

Si par ailleurs, nous fixons la variance du bruit pour les retards de transmission à $\sigma_t = 200m$ et que nous faisons varier la variance du bruit angulaire, nous remarquons dans la figure 3.7 que même si le bruit au niveau des angles est important, l'ajout de l'information angulaire reste toujours bénéfique et améliore toujours les résultats donnés par les systèmes hyperboliques en diminuant l'erreur quadratique moyenne générée.

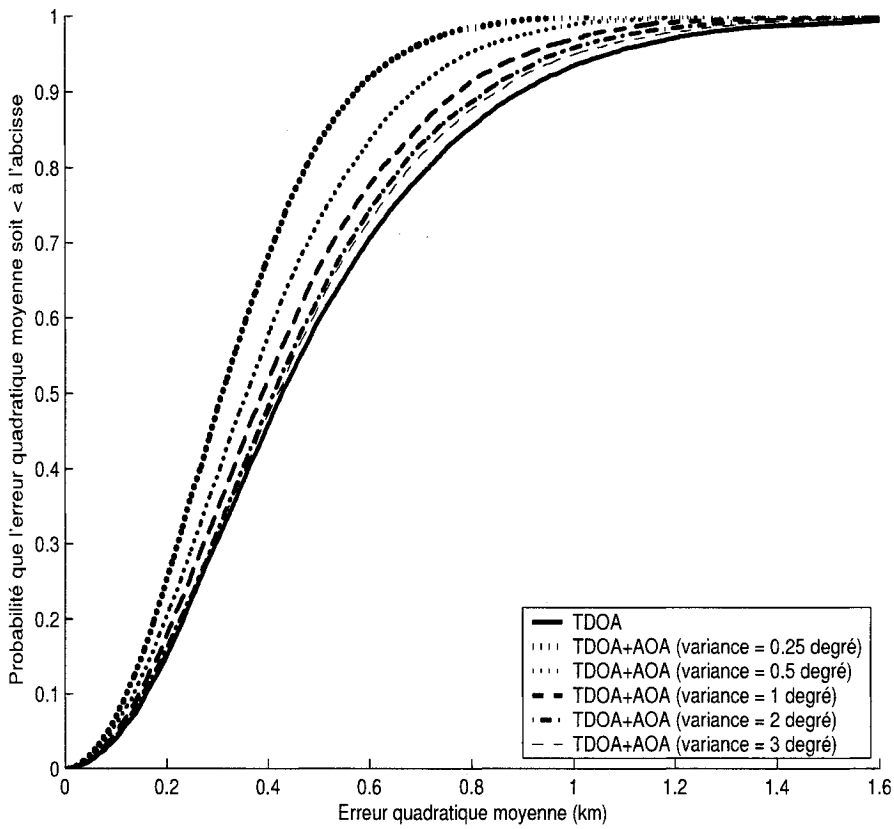



Figure 3.7 Amélioration des performances des systèmes hyperboliques par les systèmes hybrides avec différents bruits angulaires, $\sigma_t = 200m$, $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et $M = 4$

Dans la figure 3.8, nous présentons la radiolocalisation dans des environnements plus précis aussi bien au niveau des retards de transmission que celui des angles. Les variances des bruits sont données par $\sigma_\beta = 0.5$ degré et $\sigma_t = 100m$.

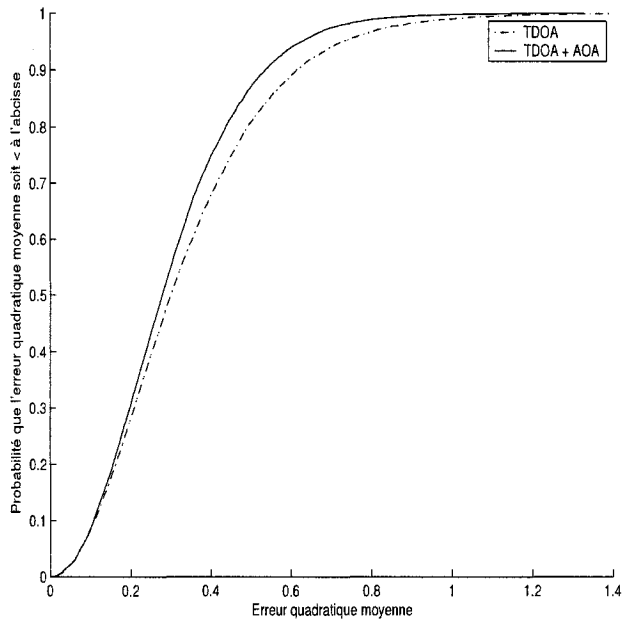



Figure 3.8 Étude comparative des performances des méthodes hyperbolique et hybride pour $\sigma_t = 100m$, $\sigma_\beta = 0.5$ degré, $(x_0, y_0) = (3, 3)$ km et $M = 4$

- **Effet de l'ajout d'une mesure angulaire dans les systèmes hybrides:**

  En général, nous essayons d'estimer la position du mobile avec le minimum de mesures possibles. Cependant, nous pouvons quand même avoir recours à des mesures supplémentaires qui pourraient éventuellement améliorer la précision de l'estimation. Lors des résultats présentés précédemment, une seule mesure d'angle ajoutée aux mesures des retards de transmission a amélioré l'estimation de la position du mobile. Si nous disposons d'une mesure d'angle supplémentaire, la précision du positionnement de la source

est encore meilleure. Pour les variances des bruits déjà utilisés $\sigma_t = 200m$ et $\sigma_{\beta_1} = 1$ degré, nous utilisons une mesure d'angle additionnelle dont la variance du bruit est $\sigma_{\beta_2} = 1.5$ degrés. La figure 3.9 montre que l'ajout de cette mesure d'angle fait diminuer l'erreur générée par le système et par conséquent améliore la précision de la localisation.

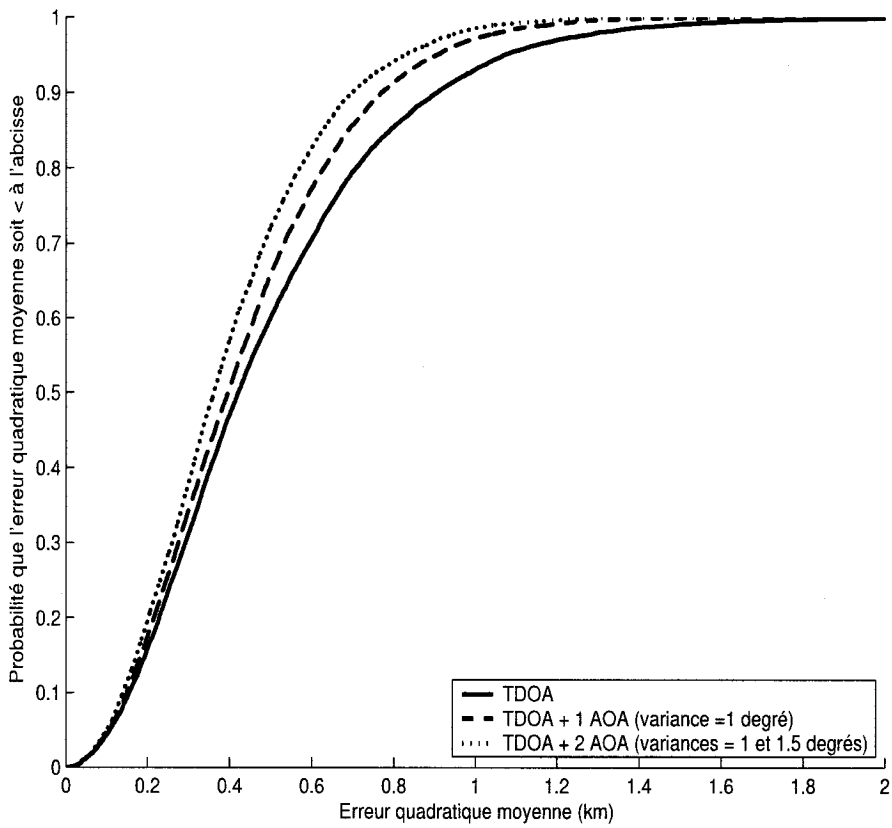



Figure 3.9 Effet de l'ajout d'une mesure d'angle supplémentaire sur les systèmes hybrides

- **Effets de la proximité station mobile-sation de base sur les résultats de la localisation:**

  L'évaluation de la performance des estimateurs peut être observée également

sous un autre angle: nous avons étudié la proximité de la station mobile par rapport aux stations de base. Pour cet effet, nous avons varié les positions du mobile. Chaque position correspond à une distance donnée entre la source et la station de base, et à chaque distance source-station de base choisie, nous avons calculé l'erreur quadratique moyenne et la valeur de la borne de Cramér Rao données par le système de positionnement hyperbolique. Les positions choisies sont données par la figure 3.10. Les stations de base utilisées sont au nombre de 3 (les stations $BS1, BS3$ et $BS4$). Ainsi, les résultats sont présentés dans le tableau 3.3.

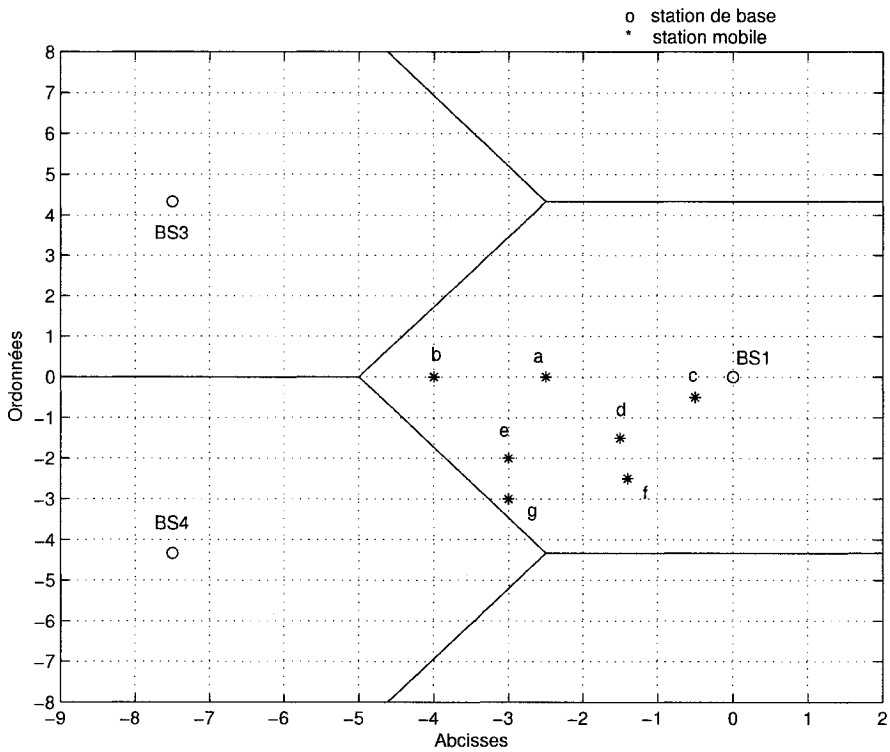



Figure 3.10 Étude des effets de la proximité mobile-station de base sur la performance du système hyperbolique

Nous remarquons que le mobile, passant des positions $a$ à $b$, de $d$ à $e$ et de $f$ à

| Position du mobile | | | Système hyperbolique | |
|---|---|---|---|---|
| source | x | y | MSE | CRLB |
| a | -2.5 | 0 | 0.2760 | 0.2658 |
| b | -4 | 0 | 0.2037 | 0.2030 |
| c | -0.5 | -0.5 | $9.19\ 10^{12}$ | 0.4931 |
| d | -1.5 | -1.5 | 0.5518 | 0.4628 |
| e | -3 | -2 | 0.3578 | 0.3423 |
| f | -1.4 | -2.5 | 0.8700 | 0.7163 |
| g | -3 | -3 | 0.5571 | 0.4962 |

Tableau 3.3 Évaluation des estimateurs en fonction de la proximité mobile-station de base pour $\sigma_t = 200m$

$g$, s'éloigne de la station de base $BS1$ à peu près sur la même ligne. D'après les valeurs indiquées dans le tableau, plus la distance entre la position du mobile et la station $BS1$ augmente, plus l'erreur quadratique moyenne diminue et s'approche en même temps de la valeur de la borne de Cramér Rao. Par contre, pour la position $c$ de la source, la valeur de l'erreur quadratique moyenne croit jusqu'à diverger car le mobile est trop proche de la station $BS1$. Cela est dû au fait que la variance du bruit considéré est trop élevée par rapport aux valeurs mesurées. Nous remarquons que l'efficacité de l'estimateur atteint son maximum si le mobile s'éloigne de la station réceptrice la plus proche, sans trop s'approcher des autres stations de base. Si la source s'approche plus des autres stations, le même raisonnement serait présenté pour des raisons de symétrie. En définitive, plus le mobile s'approche des récepteurs, plus les erreurs d'estimation augmentent.

Pour mieux observer ce résultat, nous avons généré une distribution aléatoire de 1000 positions du mobile dans le secteur représenté par la figure 3.11.

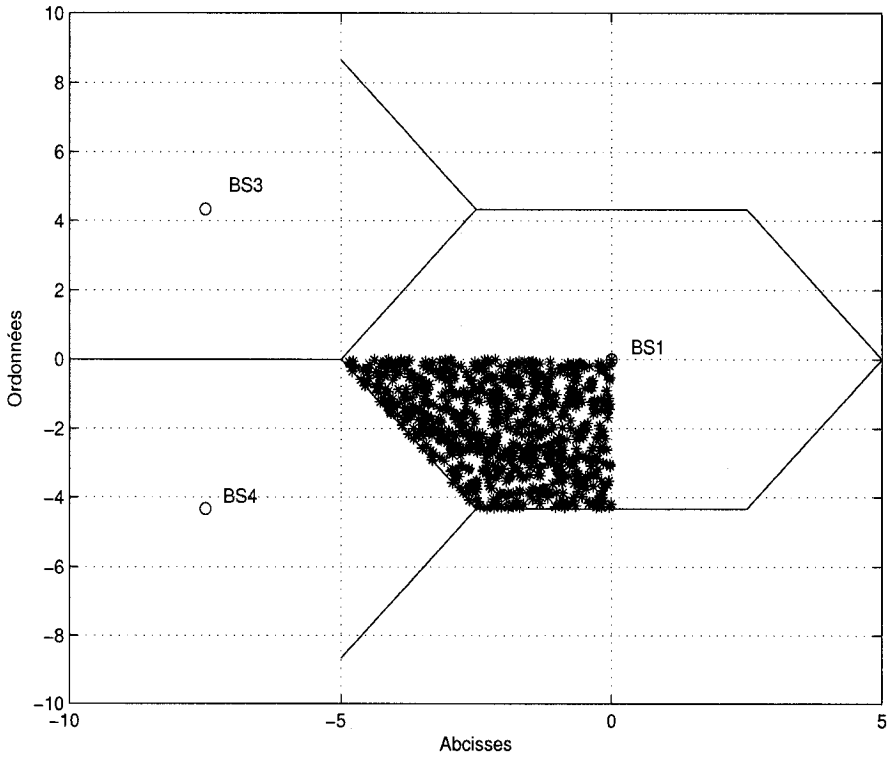



Figure 3.11 Génération de positions aléatoires du mobile proches de la station de base $BS_1$

Pour chaque position générée, nous calculons la valeur de la borne de Cramér Rao avec une variance de bruit donnée par $\sigma_t = 50m$. La variation de cette borne est obtenue dans la figure 3.12.

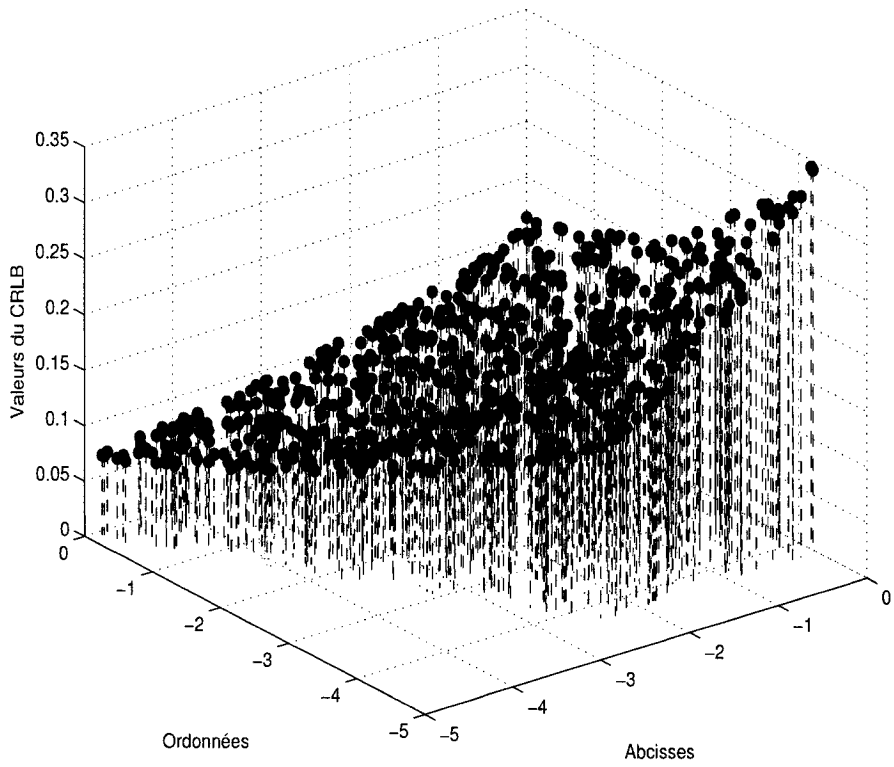



Figure 3.12 Valeurs des bornes de Cramér Rao générées par la méthode hyperbolique pour une variance de l'erreur $\sigma_t = 50m$ avec $M = 3$

La station de base la plus proche étant positionnée à l'origine du repère (aux coordonnées $(0, 0, 0)$), nous remarquons que la valeur de la borne de Cramér Rao diminue si le mobile s'éloigne de la station de base. Cependant, nous remarquons également qu'elle augmente considérablement lorsque l'ordonnée du mobile s'approche de la valeur $y = -4.33$. Cette valeur correspond à l'ordonnée de l'une des stations de base considérées pour localiser le système. Lors des dérivations utilisées pour calculer les distances entre le mobile et les stations de base, la différence entre l'ordonnée du mobile et celle de la station de base $BS_3$ s'annule, faisant augmenter la valeur de la borne de Cramér Rao. Ceci explique l'augmentation de cette dernière au niveau de l'ordonnée

$y_{BS_3} = -4.33$. Pour remédier à ce problème, une quatrième station de base est ajoutée au système pour localiser le mobile. Si en plus des stations $BS_1$, $BS_3$ et $BS_4$ nous ajoutons la station $BS_2$, les valeurs de la borne de Cramér Rao se stabilisent autour de $y_{BS_4}$. Ce résultat peut être observé dans la figure 3.13.

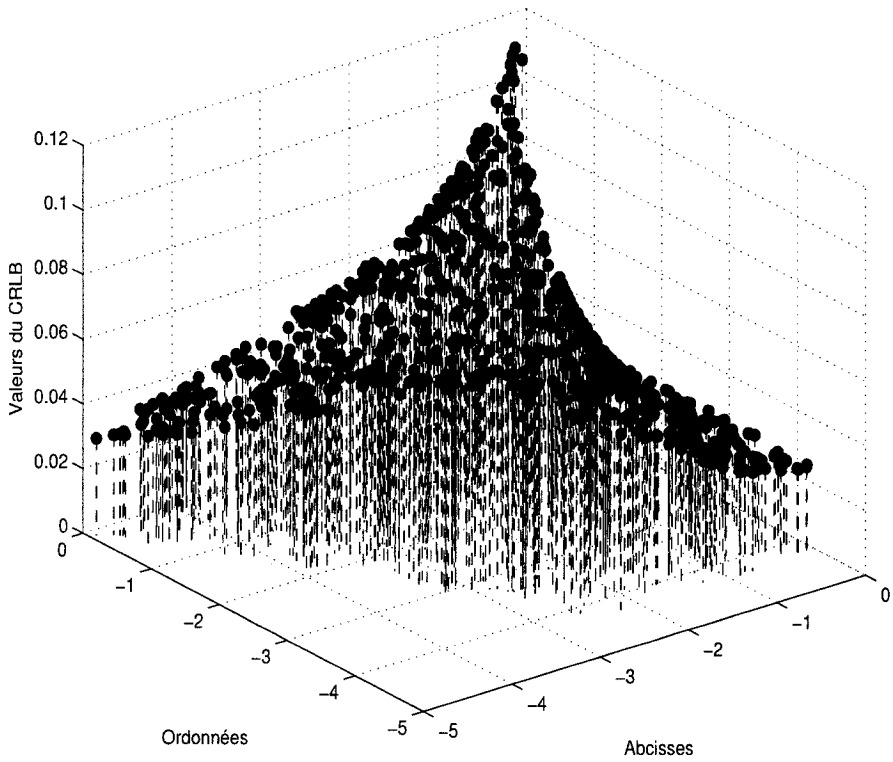



Figure 3.13 Valeurs des bornes de Cramér Rao générées par la méthode hyperbolique pour une variance de l'erreur $\sigma_t = 50m$ avec 4 stations de base

Il est clair que la valeur du CRLB augmente uniquement en s'approchant de la station de base la plus proche du mobile, qui n'est autre que la station $BS_1$. Aussi peut-on ajouter que les valeurs du CRLB ont diminué en passant de $M = 3$ à $M = 4$ car la quatrième station de base apporte plus d'informations pour mieux positionner le mobile.

Notons que pour obtenir ces courbes, nous avons utilisé les valeurs du CRLB au lieu de celles des erreurs quadratiques moyennes. Ce choix a été pris en considération pour éviter de devoir présenter des divergences de l'erreur autour de la station $BS_1$ qui manqueraient de visibilité sur les graphiques. En conclusion, en tenant compte de l'erreur de positionnement, il est assez difficile pour les systèmes hyperboliques bidimensionnels d'aboutir à une bonne estimation de la position d'un mobile qui serait trop proche d'une station réceptrice donnée. C'est un inconvénient majeur que présente cette méthode.

Cependant, si les mesures demeurent assez précises, la localisation dans ce cas de figure devient possible. A cet effet, pour stabiliser la méthode, nous avons testé l'efficacité du système considéré pour différentes valeurs de la variance du bruit pour localiser le mobile initialement à la position $c$ de la figure 3.10. Les résultats de ces tests sont donnés par la figure 3.14.

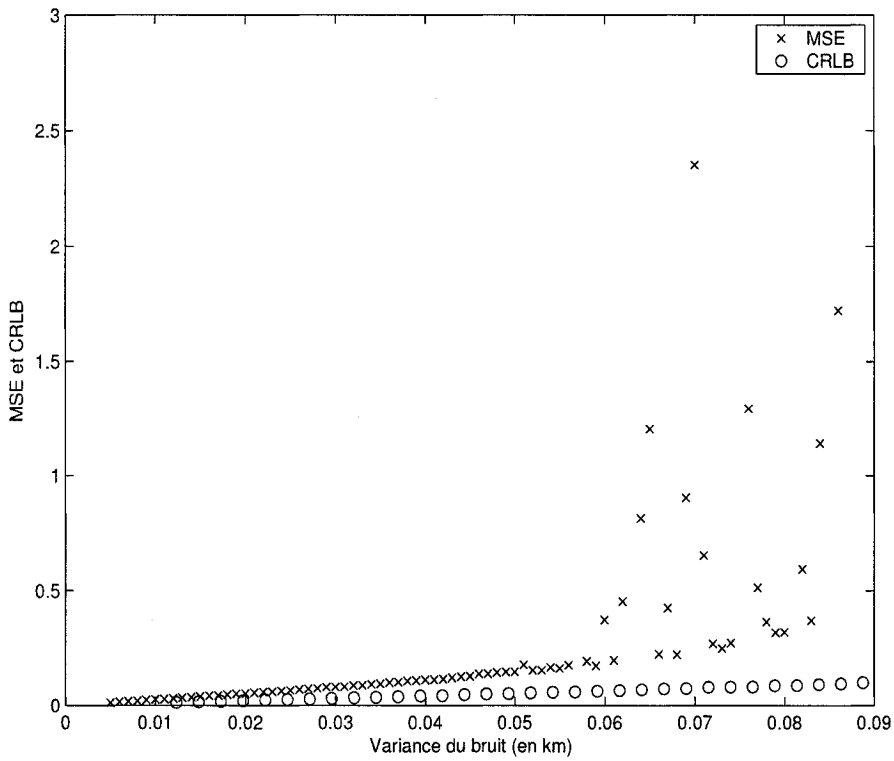



Figure 3.14 Erreur quadratique moyenne générée par la localisation du mobile initialement à la position $c$ avec la méthode hyperbolique pour différentes valeurs de $\sigma_t$

Nous remarquons que si la variance du bruit ne dépasse pas $60m$, la méthode hyperbolique est capable de bien estimer la position du mobile. L'erreur quadratique moyenne devient faible et s'approche considérablement de la borne de Cramér Rao. Par contre, au delà de $60m$, l'erreur est trop importante et peut même diverger. Ainsi, plus le mobile s'approche de la station de base, plus la variance du bruit doit être faible pour pouvoir aboutir à des résultats satisfaisants de l'estimation de la position.

## 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes hyperboliques et hybrides basées sur les TDOA et les AOA. Une analyse de performance de ces deux méthodes a été réalisée en variant différents paramètres tels que le nombre de stations de base et les variances des bruits relatifs aux retards de transmission et aux angles. Une étude comparative entre ces deux méthodes nous a permis de montrer l'apport en précision de la mesure d'angle ajoutée aux mesures des TDOA. Nous avons prouvé aussi qu'une mesure d'angle supplémentaire pouvait être bénéfique. Finalement, une étude de la proximité station mobile-station de base a été exposée.
Tous les résultats présentés dans ce chapitre se situent dans un cadre bidimensionnel. Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons à la localisation des mobiles dans un espace tridimensionnel.

# CHAPITRE 4

# TECHNIQUES DE RADIOLOCALISATION DANS L'ESPACE TRIDIMENSIONNEL

Les infrastructures dans les milieux urbains représentent des obstacles inévitables pour la radiolocalisation. Même si, dans ce projet, nous nous intéressons uniquement au positionnement en extérieur, il est fondamental de pouvoir situer le mobile en 3D, surtout pour les applications de services d'urgence. Nous avons tendance à imaginer que la méthode hyperbolique pour le positionnement dans un espace bidimensionnel vue précédemment peut être utilisée en ajoutant tout simplement la troisième dimension, mais cela est loin d'être efficace. La troisième dimension représentée par les hauteurs des stations de base, placées au niveau du sol ou au dessus des immeubles ne sont pas du même ordre de grandeur que leurs coordonnées en $x$ et en $y$. Les composantes en $z$ pourraient n'atteindre que des valeurs de quelques mètres alors que les coordonnées $x$ et $y$ peuvent être de l'ordre des kilomètres. Cette différence d'ordre de grandeur fausserait considérablement les résultats d'estimation obtenus dans l'équation (3.14). Les fonctions $f_i$ traitent des valeurs des $r_i$ représentant la distance entre la station de base $i$ et le mobile. Cette distance tiendrait compte des trois dimensions en même temps et l'effet des erreurs suivant les coordonnées $x$ et $y$ serait trop important pour donner une bonne précision de l'estimation de la hauteur $z$.

Pour remédier à ce problème, et pour pouvoir malgré tout utiliser la méthode des séries de Taylor présentée dans le chapitre précédent, nous avons eu recours à une méthode basée sur des facteurs d'échelle que nous avons introduits au niveau des différentes coordonnées de l'espace tridimensionnel, permettant ainsi d'équilibrer l'effet des erreurs sur les trois dimensions.

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter la méthode utilisée. Des résultats de simulation seront exposés par la suite afin d'évaluer la performance de cet estimateur.

## 4.1 Méthode d'introduction des facteurs d'échelle dans les systèmes hyperboliques en 3D

Dans cette méthode, le choix des facteurs d'échelle se base sur les différences des ordres de grandeur des coordonnées de la position initiale de la station mobile donnée par $\theta_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}$. Nous noterons par $p_1$, $p_2$ et $p_3$ les facteurs d'échelle relatifs aux coordonnées $x_0$, $y_0$ et $z_0$ vérifiant l'équation:

$$p_1 + p_2 + p_3 = \alpha \tag{4.1}$$

où $\alpha$ est une variable permettant de contrôler l'effet des facteurs d'échelle sur l'estimation de la position du mobile. Les coordonnées en $x$ et en $y$ étant du même ordre de grandeur en général, nous pouvons choisir:

$$p_1 = p_2 \tag{4.2}$$

Pour équilibrer l'effet de la troisième dimension par rapport aux deux premières, les facteurs d'échelle selon les $x$ et les $z$ vérifieront l'équation suivante:

$$p_1 x_0 = p_3 z_0 \tag{4.3}$$

Ainsi, les facteurs choisis constituent le système formé par les équations (4.1), (4.2) et (4.3). La résolution de ce système permet de déterminer les valeurs de ces facteurs. Ces derniers seront introduits par la suite dans la définition des équations utilisées pour estimer la position du mobile.

### 4.1.1 Introduction des facteurs d'échelle dans la méthode des séries de Taylor en 3D

Le signal reçu au niveau de la station de base $i$ est toujours donné par l'équation:

$$u_i(t) = s(t - t_i) + n_i(t),$$

où $s(t)$ est le signal envoyé par la source, $t_i$ le retard de transmission associé à la station de base $i$ et $n_i(t)$ le bruit additif. Le signal et le bruit sont supposés gaussiens, indépendants et de moyenne nulle. Les estimations des différences des retards de transmission (TDOA) par rapport à la station de base de référence 1 sont données par:

$$t_{i,1} = t_i - t_1.$$

En présence d'un bruit additif gaussien, les différences des retards de transmission par rapport à la station de base de référence 1 sont données par:

$$t_{i,1} = t^0_{i,1} + n_{i,1}$$

avec $i = 2, ..., M$, $M$ le nombre de stations de base utilisé pour localiser la source et $t^0_{i,1}$ la valeur de $t_{i,1}$ non erronée.

Le principe d'introduction des facteurs d'échelle consiste à multiplier les com-

posantes correspondant à un axe donné de l'espace tridimensionnel considéré par le facteur approprié. Par exemple, les composantes suivant l'axe des $x$ seront multipliées par la constante $p_1$. Ainsi, si les coordonnées du mobile sont définis par $(x, y, z)$ et celles des stations de base $i$ par $(x_i, y_i, z_i)$ alors, en tenant compte des facteurs d'échelle considérés, la distance entre le mobile et la station de base sera donnée par:

$$r_i^2 = [p_1.(x_i - x)]^2 + [p_2.(y_i - y)]^2 + [p_3.(z_i - z)]^2 \tag{4.4}$$

$c$ étant la vitesse de propagation du signal, nous avons:

$$r_{i,1} = ct_{i,1} = c(t_{i,1}^0 + n_{i.1}) = r_i - r_1 + cn_{i,1}$$

Nous obtenons alors un système de $(M-1)$ équations non linéaires ayant pour solution $(x, y, z)$. Pour $i = 2...M.$, ces équations sont données par:

$$t_{i,1} = \frac{r_i - r_1}{c} + n_{i,1}$$

Comme dans l'espace bidimensionnel, l'estimation de la position du mobile revient à résoudre le système d'équations donné par le modèle général suivant:

$$m = f(\theta) + n,$$

où:

$$m = \begin{pmatrix} t_{2,1} \\ t_{3,1} \\ . \\ . \\ . \\ . \\ t_{M,1} \end{pmatrix}, f(\theta) = \begin{pmatrix} \frac{r_2 - r_1}{c} \\ \frac{r_3 - r_1}{c} \\ . \\ . \\ . \\ . \\ \frac{r_M - r_1}{c} \end{pmatrix}, n = \begin{pmatrix} n_{2,1} \\ . \\ . \\ . \\ . \\ . \\ n_{M,1} \end{pmatrix}.$$

La méthode des séries de Taylor nous présente encore une fois la localisation du mobile selon l'équation (3.16) mais en 3D. Elle est donnée par:

$$\theta = \theta_0 + (G^T \psi^{-1} G)^{-1} G^T \psi^{-1} (m - f(\theta_0))$$

La matrice de covariance du bruit est toujours donnée par:

$$\psi = E[(n - E(n))(n - E(n))^T] = \begin{pmatrix} \sigma^2_{t_2} & 0 & ..... & 0 \\ 0 & \sigma^2_{t_3} & ..... & 0 \\ & & & \\ & & & \\ 0 & 0 & ..... & \sigma^2_{t_M} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

$G$ étant la matrice des dérivées partielles des fonctions $f_i$ par rapport aux différentes

composantes $x$, $y$ et $z$, alors, sous l'effet des facteurs d'échelle utilisés, nous obtenons:

$$G = \frac{1}{c}\begin{pmatrix} p_1^2[\frac{x_2-x}{r_2} - \frac{x_1-x}{r_1}] & p_2^2[\frac{y_2-y}{r_2} - \frac{y_1-y}{r_1}] & p_3^2[\frac{z_2-z}{r_2} - \frac{z_1-z}{r_1}] \\ p_1^2[\frac{x_3-x}{r_3} - \frac{x_1-x}{r_1}] & p_2^2[\frac{y_3-y}{r_3} - \frac{y_1-y}{r_1}] & p_3^2[\frac{z_3-z}{r_3} - \frac{z_1-z}{r_1}] \\ \cdot & & \\ \cdot & & \\ \cdot & & \\ p_1^2[\frac{x_N-x}{r_N} - \frac{x_1-x}{r_1}] & p_2^2[\frac{y_N-y}{r_N} - \frac{y_1-y}{r_1}] & p_3^2[\frac{z_N-z}{r_N} - \frac{z_1-z}{r_1}] \end{pmatrix},$$

$$m - f(\theta) = h = \frac{1}{c}\begin{bmatrix} r_{2,1} - (r_2 - r_1) \\ r_{3,1} - (r_3 - r_1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_{M,1} - (r_M - r_1) \end{bmatrix}$$

Ainsi, à chaque itération, les déviations par rapport à la position initiale $\theta_0$ sont calculées:

$$\begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \\ \Delta_z \end{bmatrix} = (G^T\psi^{-1}G)^{-1}G^T\psi^{-1}h \tag{4.6}$$

À la première itération, les déviations calculées sont ajoutées aux estimées initiales multipliées par les facteurs d'échelle correspondants comme suit:

$$\begin{cases} x_{e_1} = p_1 x_0 + \Delta_x \\ y_{e_1} = p_2 y_0 + \Delta_y \\ z_{e_1} = p_3 z_0 + \Delta_z \end{cases}$$

où $(x_{e1}, y_{e1}, z_{e1})$ sont les coordonnées estimées lors de la première itération. La valeur de $z_0$ doit être choisie proche de la vraie hauteur du mobile pour que la

méthode puisse converger.

Aux itérations suivantes, il n'est plus nécessaire de prendre en considération les facteurs d'échelle étant donné qu'ils sont déjà introduits dans les composantes suivant les trois axes de l'espace considéré. Ainsi:

$$\begin{cases} x_{e_l} = x_e + \Delta_x \\ y_{e_l} = y_e + \Delta_y \\ z_{e_l} = z_e + \Delta_z \end{cases}$$

avec $l = 2...iter$, $iter$ étant le nombre d'itérations nécessaires pour que les déviations soient suffisamment faibles. En pratique, 4 à 5 itérations suffisent. Dans notre cas, nous avons choisi $iter = 5$ pour mieux garantir la précision. Dans ce même objectif, et pour éviter les cas de divergence, un test de validité est introduit au cours du processus d'estimation dans la méthode des séries de Taylor. À la fin de chaque itération, la valeur de la trace de $(G^T \psi^{-1} G)$ est comparée à celle calculée lors de l'itération précédente. Si le rapport entre ces deux valeurs est supérieur à $10^{-2}$, alors un cas de divergence est détecté et l'itération n'est plus valide. Les coordonnées de la source sont obtenues en divisant les valeurs des estimées de sa position à la fin des itérations parcourues dans la méthode des séries de Taylor par les facteurs d'échelle correspondants. Ainsi, la position finale du mobile est donnée par:

$$\begin{cases} x_{final} = \frac{x_{e_5}}{p_1} \\ y_{final} = \frac{y_{e_5}}{p_2} \\ z_{final} = \frac{z_{e_5}}{p_3} \end{cases}$$

### 4.1.2 Méthode adaptative pour le choix des facteurs d'échelle

Afin d'aboutir à positionner le mobile avec un maximum de précision, nous avons eu recours, comme indiqué dans la section précédente, à une optimisation de

la méthode des séries de Taylor avec des facteurs d'échelle fixes. Cependant, l'efficacité de ces facteurs en terme de précision peut varier d'un cas à un autre. Dépendamment du choix de ces constantes, les résultats de la localisation peuvent s'améliorer ou dans d'autres cas, s'éloigner de la vraie position de la source. Pour remédier à ce problème, un ajustement de ces facteurs s'impose (figure4.1).

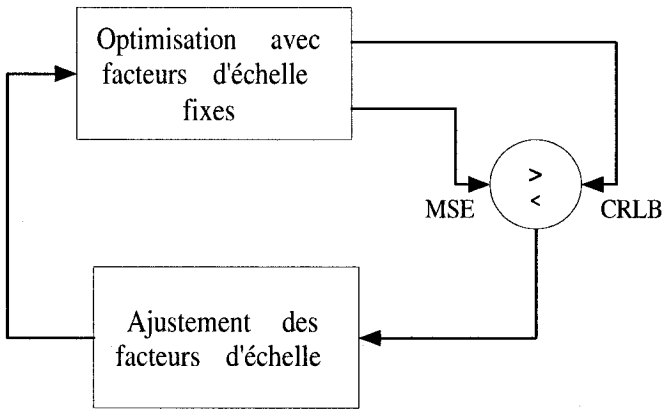



Figure 4.1 Modélisation de la méthode des facteurs d'échelle

Pour cela, une valeur initiale de $\alpha$ est choisie. Ensuite, la valeur de l'erreur quadratique moyenne générée par le système est comparée à la borne de Cramér Rao. Idéalement, le rapport $q = \frac{MSE}{CRLB}$ entre ces deux valeurs devrait s'approcher le plus possible de l'unité, par valeurs supérieures. L'erreur quadratique moyenne ne doit pas descendre en dessous de la borne de Cramér Rao sinon les facteurs d'échelle utilisés n'ont aucun sens. Si ce cas se présente, nous augmentons la valeur de $\alpha$ et le système génère une nouvelle valeur de $q$. Par contre, si $q > 1$, nous gardons en mémoire la valeur de $\alpha$ utilisée et nous la diminuons pour générer encore une fois la valeur $q$. La même comparaison par rapport à l'unité est réalisée. A chaque fois que $q > 1$, la valeur de $\alpha$ est mémorisée. Le processus s'arrête lorsque les valeurs de $q$ générées se répètent. Au niveau de cette étape, la valeur de $\alpha$ parmi celles gardées en mémoire et qui correspond à la plus petite valeur de $q$ est choisie pour

générer les meilleures valeurs des facteurs d'échelle minimisant l'erreur quadratique moyenne, tout en s'approchant au maximum de la borne de Cramér Rao.

Au cours du processus, nous avons mentionné que dépendamment de la valeur de $q$, nous diminuons ou augmentons la valeur de $\alpha$. Cela est réalisé comme suit: la première réduction de la valeur de $\alpha$ revient à sa division par un coefficient $cf_0$. Sa première augmentation revient à sa multiplication par ce coefficient. Ensuite, lors des itérations suivantes, $\alpha$ sera divisée ou multipliée par le coefficient $cf_j = \frac{cf_0}{2^j}$ où $j = 1, 2..n$, $n$ étant la valeur qui correspond au $cf_j$ le plus proche de 1, valeur permettant l'arrêt du processus. Une itération plus loin sera inutile car nous retrouverions une valeur de $\alpha$ déjà utilisée.

Dans notre système, plusieurs tests nous ont permis de fixer $\alpha = 10000$, $cf_0 = 10$ et $n = 3$. Ainsi, les valeurs des facteurs d'échelle sont raffinées au cours des itérations et la meilleure combinaison de ces facteurs est générée au final pour localiser la source d'une manière précise. Dans les deux cas de la valeur de $q$ par rapport à l'unité, des conditions sur la convergence ont été rajoutées. L'ajustement des valeurs des facteurs d'échelle se fait également si le taux de divergence ($div$) des valeurs générées par le système basé sur ces facteurs dépasse les 30% (figure 4.2).

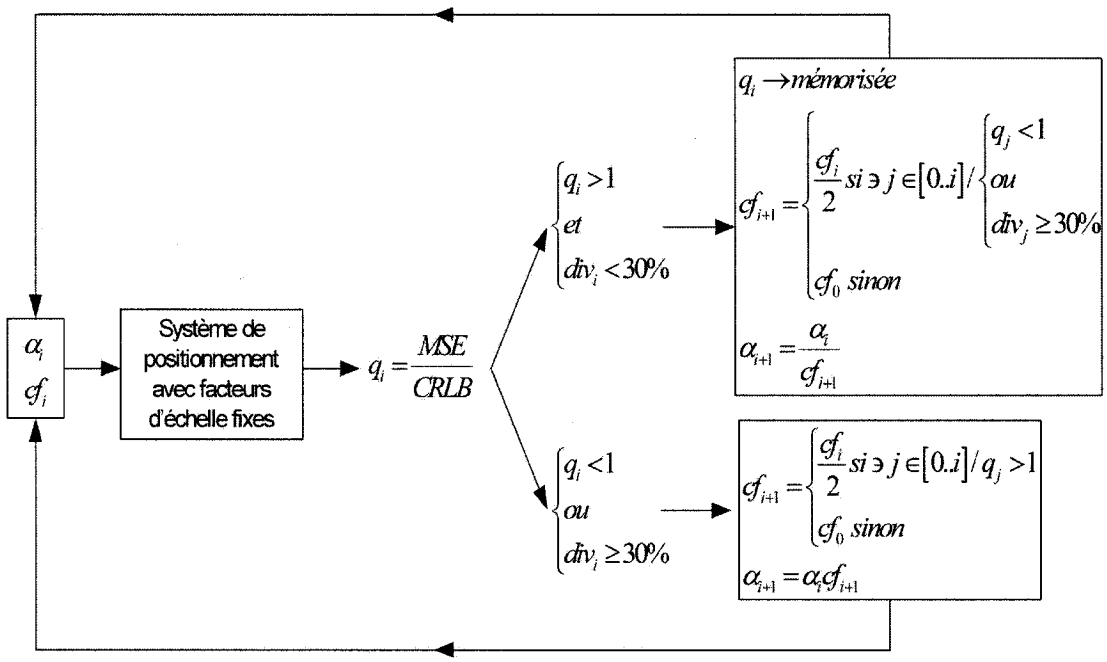



Figure 4.2 Ajustement des facteurs d'échelle

## 4.2 Résultats de simulation et étude de performance

Dans cette section, nous commençons par présenter des exemples de positionnement en 3D tout en détaillant les étapes permettant le choix des facteurs d'échelle pour différentes positions de la source. Ensuite, une optimisation de la méthode pour certaines positions de cette source est exposée. Le cas de positionnement d'un mobile proche d'une station de base est également traité prouvant l'efficacité de la méthode basée sur les facteurs d'échelle. Par la suite, une comparaison des méthode bidimensionnelle et tridimensionnelle est fournie. Finalement, une mise en évidence de la précision de l'estimation de l'altitude par la méthode des facteurs d'échelle est exposée en s'appuyant sur des résultats de simulations.

| $BS$ | $BS_1$ | $BS_2$ | $BS_3$ | $BS_4$ | $BS_5$ | $BS_6$ | $BS_7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| x | 0 | 7.5 | -7.5 | -7.5 | 7.5 | 0 | 0 |
| y | 0 | $2.5\sqrt{3}$ | $2.5\sqrt{3}$ | $-2.5\sqrt{3}$ | $-2.5\sqrt{3}$ | $5\sqrt{3}$ | $-5\sqrt{3}$ |
| z | 0.003 | 0.01 | 0.006 | 0.027 | 0.03 | 0.021 | 0.009 |

Tableau 4.1 Coordonnées des différentes stations de base utilisées (en km)

| | $\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow 5\alpha$ | $\alpha \leftarrow 2.5\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{1.25}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 10000 | 1000 | 100 | 10 | 50 | 125 | 100 |
| q | $6.07\ 10^4$ | 183.67 | 1.0349 | err | 87.45 | 1.0231 | 1.0263 |
| div | 0% | 0% | 0% | 100% | 85.62% | 0% | 0% |

Tableau 4.2 Exemple de recherche des facteurs d'échelle adéquats pour la localisation du mobile initialement à la position $(3km, 3km, 27m)$ avec $M = 4$ et $\sigma_t = 200m$

Au cours des simulations réalisées, les stations de base gardent les mêmes positions utilisées dans le chapitre précédent (figure 3.3) avec les hauteurs données dans le tableau 4.1.

- **Résultats de la recherche des facteurs d'échelle adéquats pour la localisation en 3D:**

  Pour illustrer le fonctionnement du système de positionnement incorporé de facteurs d'échelle, nous présentons le tableau 4.2 détaillant les différentes valeurs que prend $\alpha$ initialement fixée à 10000, le rapport qui en résulte entre l'erreur quadratique moyenne et la borne de Cramér Rao et le taux de divergence à chaque étape. Ces résultats ont été générés pour une position initiale du mobile donnée par $x_0 = 3km$, $y_0 = 3km$ et $z_0 = 27m$. Les erreurs de mesure considérées ont pour variance $\sigma_t = 200m$.

  Nous remarquons que la valeur du MSE s'approche le plus du CRLB lorsque $\alpha$ vaut 125. Notons que le taux de divergence dépasse largement le seuil de tolérance fixé à 30% lorsque $\alpha$ vaut 10. Cette valeur est effectivement trop basse, c'est pour cela que nous l'avons augmenté jusqu'à 50. Cependant, nous

remarquons que le taux de divergence reste toujours élevé. L'ajustement des facteurs d'échelle lors de l'itération suivante permet de fournir un rapport entre l'erreur et la borne de Cramér Rao presque parfait et un taux de divergence nul. Ainsi, nous aboutissons à une estimation de la position du mobile dont les résultats sont représentés dans la figure 4.3.

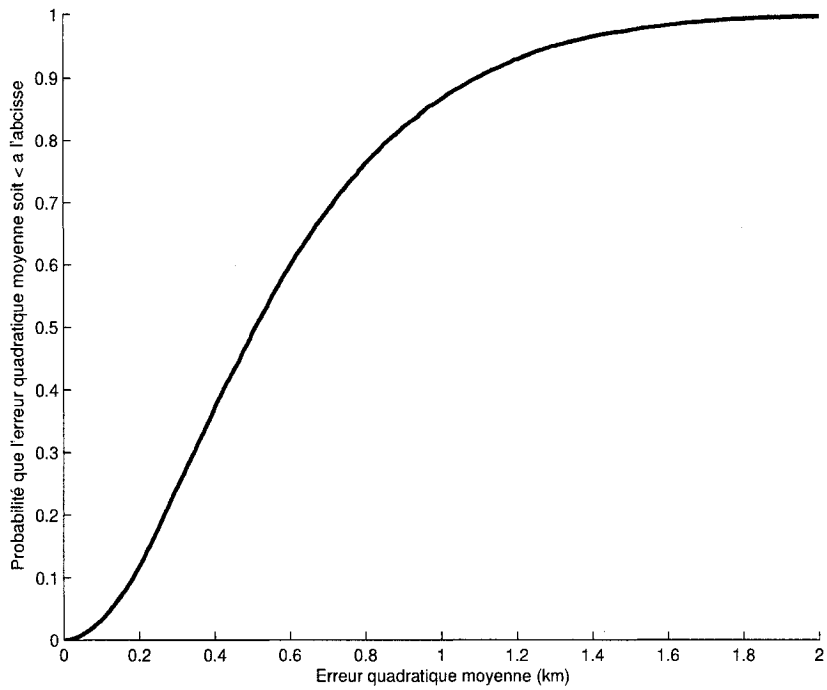



Figure 4.3 Résultats de l'erreur quadratique moyenne dans le cas de la méthode d'introduction des facteurs d'échelle en 3D pour $(x_0, y_0, z_0) = (3km, 3km, 27m)$, $\sigma_t = 200m$ et $M = 4$

Pour la même position initiale du mobile et afin de comparer différentes précisions, nous faisons varier la variance du bruit considéré pour les mesures des retards de transmission. À chaque configuration, nous déterminons les facteurs d'échelle adéquats et nous estimons la position du mobile. Dans la figure 4.4, $\sigma_t$ varie de $200m$ à $5m$.

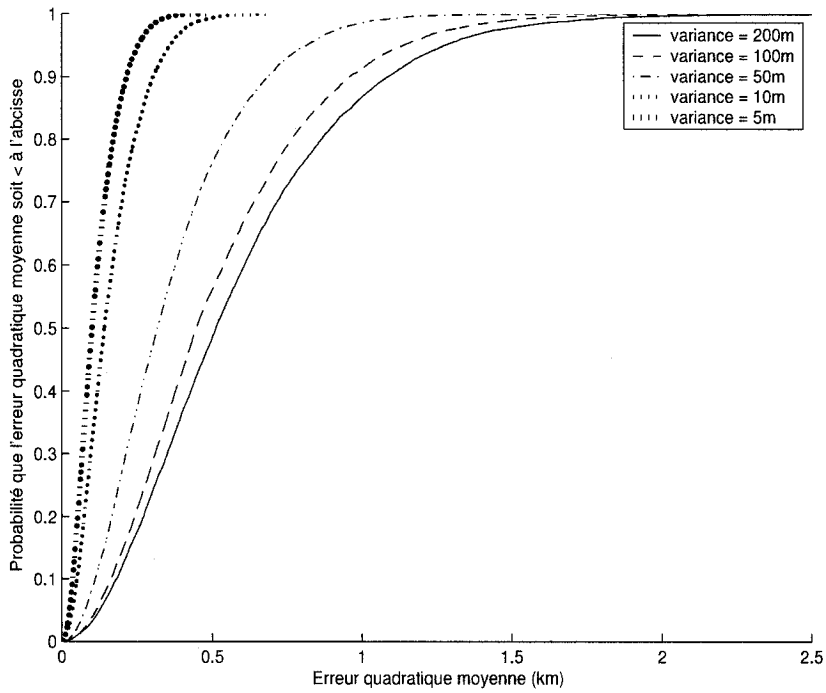



Figure 4.4 Erreurs quadratiques générées par le système basé sur les facteurs d'échelle en 3D pour les variances $\sigma_t = 200m, 100m, 50m, 10m$ et $5m$, avec $(x_0, y_0, z_0) = (3km, 3km, 27m)$ et $M = 4$

Dépendamment des exigences au niveau de la précision du milieu étudié, la méthode tridimensionnelle proposée est capable de fournir les erreurs quadratiques générées par le système.

Nous pouvons également fournir les mêmes résultats pour n'importe quelle position initiale du mobile. Pour une source initialement positionnée aux coordonnées $(x_0, y_0, z_0) = (5km, 2km, 100m)$, les meilleurs facteurs d'échelle permettant de localiser le mobile pour une variance du bruit $\sigma_t = 200m$ sont donnés par $\alpha = 160$ (tableau 4.3).

Cependant, si nous changeons la variance en $\sigma_t = 50m$ et que nous déterminons la valeur de $\alpha$ donnant les meilleurs facteurs d'échelle pour la localisation,

| | $\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow 5\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{2.5}$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{1.25}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 10000 | 1000 | 100 | 500 | 200 | 160 |
| q | $1.345\ 10^5$ | 796.42 | 0.9819 | 108.998 | 2.96 | 1.34 |
| div | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |

Tableau 4.3 Recherche des facteurs d'échelle adéquats pour la localisation du mobile initialement à la position $(5km, 2km, 100m)$ avec 4 stations de base et $\sigma_t = 200m$

| | $\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow 5\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{2.5}$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{1.25}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 10000 | 1000 | 100 | 500 | 200 | 160 |
| q | $5.38\ 10^5$ | $3.18\ 10^3$ | 0.988 | 435.59 | 9.88 | 3.0209 |
| div | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |

Tableau 4.4 Recherche des facteurs d'échelle adéquats pour la localisation du mobile initialement à la position $(5km, 2km, 100m)$ avec 4 stations de base et $\sigma_t = 50m$

nous remarquons que la plus petite valeur de $q$ donnée par $\alpha = 160$ vaut 3.0209 (tableau 4.4), ce qui représente un grand écart entre l'erreur quadratique moyenne et la borne de Cramér Rao. Nous en déduisons que l'ajustement des facteurs d'échelle n'est pas optimal pour certaines positions du mobile.

- **Optimisation de la recherche des facteurs d'échelle**

  Pour remédier au problème de la non-optimalité de la méthode pour certaines positions initiales du mobile, la diminution des facteurs d'échelle au cours des itérations peut être raffinée. Au lieu de diviser les valeurs de $\alpha$ par les coefficients $cf_j = \frac{cf_0}{2^j}$, nous les remplacerons par les coefficients $cf_j = \frac{cf_0}{s^j}$. Plus la valeur de $s$ est petite (tout en restant supérieure à 1), plus raffinés seront les facteurs d'échelle. Ainsi, pour améliorer le positionnement, nous avons fixé $s = 1.4$. Les résultats de la recherche des facteurs d'échelle adéquats pour la localisation du mobile initialement à la position $(5km, 2km, 100m)$ avec 4 stations de base et $\sigma_t = 50m$ sont alors donnés par le tableau 4.5.

  Nous remarquons alors que la valeur de $\alpha$ correspondant au positionnement optimal est donnée par $\alpha = 38.416$. Notons que l'écart entre l'erreur quadra-

| | $\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow 7.1429\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{5.102}$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{3.6443}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 10000 | 1000 | 100 | 714.2857 | 140 | 38.416 |
| q | $5.38\ 10^5$ | $3.18\ 10^3$ | 0.988 | $1.28\ 10^3$ | 1.6413 | 1.0769 |
| div | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |

| | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{2.6031}$ | $\alpha \leftarrow 1.8593\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{1.3281}$ |
|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 14.7579 | 27.44 | 20.661 |
| q | 98.1674 | 106.3119 | 217.0351 |
| div | 99.7% | 2.44% | 93.3% |

Tableau 4.5 Recherche optimisée des facteurs d'échelle adéquats pour la localisation du mobile initialement à la position $(5km, 2km, 100m)$ avec 4 stations de base et $\sigma_t = 50m$

tique moyenne et la borne de Cramér Rao est réduit considérablement grâce à l'optimisation de la recherche des facteurs d'échelle adéquats.

Ainsi, pour différentes variances d'erreur, et en recherchant pour chaque configuration les facteurs optimaux, nous obtenons la figure 4.5 présentant les erreurs quadratiques générées par ce système.

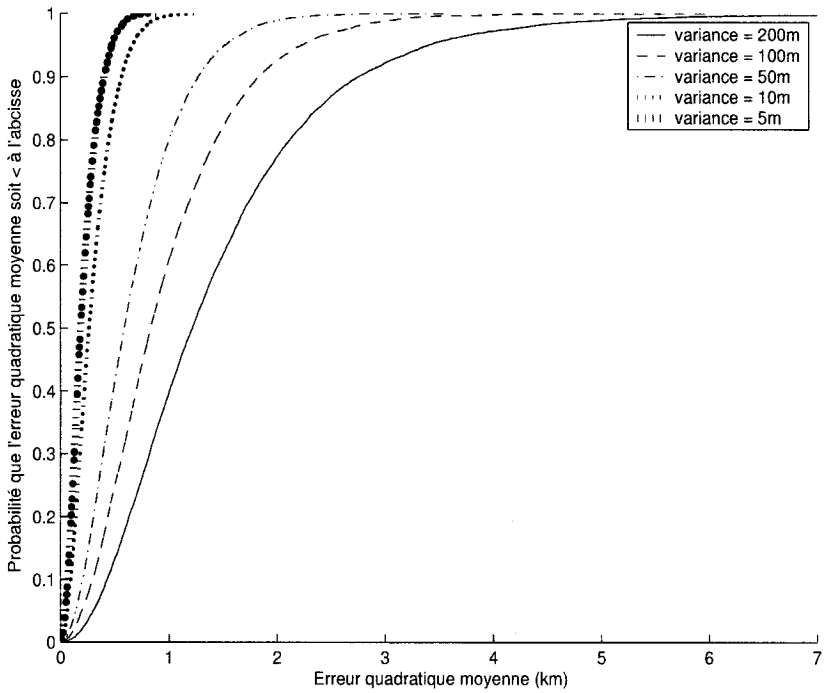



Figure 4.5 Localisation de la source initialement à la position $(x_0, y_0, z_0) = (5km, 2km, 100m)$ grâce au système tridimensionnel basé sur l'introduction des facteurs d'échelle optimisés pour les variances $\sigma_t = 200m, 100m, 50m, 10m$ et $5m$ avec $M = 4$

- **Efficacité de la méthode tridimensionnelle dans le cas de la proximité du mobile d'une station de base**

  Les résultats du positionnement utilisant la méthode basée sur l'introduction des facteurs d'échelle en trois dimensions peuvent être générés pour n'importe quelle position du mobile. Nous avons vu dans le chapitre précédent que si la source est proche de l'une des stations de base, le système bidimensionnel peut être inefficace. Par contre, la méthode tridimensionnelle est capable de positionner la source dans ce cas de figure. Pour cet effet, nous considérons l'exemple d'un mobile initialement situé à la position $(x_0, y_0, z_0) =$

| | $\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{10}$ | $\alpha \leftarrow 7.1429\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{5.102}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 10000 | 1000 | 100 | 10 | 71.4286 | 14 |
| q | $3.72\ 10^4$ | 152.0955 | 1.1406 | *err* | 1.3613 | *err* |
| div | 0% | 0% | 0% | 100% | 0% | 100% |

| | $\alpha \leftarrow 3.6443\alpha$ | $\alpha \leftarrow \frac{\alpha}{2.6031}$ | $\alpha \leftarrow 1.8593\alpha$ | $\alpha \leftarrow 1.3281\alpha$ |
|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 51.0204 | 19.6 | 36.4431 | 48.4003 |
| q | 8.084 | 14.8159 | 19.7451 | 11.7571 |
| div | 3.06% | 99.94% | 59.17% | 8.05% |

Tableau 4.6 Recherche des facteurs d'échelle optimisés pour la localisation du mobile initialement à la position $(8km, 4.75km, 100m)$, proche d'une station de base avec $M = 4$ et $\sigma_t = 100m$

$(8km, 4.75km, 100m)$, qui se trouve assez proche de la station de base $BS_2$. Pour une variance de l'erreur au niveau des retards de transmission fixée à $100m$, la méthode bidimensionnelle des séries de Taylor est incapable de fournir une estimée de la position de la source. Par contre, la méthode tridimensionnelle basée sur les facteurs d'échelle optimisés est capable de la localiser avec une bonne précision. Ces facteurs sont donnés par la valeur $\alpha = 100$ obtenue grâce aux itérations développées dans le tableau 4.6.

Notons que le rapport entre l'erreur quadratique moyenne et la borne de Cramér Rao est assez proche de l'unité, prouvant ainsi l'efficacité de l'estimateur tridimensionnel, même si le mobile se trouve assez proche d'une station de base. Cependant, si le mobile s'approche trop de la station de base, la méthode tridimensionnelle est capable de fournir une estimée de la position du mobile, mais la précision ne sera pas intéressante. Elle sera médiocre parfois, dépendamment de la différence d'ordre de grandeur entre les composantes bidimensionnelles et celle en hauteur. Les facteurs d'échelle sont capables d'ajuster l'effet des erreurs dues à cette différence dans certains cas, comme dans celui que nous avons présenté.

Ainsi, même si le mobile est proche de la station de base, la méthode tridimen-

sionnelle est quand même capable de trouver une solution pour l'inconvénient majeur que présente la méthode bidimensionnelle pour la localisation dans ce type de circonstances.

- **Comparaison des méthodes bidimensionnelle et tridimensionnelle**

  Il est intéressant également de comparer les systèmes de localisation respectivement en 2D et en 3D au niveau du degré de performance. Pour cet effet, nous avons comparé les résultats du positionnement du mobile en 2D en utilisant les méthodes bidimensionnelle et tridimensionnelle. Les erreurs quadratiques générées par chacune des méthodes sont exposées dans la figure 4.6.

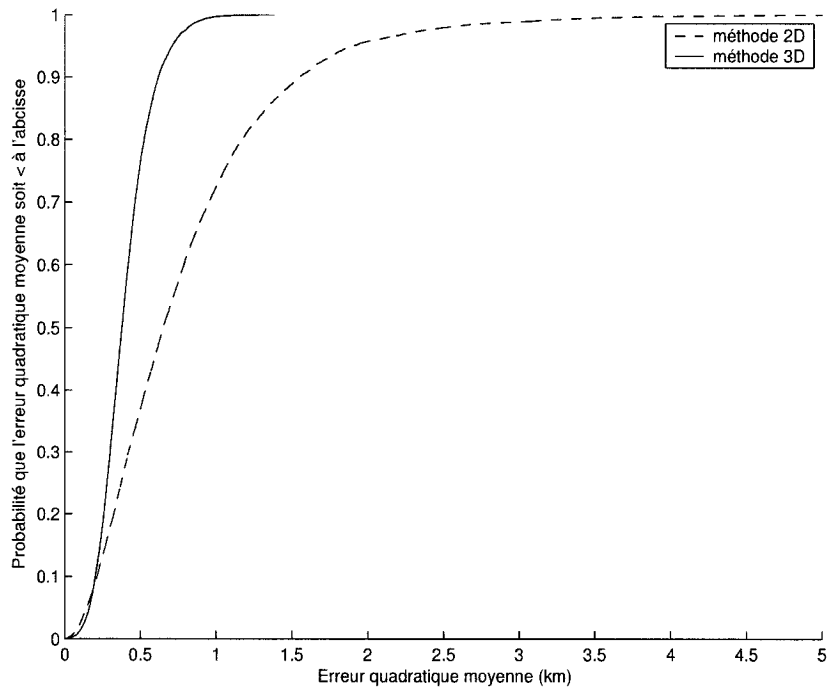



Figure 4.6 Localisation en 2D du mobile initialement à la position $(x_0, y_0, z_0) = (5km, 2km, 100m)$ avec $M = 4$ et $\sigma_t = 200m$ en utilisant les méthodes bidimensionnelle et tridimensionnelle

Nous remarquons que l'erreur quadratique moyenne générée par la localisation en utilisant la méthode tridimensionnelle est réduite considérablement par rapport à celle générée par la méthode bidimensionnelle. Cette nouvelle méthode est donc nettement plus précise, mais elle demeure plus complexe par rapport à la méthode de positionnement en 2D.

La comparaison entre les méthodes peut se faire également en visualisant la proximité de l'erreur quadratique moyenne générée par chaque méthode, de la borne de Cramér Rao. Cette proximité peu être exprimée par le rapport entre les erreurs générées et les valeurs des bornes de Cramér Rao. Dans la figure 4.7, les deux courbes représentant cette proximité sont pratiquement confondues. Même si, pour la localisation en 3D, des erreurs supplémentaires dues à la troisième dimension pouvant affecter la précision des résultats sont ajoutées par rapport à la localisation dans un espace bidimensionnel, le rapport entre les erreurs et la borne de Cramér Rao est pratiquement le même pour les deux méthodes, prouvant encore l'efficacité du système de positionnement tridimensionnel considéré.

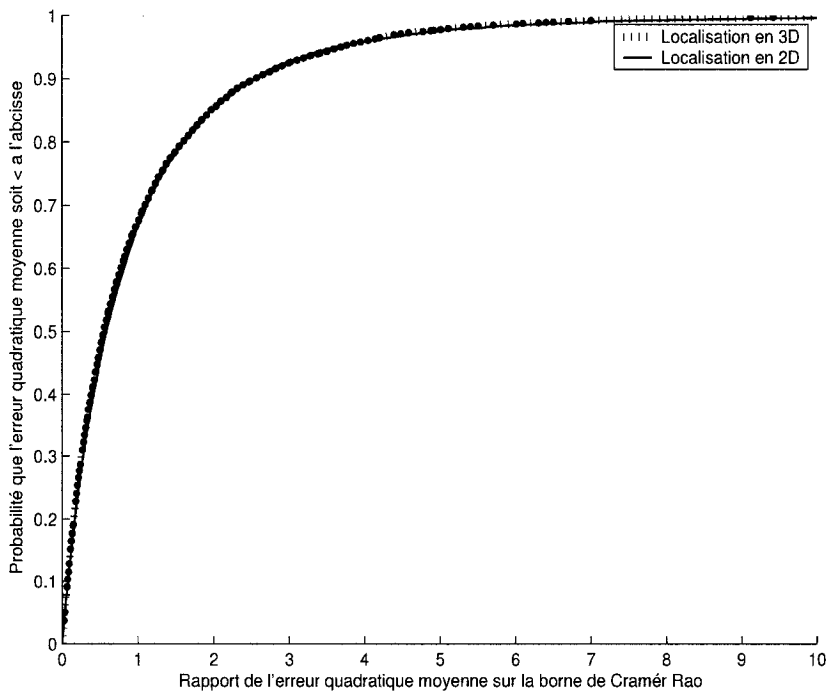



Figure 4.7 Comparaison de la proximité MSE/CRLB entre les méthodes de localisation en 2D et en 3D pour un mobile initialement à la position $(3km, 3km, 27m)$ avec $M = 4$ et $\sigma_t = 50m$

Pour mieux visualiser la proximité de ces courbes, un zoom sur une partie de la figure 4.7 est représenté dans la figure 4.8 ci-dessous.

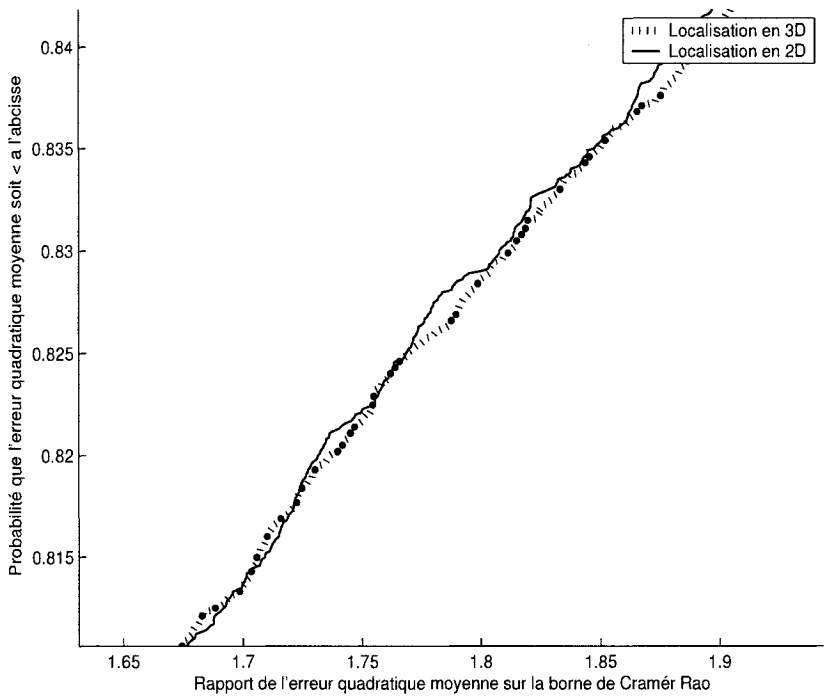



Figure 4.8 Zoom sur la figure 4.7

- **Précision de l'estimation de l'altitude $z$ par la méthode tridimensionnelle:**

  Pour mieux visualiser la précision de l'estimation fournie par la méthode tridimensionnelle au niveau de l'altitude du mobile, nous avons représenté dans les figures 4.9 et 4.10 les erreurs quadratiques de la troisième dimension $z$ générées par la méthode de positionnement en 3D pour des mobiles à différentes positions initiales. L'erreur quadratique moyenne évaluée dans ce cas est donnée par:

$$RMS(z) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \sqrt{(z_{v_k} - z_0)^2} \tag{4.7}$$

  $N$ étant le nombre d'itérations considéré lors des simulations ($N = 10000$).

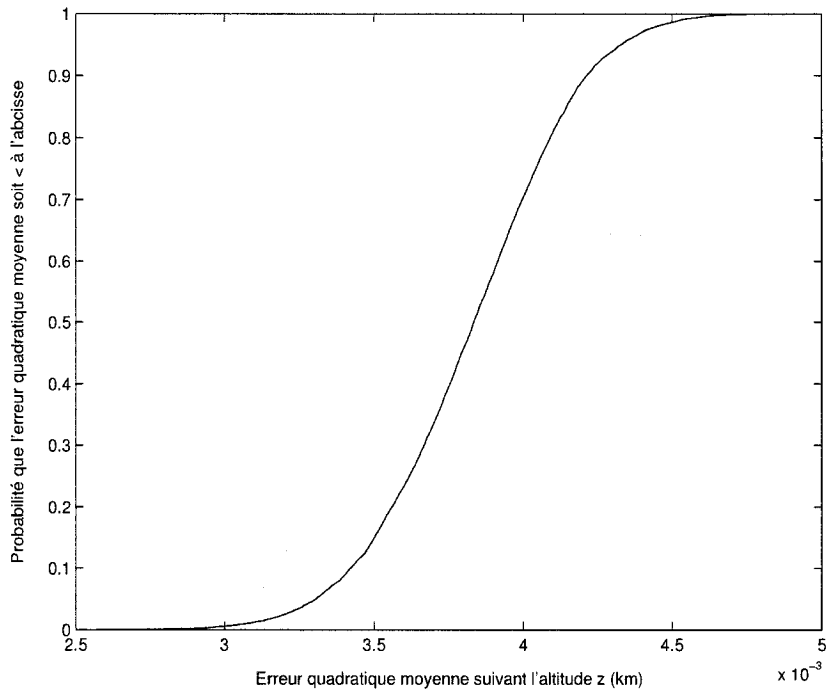



Figure 4.9 Erreurs quadratiques de l'estimation de la composante $z$ pour un mobile initialement à la position $(3km, 3km, 27m)$ avec $M = 4$ et $\sigma_t = 200m$

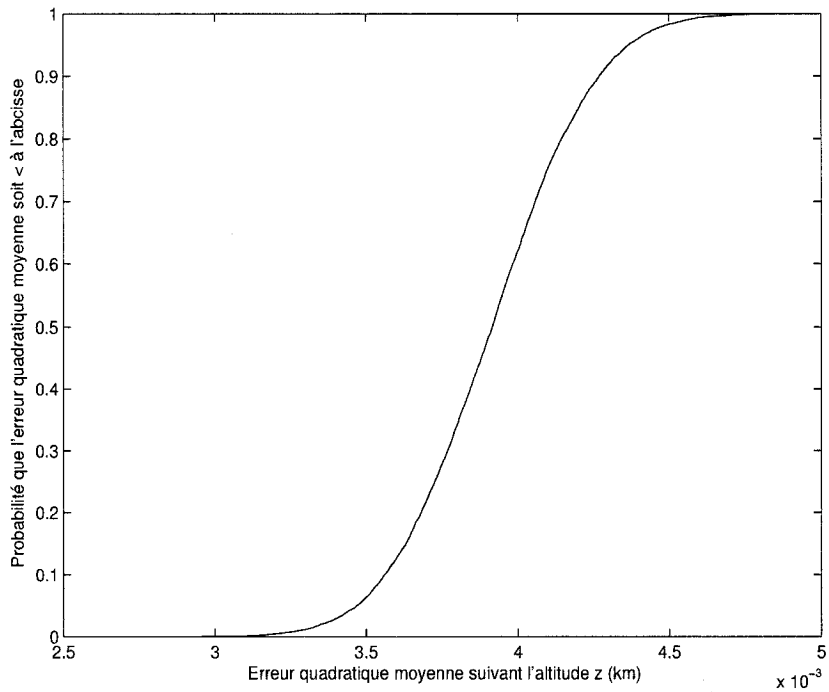



Figure 4.10 Erreurs quadratiques de l'estimation de la composante $z$ pour un mobile initialement à la position $(5km, 2km, 100m)$ avec $M = 4$ et $\sigma_t = 200m$

Nous remarquons, d'après les figures 4.9 et 4.10, que les erreurs quadratiques générées sont très faibles. L'estimation de l'altitude du mobile est donc assez précise, voire même plus précise que l'estimation des composantes bidimensionnelles.

## 4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, une méthode de localisation tridimensionnelle a été proposée. L'introduction de facteurs d'échelle et leur adaptation aux conditions de chaque positionnement ont été présentées en s'appuyant sur des exemples de résultats

de simulation. Une analyse de performance de la méthode a permis de montrer l'efficacité de l'estimateur pour positionner un mobile en 3D. Une comparaison de ce système aux méthodes hyperboliques bidimensionnelles a montré également que la précision des résultats de positionnement en 2D a été améliorée.

# CHAPITRE 5

# CONCLUSION

## 5.1 Bilan de la recherche réalisée

Dans ce travail, nous avons étudié deux systèmes de positionnement bidimensionnels: les systèmes hyperboliques et les systèmes hybrides basés sur les TDOA et les AOA. L'étude de performance de ces deux méthodes nous a permis de constater qu'une mesure d'angle ajoutée aux retards de transmission utilisés dans les systèmes hyperboliques permet d'améliorer les résultats du positionnement. Une mesure d'angle supplémentaire permet encore une meilleure localisation. L'analyse de la performance des systèmes hyperboliques a été présentée également en fonction de la proximité mobile-station de base.

Ensuite, nous avons proposé une méthode de positionnement en trois dimensions. Cette méthode se base sur l'introduction de facteurs d'échelle dans la méthode de linéarisation des séries de Taylor. Le choix de ces facteurs a été explicité lors de la présentation de la méthode. Une technique adaptative a permis de les raffiner pour maximiser la précision de la localisation du mobile. Une analyse de performance de cette méthode a été exposée. Les résultats de localisation ont été également comparés à ceux obtenus par la méthode hyperbolique pour la localisation en 2D et ont montré qu'ils étaient capables de les améliorer. Cependant, la complexité de la méthode tridimensionnelle porte souvent à choisir la méthode hyperbolique dans ce cas de figure car le temps de traitement peut être assez important.

Par contre, nous avons constaté que dans certains cas, la méthode tridimensionnelle peut fournir des résultats de localisation que la méthode en 2D est incapable d'estimer. Ainsi, la méthode proposée a permis de trouver des solutions aux lacunes

que présentent les méthodes bidimensionnelles. De plus, notre simulateur a donné des précisions assez importantes sur l'estimée de l'altitude du mobile, information nécessaire au bon fonctionnement des services d'appels d'urgence par exemple.

## 5.2 Améliorations envisageables et travaux futurs

Ce travail peut être sujet à quelques améliorations. Pour appliquer la méthode tridimensionnelle, il est nécessaire d'ajuster les facteurs d'échelle pour chaque positionnement et le nombre d'itérations utilisées à cet effet peut être assez important, dépendamment de la précision que nous recherchons. Il serait intéressant de concevoir le même simulateur mais avec des logiciels plus performants et de présenter la méthode de façon plus optimale. Il serait également envisageable d'améliorer encore la méthode basée sur les facteurs d'échelle en introduisant des mesures d'angles d'arrivée des signaux.

Tout au long de ce mémoire, les stations réceptrices ont été supposées en ligne de vue directe avec le mobile. Pour traiter le cas de NLOS (non line of sight), nous pourrions introduire des modèles de multitrajets dans la méthode des facteurs d'échelle et étudier la performance de ce type d'estimateur.

La localisation dans ce travail a été étudiée en extérieur. L'étude de la faisabilité du positionnement tridimensionnel basé sur des facteurs d'échelle en intérieur pourrait faire l'objet d'autres lignées de recherche.

# RÉFÉRENCES

[1] Cong, L. (2003), "Mobile location in wideband CDMA communication systems", *"Thèse de Doctorat de University of waterloo, Waterloo, Canada"*

[2] Davis, J. R. (1998), "The Department of Transportation Loran-C study", *Position Location and Navigation Symposium, IEEE*, pp. 93-100

[3] Potts, C. E. (1977), "Loran-C: Yesterday, today and tomorrow", *Oceans*, vol. 9, pp. 493-497

[4] Kaplan, E. D. et Hegarty, C. J. (2006), *"Understanding GPS: Principles and applications"*, Artech House, second edition

[5] Brown, A. et Silva, R. (1994), "TIDGET mayday system for motorists", *Position Location and Navigation Symposium, IEEE*, pp. 480-486

[6] Rappaport, T. S., Reed, J. H. et Woerner, B. D. (1996), "Positioning Location Using Wireless Communications on Highways of the Future", *IEEE Communications Magazine*, pp. 33-41

[7] Vossiek, M., Wiebking, L., Gulden, P., Wieghardt, J. et Hoffmann, C. (2003), "Wireless Local Positioning: Concepts, Solutions, Applications", *Radio and Wireless Conference, 2003. RAWCON '03. Proceedings*, pp. 219-224

[8] Liberti, J. C. et Rappaport T. S. (1999), *Smart Antennas for Wireless Communications*, Prentice Hall PTR

[9] Mizusawa, G. A. (1996), "Performance of hyperbolic position location techniques for code division multiple access", *"Mémoire de maîtrise de Virginia Polytechnic institute, Blacksburg, Virginia"*

[10] Aatique, M. (1997), "Evaluation of TDOA techniques for position location in CDMA systems", *"Mémoire de maîtrise de Virginia Polytechnic institute, Blacksburg, Virginia"*

[11] Ghavami, M., Michael, L. B. et Kohno, R. (2004), *Ultra Wideband signals and systems in communication engineering*, John Wiley and sons, Ltd

[12] Hahn, W. R. et Tretter, S. A. (1973), "Optimum processing for delay vector estimation in passive signal array", *IEEE transactions on information theory*, vol. IT-19, pp. 608-614

[13] Hahn, W. R. (1975), "Optimum signal processing for passive sonar range and bearing estimation", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 58, pp. 201-207

[14] Chan, Y. T. (1994), "A simple and efficient estimator for hyperbolic location", *IEEE transactions on signal processing*, vol. 42, pp. 1905-1915

[15] Foy, W. H. (1976), "Position location solution by taylor series estimation", *IEEE transactions on aerospace ans electronic systems*, vol. AES-12, pp. 187-194

[16] Torrieri, D. J. (1984), "Statistical theory of passive location systems", *IEEE transactions on aerospace ans electronic systems*, vol. AES-20, pp. 183-198

[17] Hahn, W. R. (1975), "Optimum signal processing for passive sonar range and bearing estimation", *Journal of the acoustical society of America*, vol. 58, pp. 201-207

[18] Knapp, C. H. et Carter, G. C. (1976), "The generalized correlation method for estimation of time delay", *IEEE transactions on acoustic speech and signal processing*, vol. ASSP-24, pp. 320-327

[19] Mendel, J. R. (1986), *Lessons in digital estimation theory*, Prentice hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey

# ANNEXE I

# GUIDE D'UTILISATION DU SIMULATEUR

Le logiciel développé permet de simuler les méthodes de positionnement présentées dans les chapitres 3 et 4: la méthode hyperbolique et la méthode hybride en deux dimensions ainsi que la méthode basée sur les facteurs d'échelle dans l'espace tridimensionnel. Ainsi, le simulateur peut se décomposer en trois fonctions principales: *tdoa-taylor*, *tdoa-aoa-taylor* et *best-weight*.

## I.1 La fonction *tdoa-taylor*

Ce programme permet d'estimer la position du mobile en deux dimensions grâce à la méthode hyperbolique, basée sur les différences des retards de transmission (TDOA).

### I.1.1 Paramètres d'entrée

Les paramètres d'entrée de ce programme sont:

- $M$: représente le nombre de stations de base. Le nombre des stations de base utilisées par le simulateur peut varier de 3 à 7, selon les considérations de la simulation. Les positions de ces stations sont déterminées dans notre cas selon la disposition présentée dans la figure 3.3.
- $(x_0, y_0)$: position initiale du mobile en 2D. Cette position peut être calculée à partir de 3 stations de base.

- *noise-var*: la variance des erreurs relatives aux distances entre le mobile et les stations de base.

### I.1.2 Paramètres de sortie

Ce programme présente comme paramètres de sortie les résultats suivants:

- Distribution des erreurs quadratiques relatives aux différentes estimations du positionnement.
- $MSE$: erreur quadratique moyenne des estimées du positionnement.
- $CRLB$: borne inférieure de Cramér Rao.

### I.1.3 Exemple de simulation

Pour illustrer la méthode hyperbolique, nous simulons le positionnement d'un mobile en 2D à l'aide de 4 stations de base avec $(x_0, y_0) = (5, 2)km$ et *noise-var*$= 0.1km$. Les valeurs du $MSE$ et du $CRLB$ obtenues sont:

$$\begin{cases} MSE = 0.4861 \\ CRLB = 0.4240 \end{cases}$$

Les erreurs générées par le système sont données par la figure I.1:

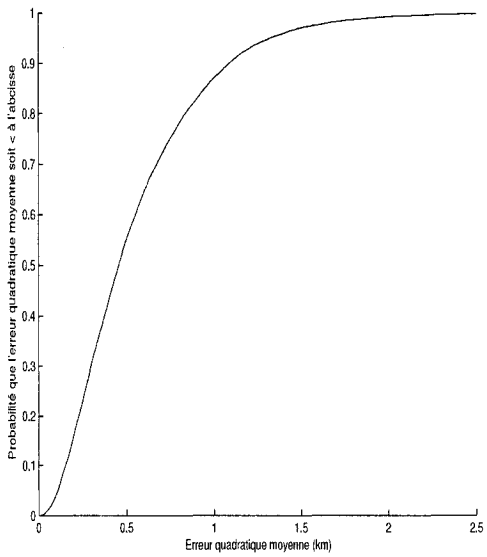



Figure I.1 Utilisation de la méthode hyperbolique pour la localisation du mobile avec $M = 4$, $(x_0, y_0) = (5, 2)km$ et *noise-var*$= 0.1km$

## I.2 La fonction *tdoa-aoa-taylor*

Cette fonction permet d'estimer la position du mobile en utilisant la méthode hybride basée sur les TDOA et les AOA.

### I.2.1 Paramètres d'entrée

Les paramètres d'entrée de ce programme sont:

- $M$: nombre de stations de base. La disposition de ces stations et leur nombre sont les mêmes que dans *tdoa-taylor* pour toutes les fonctions.
- $(x_0, y_0)$: position initiale du mobile en 2D.

- *noise-var*: la variance des erreurs relatives aux distances entre le mobile et les stations de base.
- *varb*: la variance des erreurs angulaires au niveau de l'angle d'arrivée du signal (AOA) en radian.

### I.2.2 Paramètres de sortie

Ce programme présente comme paramètres de sortie les résultats suivants:

- Distribution des erreurs quadratiques relatives aux différentes estimations du positionnement. Cette distribution sera comparée à celle de la méthode précédente.
- $MSE$: erreur quadratique moyenne des estimées du positionnement.
- $CRLB$: borne inférieure de Cramér Rao

### I.2.3 Exemple de simulation

Pour illustrer la méthode hybride considérée et pour la comparer à la méthode hyperbolique, nous simulons le positionnement du mobile en 2D à l'aide de 4 stations de base avec $(x_0, y_0) = (5, 2)km$, *noise-var*$= 0.1km$ et $varb = 0.017453rad$. Ainsi, le résultat des erreurs obtenues est donné par la figure I.2. La courbe obtenue à l'aide de *tdoa-taylor* se trouve au dessous de celle obtenue par *tdoa-aoa-taylor*.

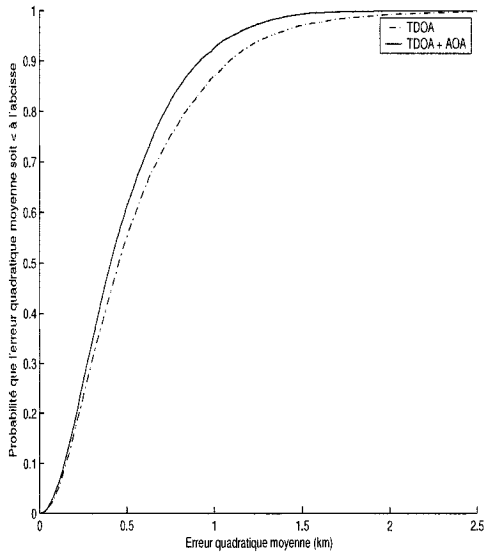



Figure I.2 Comparaison des méthodes hyperbolique et hybride pour la localisation du mobile avec $M = 4$, $(x_0, y_0) = (5, 2)km$, *noise-var*$= 0.1km$ et $varb = 0.017453rad$

Les valeurs du $MSE$ et du $CRLB$ obtenues par la méthode hybride sont:

$$\begin{cases} MSE = 0.3309 \\ CRLB = 0.2533 \end{cases}$$

## I.3 La fonction *best-weight*

Cette fonction calcule les meilleurs facteurs d'échelle permettant de déterminer la position du mobile en trois dimensions. Elle est dotée d'un ensemble de paramètres d'entrée définis ci-dessous:

### I.3.1 Paramètres d'entrée

Les paramètres d'entrées du simulateur sont:

- $M$: nombre de stations de base disposées comme précédemment.
- $(x_0, y_0, z_0)$: position initiale du mobile
- *noise-var*: la variance du bruit relatif aux retards de transmission, ou à un coefficient près, aux erreurs de distance entre la station mobile et les différentes stations de base.
- Le coefficient $cf_0$: ce coefficient est fixé à 10 au début du programme puis il sera ajusté au cours de la méthode adaptative afin d'équilibrer l'effet des erreurs sur les trois dimensions.
- Le facteur $s$: il s'agit d'un facteur qui permet de raffiner la méthode des facteurs d'échelle pour localiser le mobile afin de bénéficier de plus de précision. Ce paramètre est fixé à 2 en général. Si les résultats du positionnement ne sont pas assez raffinés, $s$ prend la valeur 1.4 pour plus de précision.

### I.3.2 Paramètres de sortie

Les paramètres de sortie du simulateur sont:

- Distribution des erreurs quadratiques relatives aux différentes estimées du positionnement.
- $MSE$: l'erreur quadratique moyenne
- $CRLB$: la valeur de la borne de Cramér Rao

- $q$: le rapport entre l'erreur quadratique moyenne et la borne de Cramér Rao. Ce rapport sera le rapport final le plus proche possible de l'unité obtenu à la fin de la méthode adaptative basée sur les facteurs d'échelle.
- $\alpha$: il s'agit de la valeur finale de $\alpha$ donnant les meilleurs facteurs d'échelle permettant de positionner le mobile en 3D.
- *div*: c'est le taux de divergence, s'il existe, noté au cours des itérations réalisées.

### I.3.3 Exemple de simulation

Pour illustrer la méthode, nous simulons le positionnement du mobile en 3D à l'aide de 4 stations de base. Le mobile est initialement à la position $(x_0, y_0, z_0) = (3, 3, 0.027)km$ avec *noise-var*= $50m$, $cf_0 = 10$ et $s = 2$. Les paramètres obtenues sont les suivants:

$$\begin{cases} MSE = 0.1177 \\ CRLB = 0.1158 \\ q = 1.0168 \\ \alpha = 125 \\ div = 0\% \end{cases}$$

Les erreurs générées par l'estimateur sont données par la figure I.3.

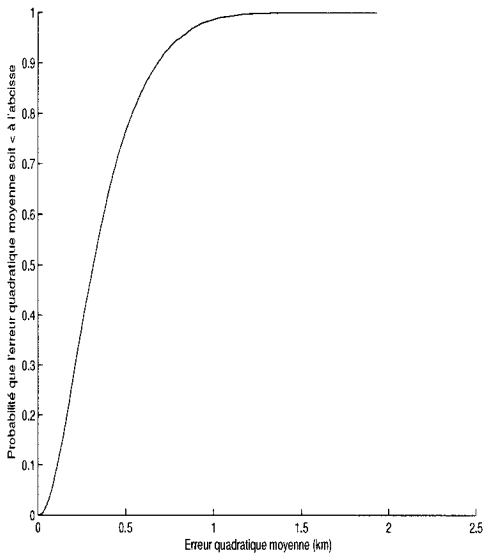



Figure I.3 Erreurs de positionnement du mobile en 3D pour un mobile initialement à la position $(x_0, y_0, z_0) = (3, 3, 0.027)km$ avec *noise-var*$= 50m$ et $M = 4$