

THESE

Présentée et soutenue publiquement à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité Electronique

par

Charles TATKEU
Ingénieur EUDIL



Le 29 Janvier 1999

FAISABILITE DE LA LOCALISATION DE MOBILES TERRESTRES PAR RADIOGONIOMETRIE ET A L'AIDE D'UN RESEAU DE RADIOTELEPHONIE GSM

- | | | | |
|------------------|-----|-----------|-----------------------|
| Membres du Jury: | Mr | DEGAUQUE | Directeur de Thèse |
| | Mme | BERBINEAU | Co-Directeur de thèse |
| | MM | EL ZEIN | Rapporteur |
| | | ROUVAEN | Rapporteur |
| | | BRIQUET | Examineur |
| | | DUVOCELLE | Examineur |
| | | HEDDEBAUT | Examineur |

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Laboratoire d'Electronique Ondes et signaux pour les Transports (LEOST) de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS), dirigé par Monsieur Marc HEDDEBAUT, en étroite collaboration avec le Laboratoire de RadioPropagation et Electronique (LRPE) de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), dirigé par Monsieur le Professeur Pierre DEGAUQUE.

J'exprime mes plus vifs remerciements à Monsieur Marc HEDDEBAUT, Directeur de recherche de l'unité LEOST pour m'avoir accueilli dans son Laboratoire et d'avoir mis à ma disposition des outils nécessaires et des conseils éclairés pour le bon déroulement de cette thèse. Je remercie le Professeur Pierre DEGAUQUE d'avoir suivi et dirigé ces travaux.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Madame Marion BERBINEAU, Chercheur à l'INRETS, pour avoir co-dirigé ce travail. Son soutien et ses encouragements permanents ont été déterminants à la rédaction et à l'aboutissement de cette thèse.

Je remercie Monsieur le Professeur ROUVAEN de l'Université de Valenciennes et Monsieur EL ZEIN, Maître de Conférences-HDR de l'Université de Rennes qui m'ont fait l'honneur, en tant que rapporteurs, d'examiner et de juger ce travail.

Je remercie Messieurs Philippe BRIQUET, Chargé de Recherche au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, et Bruno DUVOCELLE, Ingénieur responsable de l'Ingénierie cellulaire à France Telecom mobile, pour l'intérêt qu'ils portent à mes travaux. Leur participation au jury m'honore.

J'exprime toute ma reconnaissance à Marco KLINGER, Chercheur à l'INRETS, pour sa collaboration et son aide dans les différents développements logiciels. Mes remerciements s'adressent aussi à Jean RIOULT et Jean-Pierre GHYS pour leur aide précieuse pour le développement des cartes et la participation active aux expérimentations. Je remercie également Marielle SZELAG pour ses encouragements permanents et son aide pour le pilotage des instruments de mesures. Qu'ils soient assurés de toute mon estime.

Je ne terminerai pas sans exprimer mes remerciements à Christian HYPACE et Daniel BOURBOTTE qui ont contribué à l'élaboration de ce document.

Enfin, je tiens à remercier tout le personnel de l'INRETS et particulièrement l'équipe du LEOST au sein de laquelle j'ai travaillé, pour leur aide sympathique.

DEDICACES

Le moment est venu de signaler ma reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin m'ont accompagné tout au long de ces années de travail et d'études.

Je dédie ce mémoire

A mon cher papa YOMI et à ma chère maman MBIAKOP qui m'ont donné de connaître l'exaltante aventure des études. Merci surtout pour les valeurs éducatives que vous m'avez inculquées.

A mes frères et sœurs : Charlotte, Marie-Claire, Judith, Valéry, Erick, Rophine, Christian, Yannick et Laure qui m'ont toujours entouré de leurs sollicitudes et de leur amour.

A Pâ TATNKE pour ton soutien sans faille et tes encouragements permanents pour que je sois toujours parmi les meilleurs.

A mes très regrettés grands-parents, oncles et tantes partis trop tôt... Je suis convaincu que cet humble travail vous aurait fait plaisir.

A ma grande famille entière ainsi qu'à ma belle famille, merci pour toute l'affection que vous me portez.

A mes amis Sergio, Atika, à mes amis de Lille et d'ailleurs, à ceux de l'ASC et du LUC, je vous dédie ce modeste mémoire car il est un peu de vous tous.

A mes amis d'enfance de Nkomkana et de toujours qui m'ont révélé à moi-même : Jacques, Alain, Guy-Bertrand, Platini Etc...

Le bouquet final est réservé

A Sévigné mon épouse qui partage désormais ma vie et qui, en plus de tout l'amour qu'elle me voue, va bientôt m'offrir le plus beau cadeau qu'une femme puisse offrir à son mari. " Bébé ", nous attendons avec impatience le jour J de ta venue.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	1
DEDICACES	2
Table des matières	3
Table des illustrations	5
INTRODUCTION GENERALE	8
Chapitre I : Principaux procédés de localisation des mobiles terrestres	11
1. Introduction.....	11
2. La localisation par satellites.....	12
2.1 Description du réseau GPS-NAVSTAR, GLONASS	12
2.2 Principe de la localisation par satellites ou GPS	14
2.3. Systèmes de références pour les coordonnées GPS	16
2.4 Corrections différentielles du GPS et perspectives d'avenir	17
3. La localisation par les systèmes hyperboliques.....	18
3.1 Le système LORAN C	19
4. La localisation par le radiotéléphone cellulaire GSM.....	20
4.1 Description du réseau de radiotéléphone pan européen GSM	20
4.2 Principe de la localisation à partir du radiotéléphone GSM.....	23
4.3 Cas des stations de base du GSM synchronisées.....	26
4.4 Localisation à partir d'un réseau d'émetteurs DAB - SFN	26
5. La localisation par radiogoniomètre.....	27
5.1 Description des différents types de radiogoniomètre	27
5.2 Principe de la localisation par radiogoniomètre.....	34
6. Conclusion	36
Chapitre II : Utilisation des signaux de stations de base d'un réseau de radiotéléphone GSM	37
1. Introduction.....	37
2. Les paramètres du système GSM nécessaires pour la localisation et le principe du calcul des coordonnées du mobile	38
2.1 Les identificateurs des cellules.....	38
2.2 Le TxPower ou la puissance à émettre par le mobile.....	39
2.3 Le RxLev et RxQual, le niveau et la qualité du signal reçu par le mobile	39
2.4 Le paramètre TA ou Timing Advance	39
2.5 Calcul des coordonnées du mobile à partir du paramètre Timing Advance	40
3. Les techniques développées pour forcer les handovers.....	41
3.1. Modification du RxQual par brouillage du signal de la BTS	43
3.2 Modification du RxLev ou niveau de signal reçu de la BTS courante.....	44
3.3 Association des deux solutions techniques développées.....	58
3.4 Quelques pistes pour l'amélioration du calcul de la distance Mobile-Station de base	61
3.5 Développement d'une source agile en fréquence	63
3.6 La source agile en fréquence commandée par les messages de signalisation du mobile de tests	64
4. Conclusion	68
Chapitre III : Utilisation des signaux des émetteurs de radiodiffusion pour la localisation des mobiles par radiogoniométrie.....	69
Introduction.....	69
Première Partie : Méthodes de mesures d'angles de gisement des émetteurs	70
1. Introduction.....	70
2. Approche théorique de mesure d'angle de gisement	71
2.1 Introduction aux notions de la théorie uniforme de diffraction (TUD)	71
2.2 Etude de la propagation des signaux radioélectriques le long d'une rue.....	73

3. Développement et caractérisation des antennes dans la bande de fréquences 100-1000 MHz	75
3.1 Caractéristiques des antennes et principe de la mesure des angles de gisement.....	75
3.2 Développement des antennes dans la bande 100-1000 MHz.....	80
4. Mesures expérimentales avec les capteurs développés	84
4.1 Les performances en applications de rase campagne dans la bande de fréquence de 100, 500 et 1000 MHz	85
4.2 Effets des signaux directs et réfléchis sur les mesures angulaires	87
4.3 Effets d'absence de signal direct entre émetteur et récepteur sur les relevés d'angle de gisement	90
4.4 Mesures d'angle de gisement des émetteurs conventionnels.....	95
5. Conclusion de la première partie	97
Seconde Partie: Validation de la méthode de mesures et mise en œuvre de la localisation des mobiles à l'aide d'un radiogoniomètre Doppler.....	98
1. Introduction.....	98
2. Caractéristiques et performances du radiogoniomètre DOPPLER.....	99
2.1 Caractéristiques physiques et mécaniques.....	99
2.2 Caractérisation des paramètres du radiogoniomètre Doppler	100
2.3 Caractérisation du fonctionnement du radiogoniomètre Doppler	103
3. Expérimentations en milieu urbain ou suburbain	109
3.1 Performances du radiogoniomètre Doppler en présence ou non d'obstacles.....	109
3.2 Mesures d'angles de gisement des émetteurs conventionnels en milieu suburbain	113
3.3 Application à la localisation des mobiles par radiogoniométrie.....	122
Conclusion du chapitre III	125
Chapitre IV : Perspectives et introduction à la fusion des données des deux systèmes de localisation	127
1. Introduction.....	127
2. Concept et algorithmes de fusion des données: exploitation de la complémentarité des deux techniques de mesures	127
3. Mise en œuvre de la fusion : comparaison des trois méthodes de calcul de la position du mobile (barycentre, médiane et mode).....	136
4. Conclusion	138
CONCLUSION GENERALE.....	139
Références bibliographiques	142
Annexe I:	146
1. Etude du fonctionnement du synthétiseur et du VCO du mobile de tests GSM	146
2. Mise en œuvre d'une source de brouillage de fréquences pilotée par le VCO interne du mobile de tests	151
Annexe II:	153
1. Schémas de la carte de la source agile en fréquence développée.....	153
Annexe III-1:.....	156
1. Résultats de calculs des diagrammes de rayonnement des antennes retenues dans les bandes FM, VHF et UHF	156
Annexe III-2:.....	158
1. Méthodes de traitement des données et d'extraction de l'angle de gisement de l'émetteur	158
1.1. la moyenne mobile d'ordre N ou moyenne glissante	158
1.2. la méthode morphologique.....	159
1.3. le traitement statistique des données: répartition des données en classes.....	159
2. Radiogoniomètres Doppler muni des antennes demi-ondes : caractérisation et mesures d'angles de gisement.....	160
2.1. Caractérisation du radiogoniomètre Doppler muni des antennes demi-ondes.....	160

Table des illustrations

Figure 1.1 : Repère pour le calcul de la position du mobile par GPS	14
Figure 1.2: Influence de la géométrie des satellites sur la précision de localisation	16
Figure 1.3 : Principe de localisation par le système hyperbolique	18
Figure 1.4: Eléments de base d'un système de radiotéléphonie cellulaire	21
Figure 1.5 : Principe de l'alignement adaptatif de trame dans le GSM.....	23
Figure 1.6 : Concept de la localisation par réseau téléphonique cellulaire	24
Tableau 1 : Précision de la localisation possible en fonction du nombre de BTS.....	24
Figure 1.7 : Notion de GDOP, cas de deux stations de base du réseau GSM	25
Figure 1.8: Champ électrique induit dans le cadre en fonction de son orientation.....	28
Figure 1.9: Champ électrique induit dans le cadre et l'antenne en fonction de l'orientation.....	29
Figure 1.10: Radiogoniomètre Bellini-Tosi	30
Figure 1.11: Radiogoniomètre Adcock	30
Figure 1.12: Radiogoniomètre Watson-Watt	31
Figure 1.13: Radiogoniomètre à commutation de diagramme.	32
Figure 1.14: Radiogoniomètre Doppler : une antenne tournant.	33
Figure 1.15: Principe de repérage d'un récepteur mobile par triangulation.....	34
Figure 2.1 : Etapes de calcul de l'intersection de deux cercles	40
Figure 2.2 : Solutions techniques développées pour forcer les " handovers "	42
Figure 2.3 : Dispositif de brouillage du signal reçu de la station courante.	43
Figure 2.4 : Comparaison schématique des deux diagrammes de rayonnement.....	44
Tableau 1 : Résultats des essais au Point A en milieu suburbain.....	46
Figure 2.5-a: Détermination de la position du mobile au Point A par GSM.	47
Figure 2.5-b: Détermination de la position du mobile au Point A par GSM.....	48
Tableau 2 : Résultats des essais au Point B en milieu urbain.....	48
Figure 2.6 : Détermination de la position du mobile au Point B par GSM.	49
Tableau 3 : Résultat au Point C en milieu urbain.....	50
Figure 2.7-a: Détermination de la position du mobile au Point C par GSM.	51
Figure 2.7-b : Détermination de la position du mobile au Point C par GSM.....	51
Tableau 4 : Résultat au Point D en milieu urbain.....	52
Figure 2.8-a: Détermination de la position du mobile au Point D par GSM.	53
Figure 2.8-b: Détermination de la position du mobile au Point D par GSM.....	53
Tableau 5 : Résultat au Point E en milieu urbain	54
Figure 2.9-a: Détermination de la position du mobile au Point E par GSM.	55
Figure 2.9-b: Détermination de la position du mobile au Point E par GSM.	55
Tableau 6 : Résultat au Point F en zone rurale.....	56
Figure 2.10 : Détermination de la position du mobile au Point F par GSM.....	57
Tableau 7 : Résultats des essais au Point G en milieu suburbain.	58
Tableau 8 : Résultats des essais au Point H en milieu suburbain.	58
Tableau 9 : Résultats des essais au Point I en milieu suburbain.....	58
Tableau 10 : Valeurs de référence GSM pour le temps de transmission point à point.....	63
Photo 1 : Source agile en fréquence développée pour la localisation par GSM.....	64
Figure 2.11 : Banc complet de la localisation des mobiles par GSM.....	65
Tableau 11 : Essai 1 - résultat au Point J en milieu suburbain.	66
Tableau 12 : Essai 2 - résultat au Point J en milieu suburbain.	66
Tableau 13 : Essai 3 - résultat au Point J en milieu suburbain.	66
Figure 3.1 : Positions de l'émetteur et du récepteur	74
Figure 3.2 : Résultats de simulation de la déviation angulaire.....	74
Figure 3.3 : Diagrammes de rayonnement des antennes "cardioïdes" et "Yagi-Uda".....	76

Figure 3.4 : Dispositif de relevés des signaux et de mesure d'angle de gisement.....	77
Figure 3.5-a : Relevés obtenus à 106.6 MHz (coordonnées polaires).....	78
Figure 3.5 -b: Relevés obtenus à 945.5 MHz (coordonnées polaires).	78
Figure 3.6-a : Relevés obtenus à 106.6 MHz(coordonnées cartésiennes).	78
Figure 3.6-b : Relevés obtenus à 945.5 MHz (coordonnées cartésiennes).....	79
Figure 3.7 : Procédés de mesure d'angle dans le cas du multichemins.	80
Figure 3.8 : Caractéristiques physiques et mécaniques de l'antenne à 100 MHz.....	81
Figure 3.9 : Diagramme de rayonnement des radiogoniomètres cardioïdes réalisés.....	81
Figure 3.10 : Antenne UHF sur coupleur microstrip.....	82
Figure 3.11 : Diagramme de rayonnement de l'antenne UHF sur coupleur microstrip.....	83
Figure 3.12 : Antennes UHF placées au-dessus de deux plans sécants.....	83
Figure 3.13 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne UHF (sur deux plans sécants).	84
Figure 3.14 : Signaux reçus avec les antennes omnidirectionnelles.....	85
Figure 3.15.1 : Angles mesurés obtenus avec les capteurs (tous les mètres).....	86
Figure 3.15.2 : Mesures d'angles obtenues avec les capteurs (pas d'un mètre).	86
Figure 3.16 : Dispositions de l'émetteur et du récepteur près du bâtiment 5.....	87
Figure.3.16.1 : Niveaux des signaux reçus avec les antennes demi-ondes à 5 m du mur.....	88
Figure 3.16.2 : Angles mesurés avec les capteurs (E/R situés à 5 m du bâtiment 5).....	88
Figure 3.16.3 : Niveaux des signaux reçus avec les antennes demi-ondes à 10 m du mur.....	89
Figure 3.16.4 : Angles mesurés avec les capteurs à 10 m du bâtiment 5.....	89
Figure 3.17 : Positions 1 à 10 de l'émetteur par rapport au bâtiment 4.....	90
Figure 3.17.1 : Angles mesurés obtenus aux positions 1 à 10 près du bâtiment 4.....	91
Figure 3.18 : Positions 1 à 11 de l'émetteur et du récepteur par rapport au bâtiment 1.....	92
Figure 3.18.1 : Angles relevés aux positions 1 à 11 près du bâtiment 1.....	93
Figure 3.19 : Positions 1 à 10 de l'émetteur et du récepteur par rapport au bâtiment 2.....	94
Figure 3.19.1 : Angles mesurés aux positions 1 à 10 du bâtiment 2.....	94
Tableau 1 : Angles mesurés en milieu suburbain avec les capteurs développés.....	95
Figure 4.1 : Banc de mesures d'angle à l'aide d'un radiogoniomètre Doppler.....	100
Tableau 1 : Niveaux de signaux et temps cyclique du circuit de commutation du radiogoniomètre Doppler.....	101
Figure 4.2 : Angle mesuré en fonction du niveau de signal du récepteur.....	102
Figure 4.3 : Antennes sur la tôle métallique du toit du Camion Laboratoire.....	105
Figure 4.4 : Antennes sur un plan de masse métallique de 2m sur 2m.....	106
Figure 4.5-a: Angle en fonction de la fréquence pour une excursion de 20 kHz.....	107
Figure 4.5-b: Angle en fonction de la fréquence pour une excursion de 75 kHz.....	108
Figure 4.6-a : Angle en fonction de l'excursion de modulation à la fréquence de 85 MHz.....	108
Figure 4.6-b : Angle en fonction de l'excursion de modulation à la fréquence de 111 MHz.....	108
Figure 4.7 : Mesure en espace dégagé sur quelques dizaines de mètres.....	110
Figure 4.8 : Angles mesurés à 98 MHz en espace dégagé sur 1km200.....	110
Figure 4.9 : Dispositions géométriques de l'émetteur et du récepteur près du bâtiment 6.....	111
Figure 4.9.1 : Angles mesurés à 8 m du mur du bâtiment 6.....	112
Figure 4.9.2 : Angles mesurés à 16 m du mur du bâtiment 6.....	112
Figure 4.10 : Répartition des angles de gisement pour un même émetteur portant deux fréquences : 89,7 MHz et 99,4 MHz.....	114
Figure 4.11 : Mesures en milieu suburbain sur les émetteurs 88,7, 103,7 et 105,2 MHz.....	115
Figure 4.12 : Mesures en milieu urbain dense sur les fréquences 88,7 et 105,2 MHz.....	116
Figure 4.13 : Mesures en milieu suburbain sur les fréquences 89,2, 93,9 et 101,3 MHz.....	117
Figure 4.14 : Mesures en milieu suburbain sur 92, 92.5, 93, 96, 96.4 et 96.8 MHz.....	118
Figure 4.15 : Mesures en milieu suburbain sur 88,2, 91,4 et 93,4 MHz.....	119
Tableau 2 : Angles mesurés en milieu suburbain sur les émetteurs conventionnels.....	120
Figure 4.16 : Une configuration des mesures pour pallier les multichemins.....	121
Tableau 3 : Mesures d'angles obtenues sur 4 fréquences et en 6 positions différentes.....	121
Figure 4.17 : Maillage du plan de la zone de localisation par radiogoniométrie.....	123
Tableau 3 : Localisation en milieu suburbain - Villeneuve d'Ascq.....	123
Tableau 4 : Localisation en milieu suburbain - Sainghin.....	123
Tableau 5 : Localisation en milieu suburbain (relevés en plusieurs points).....	124
Figure 5.1 : Diagramme général de fusion des deux informations de localisation par GSM/Doppler.....	128
Tableau 1: Données de mesures obtenues avec le capteur 1 (système de localisation par GSM).....	129
Tableau 2: Données de mesures obtenues avec un radiogoniomètre Doppler.....	130
Figure 5.2 : Traitement statiques et classement des données des deux capteurs.....	131

Figure 5.3 : Définition des intervalles de prédiction de chacun des deux capteurs	132
Figure 5.4 : Filtrage des données d'un capteur à partir des données de l'autre capteur	133
Figure 5.5: Tableau des données retenues après les étapes 3 et 4 de filtrage.....	134
Tableau 3 : Les 16 cas possibles obtenus après les étapes 3 et 4	135
Tableau 4: Synthèse des essais en 8 positions: distances entre les positions du mobiles estimées suivant les trois méthodes décrites.....	136
Figure I.1 : Banc de Mesures d'initialisation des paramètres de mesures.....	146
Figure I.2 : Mobile scrutant les stations de base du réseau	147
Figure I.3 : Tension de commande du VCO au cours du temps en mode veille	148
Figure I.4 : Tension de commande du VCO au cours du temps en mode dédié.....	148
Figure I.5 : Evolution des TimeSlot au cours du temps sur les différents canaux RF	149
Planche 1 : Correspondance Tension - Fréquence	150
Figure I.6 : Tension du VCO du mobile au cours du temps (une multitrame).	151
Figure I.7 : Schéma synoptique de brouillage de fréquences.....	152
Figure III.1 : Diagrammes de l'antenne cardioïde utilisée aux fréquences de 90 et 100 MHz.....	156
Figure III.2 : Diagrammes de l'antenne YAGI utilisée aux fréquences de 475 et 500 MHz.....	157
Figure III.3 : Diagrammes de l'antenne YAGI utilisée aux fréquences de 910 et 960 MHz.....	157
Figure III.4-a : Caractérisation du radiogoniomètre Doppler.....	160
Figure III.4-b : Caractérisation du radiogoniomètre Doppler	161
Figure III.5 : Mesures d'angles sur deux émetteurs situés au même endroit en milieu suburbain.....	161
Figure III.6 : Mesures d'angle sur six émetteurs situés au même endroit en milieu suburbain	162
Figure III.7 : Mesures d'angle sur quatre émetteurs situés au même endroit en milieu suburbain.....	162
Figure III.8 : Mesures d'angle sur trois émetteurs situés au même endroit en milieu suburbain.....	163

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le marché des radiocommunications avec les mobiles est en pleine mutation. En particulier, les systèmes de localisation des mobiles terrestres sont amenés à jouer un rôle clef [46] notamment pour :

- les applications de navigation,
- la collecte de données par des véhicules “ traceurs ” dans les applications de guidage,
- la diffusion d’information à bord des véhicules,
- la gestion de flotte,
- l’optimisation des systèmes d’alerte d’urgence.

Pour étudier les systèmes de localisation, il est important de faire la distinction entre les systèmes permettant un auto positionnement du mobile et les systèmes où le mobile est positionné à distance parfois à son insu. Dans ce mémoire nous ne considérons que des systèmes exploitant des ondes électromagnétiques et permettant une auto localisation du mobile.

La plupart des systèmes de localisation des mobiles terrestres actuels utilisant des signaux issus de satellites voient leur disponibilité considérablement réduite en milieu urbain lorsque le canal de propagation est obstrué par la présence des immeubles. Pour pallier cet inconvénient, ils sont généralement complétés par des systèmes de navigation à l'estime, des systèmes de balises au sol et des systèmes diffusant des informations de correction. Ceci implique pour l'utilisateur non seulement d'être équipé d'un dispositif complexe exploitant ces différents capteurs (récepteur GPS (Global Positioning System), gyromètres, tachymètres etc.....) à l'aide d'un ordinateur sophistiqué coûteux mais aussi de disposer d'un médium de communication (récepteur Radio Data System, téléphone GSM (Global System for Mobile communications), etc...).

C'est pourquoi nos travaux ont consisté à étudier la faisabilité puis à développer sous la forme d'une maquette fonctionnelle une solution de localisation alternative offrant une disponibilité accrue en milieu urbain ainsi qu'une précision comparable à celle des systèmes existants. La solution proposée utilise deux capteurs indépendants qui tirent leurs informations d'une part d'un réseau de radiotéléphonie cellulaire GSM sans intervention de l'opérateur et d'autre part d'un réseau d'émetteurs de radiodiffusion dans la bande de fréquences allant de 100 MHz à 1000 MHz.

Un premier chapitre introductif à ce mémoire est consacré à la présentation de l'état de l'art des systèmes d'auto localisation de véhicules terrestres, fondés sur l'exploitation des ondes électromagnétiques, qui existent aujourd'hui ou qui sont en voie de développement. Nous

présentons les principes de fonctionnement de trois des principaux systèmes qui permettent l'auto localisation d'un mobile : le système GPS, le système de radiotéléphonie cellulaire GSM et différents systèmes de radiogoniométrie.

Dans le deuxième chapitre, nous développons la mise au point d'un prototype de localisation des mobiles fondé sur l'utilisation de certaines informations d'un réseau cellulaire GSM. Le principe de la localisation repose sur la mesure du temps de propagation (Timing Advance dans le GSM) des signaux qui transitent entre le mobile qui cherche à se localiser et au moins trois stations d'émissions fixes distinctes du réseau GSM de positions connues par le mobile. Les temps de propagation étant déduits de ces mesures, le mobile est localisé par triangulation. Les informations relatives au temps de propagation sont calculées par le réseau et transmises au mobile chaque fois qu'il entre en communication avec une nouvelle station fixe. Ce chapitre est donc consacré à l'évaluation des différentes solutions techniques mises en œuvre pour provoquer des transferts automatiques entre stations fixes ou "handover" à partir du mobile afin de rafraîchir le paramètre Timing Advance. Le processus de handover est géré par le réseau et les critères qui le déclenchent sont liés entre autre aux niveaux des signaux reçus et à la qualité de la communication.

Le premier procédé envisagé consiste à remplacer l'antenne de réception omnidirectionnelle du mobile par une antenne à grand gain qui favorisera la réception des signaux dans une direction privilégiée. En effectuant un balayage lent de 360° dans le plan horizontal, on dégradera successivement la liaison entre le mobile et les différentes stations qui l'entourent. De telles conditions simulent un déplacement fictif du mobile apte à provoquer des handovers.

Le second procédé mis en œuvre consiste à additionner via un coupleur, les signaux reçus avec des signaux perturbateurs, synthétisés par un générateur de signal modulé, qui présentent les mêmes caractéristiques d'amplitude, de fréquence et de bande passante que le signal reçu. Un tel signal permet de dégrader suffisamment la qualité de la communication pour que le réseau soit leurré et provoque des handovers. Une source de brouillage agile en fréquence a été développée dans le but d'automatiser le processus de déclenchement des handovers.

Quel que soit le procédé mis en œuvre, il convient de remarquer qu'il sera exigeant vis à vis du réseau et qu'il ne constitue aujourd'hui qu'une approche de laboratoire qui n'est pas généralisable en l'état sur un réseau de télécommunications.

Le troisième chapitre de ce mémoire est consacré à la localisation du mobile par radiogoniométrie. Le principe de la localisation repose sur la mesure des angles de gisement d'au moins trois émetteurs de radiodiffusion par rapport à une direction de référence donnée, par exemple le Nord géographique. De nombreux émetteurs de radiodiffusion dans la bande de 100 MHz à 1000 MHz existent en milieu urbain et peuvent être exploités pour des besoins de localisation.

Dans la première partie du troisième chapitre nous avons étudié le principe d'une méthode de mesure des angles de gisement qui repose sur la forme particulière du diagramme de rayonnement de deux types d'antennes : les antennes à grand gain de type Yagi-Uda et les antennes dites "cardioïdes". L'étude a été réalisée successivement dans trois sous bandes de fréquences centrées sur 100 MHz, 475 MHz et 900 MHz afin d'analyser l'influence des phénomènes de propagation sur la précision des mesures angulaires en milieu urbain ou suburbain près des bâtiments et des obstacles dans des configurations géométriques simples.

Cette étude permet de conclure sur le choix d'une méthode de mesures d'angle de gisement ainsi que sur la nécessité de ne pas exploiter successivement les trois sous bandes de fréquences pour le développement d'un prototype de localisation. La bande de fréquence centrée sur 100 MHz a été choisie puisqu'un grand nombre d'émetteurs de radiodiffusion fonctionnant dans cette gamme de fréquence sont présents en milieu urbain.

Dans la deuxième partie du troisième chapitre, nous étudions la validité des méthodes de mesures proposées pour la mise en œuvre du procédé de localisation des mobiles terrestres en utilisant un radiogoniomètre Doppler du commerce fonctionnant dans la gamme des 100 MHz. Le comportement du radiogoniomètre Doppler dans des configurations typiques en milieu urbain et suburbain a été étudié et des modifications ont été apportées en vue d'améliorer la précision des mesures. Enfin, une méthode de mesure est proposée pour minimiser les erreurs générées par les chemins multiples des signaux et améliorer la précision de la localisation.

Les expérimentations présentées dans les deuxième et troisième chapitres ont montré qu'aucun des deux systèmes de localisation pris séparément ne répond aux critères de disponibilité et de précision en milieu urbain ou suburbain que nous avons fixés. Le dernier chapitre de ce mémoire est donc consacré aux différents algorithmes d'acquisition et de traitement des données que nous avons développés pour la mise en œuvre d'une maquette prototype pour chacun des deux systèmes de localisation. Dans ce chapitre, nous présentons aussi des pistes de travail qu'il convient de suivre pour coupler par voie logicielle, les données issues du système de localisation utilisant le GSM et celles relatives au radiogoniomètre Doppler afin d'améliorer la disponibilité et la précision de la localisation finale.

Chapitre I :

Principaux procédés de localisation des mobiles terrestres

Chapitre I : Principaux procédés de localisation des mobiles terrestres

1. Introduction

Les objectifs de ce chapitre sont de rappeler brièvement les principes de fonctionnement des principaux systèmes de localisation des mobiles terrestres, fondés sur l'exploitation des ondes électromagnétiques, qui existent aujourd'hui ou qui sont en voie de développement. Pour étudier les systèmes de localisation de mobiles terrestres, il est important de faire la distinction entre les systèmes permettant un auto-positionnement du mobile et les systèmes où le mobile est positionné à distance parfois à son insu. Nous ne présentons dans ce chapitre que les systèmes permettant l'auto-localisation du mobile parmi lesquels il est possible de distinguer quatre grandes familles [46]:

- Les systèmes de localisation fondés sur la mesure des temps de propagation des signaux entre le mobile à localiser et au moins trois stations d'émission (ou quatre selon l'application) non synchronisées entre elles qui définissent un réseau de cercles ou de sphères centrés sur ces stations d'émission. Parmi ces systèmes, on trouve les systèmes de localisation par satellites, par réseau de balises ou par réseau cellulaire parmi lesquels on peut citer la localisation par GPS et la localisation par GSM.
- Les systèmes hyperboliques fondés sur la mesure, à partir du mobile, des différences de temps de propagation des signaux radioélectriques issus d'émetteurs synchronisés pris deux à deux qui définissent un jeu d'hyperboles ou hyperboloïdes dont les foyers sont les émetteurs concernés. Les systèmes DECCA et LORAN C font partie de cette famille de systèmes de localisation et ce serait le cas du GSM si les émetteurs fixes d'un réseau étaient synchronisés, c'est le cas du système IS95 aux Etats-Unis.
- Les systèmes de localisation par radiogoniométrie fondés sur la mesure des angles de gisement d'émetteurs fixes c'est à dire la mesure de la direction de ces émetteurs par rapport à une référence (Nord géographique par exemple). Parmi ces systèmes, on trouve les systèmes radiophares et les radioalignements et ils sont connus sous le nom de systèmes angulaires et directionnels.
- Les systèmes de localisation utilisant la comparaison de la phase du signal reçu par le récepteur avec la phase du signal généré par le récepteur qui est une réplique du signal de l'émetteur. Cette méthode permet en théorie d'obtenir une erreur de positionnement inférieure à 1% de la longueur d'onde du signal sur lequel se fait la mesure. La localisation par mesure de phase est utilisée avec le système GPS pour des mesures de positionnement relatif et surtout pour des mesures en mode statique destinées à l'établissement des réseaux en géodésie, topométrie, photogrammétrie ou géophysique [35].

Nous donnons les principales caractéristiques techniques de chacune de ces familles de systèmes et nous illustrerons leur principe de fonctionnement par la description d'un système concret.

2. La localisation par satellites

La navigation par satellites consiste en général à localiser des mobiles sur terre, sur mer ou en l'air. Ces systèmes font partie de la première famille de système. En effet, l'utilisateur à bord du mobile muni d'un récepteur mesure la distance entre le récepteur et plusieurs satellites à l'aide des messages transmis par ces derniers. Ces systèmes de localisation utilisent donc des réseaux de cercles ou sphères.

Les systèmes de satellites sont classifiés suivant quatre catégories relatives à l'altitude des satellites par rapport au sol [36]:

- En orbite basse ou LEO (Low Earth Orbiting), on trouvera par exemple les systèmes IRIDIUM (780 km, 66 satellites) et GLOBALSTAR (1400 km, 48 satellites).
- En orbite moyenne ou MEO (Medium Earth Orbiting), on trouve le GPS (20200 km, 24 satellites) et GLONASS (19100 km, 24 satellites).
- En orbite géostationnaire ou GEO (Geostationary Earth Orbiting), on trouve les systèmes INMARSAT 2-3 (36000 km, 4 satellites), EUTELTRACS (36000 km, 2 satellites).
- En orbite haute ou HEO (High Earth Orbiting), on trouve les systèmes ELLIPSO et ARCHIMEDES.

Les systèmes les plus utilisés aujourd'hui pour la localisation sont les systèmes GPS, GLONASS et EUTELTRACS. Les futurs systèmes IRIDIUM et GLOBALSTAR offriront des services de télécommunications et de localisation. Nous allons détailler le principe de fonctionnement des systèmes GPS, GLONASS et IRIDIUM.

2.1 Description du réseau GPS-NAVSTAR, GLONASS

2.1.1 Le réseau GPS-NAVSTAR

Le **GPS** ou **Global Positioning System** est un programme américain de satellites de navigation ; depuis plusieurs années, le GPS appelé également **NAVSTAR** (**NAV**igation **S**ystem by **T**iming **A**nd **R**anging) ou système de navigation par satellites a atteint largement ses buts militaires initiaux et est devenu un outil incontournable pour les application civiles. Le GPS est un système de positionnement à quatre dimensions qui fournit la longitude, la latitude, l'altitude et l'heure.

Le réseau du GPS-NAVSTAR est divisé en trois segments principaux:

- le segment spatial comprend 24 satellites à défilement disposés régulièrement sur six plans orbitaux à raison de quatre satellites par orbite. Il est complètement opérationnel depuis le 8 Décembre 1993. Chaque satellite effectue une rotation complète autour du

globe à l'altitude de 20185 km [11]. Chaque satellite a un angle de vue de 28 degrés sur la sphère terrestre. Ainsi en tout point de la surface du globe, on dispose de six à dix satellites en vue [11] et [28],

- le segment contrôle est constitué de cinq stations moniteurs ou stations de poursuite, de trois émetteurs de télécommande et d'une station de contrôle centrale ou station de calcul et de chargement,
- le segment utilisateur (sur terre, sur mer ou en l'air) constitué des utilisateurs militaires et associés et des utilisateurs civils; les utilisateurs se subdivisent en sous-classes correspondant à un usage particulier d'un équipement spécifique.

Chaque satellite émet un signal dans la bande L centrée sur deux fréquences $L_1 = 1575,42$ MHz et $L_2 = 1227,6$ MHz de largeur de bande 20 MHz et les niveaux de signaux reçus se situent entre -160 et -170 dBW [11]. Chaque satellite émet un code qui lui est propre de manière à ce que chaque récepteur puisse l'identifier parfaitement. Chacune des fréquences porte un message constitué des éphémérides précises de chaque satellite, des données de correction de propagation et de temps satellites qui permettent au récepteur de retrouver très précisément la position du satellite dans le temps absolu GPS. Les satellites émettent également des signaux "code" C/A et P(Y) utilisés pour la mesure du temps de propagation des ondes entre le satellite et l'utilisateur [12].

Les codes C/A, correspondants à une longueur d'onde de 300 m, sont émis par chaque satellite. Pour une mesure plus précise, chaque satellite émet un code précis P correspondant à une longueur d'onde de 30 m qui permet une mesure de précision et qui peut être crypté en code secret Y. L'accès à ce code n'est possible qu'à certains utilisateurs disposant d'un récepteur approprié PPS (Precise Positioning System) et utilisant des clés de décryptage.

Le système GPS est pourvu de deux processus qui permettent de limiter son utilisation civile et de protéger son utilisation militaire :

- l'accès sélectif ou **SA** (Selective Availability) qui consiste à dégrader la fréquence d'horloge des satellites et des éphémérides. Les dégradations n'affectent principalement que des applications civiles de navigation en temps réel. Après le succès rencontré par les utilisations civiles du GPS et l'arrivée de la constellation GLONASS, la décision de supprimer l'accès sélectif sous 10 ans a été prise en 1996.
- l'antibrouillage ou antileurrage ou **AS** (Anti Spoofing) qui consiste à éviter le brouillage volontaire des signaux GPS par des utilisateurs "ennemis".

Le GPS-NAVSTAR offre donc deux types de service:

- le SPS (Standard Positioning System) ou service standard. Il est accessible à tout utilisateur muni d'un récepteur GPS et n'offre qu'une précision limitée (100 m dans 95% des cas dans le plan horizontal et 156 m dans le plan vertical) [12].
- Le PPS (Precise Positioning System) accessible uniquement aux utilisateurs autorisés par le Department Of Defense américain (DOD), offre une précision maximale (21 m à 95% dans le plan horizontal) [12].

2.1.2 Le réseau GLONASS

Le système **GLONASS** (GLObal'naya Navigatsionaya Sputnikovaya Sistema) constitue le programme de navigation russe similaire au système GPS à la différence que les données transmises par ses satellites ne sont pas volontairement dégradées [36].

La constellation se fonde sur trois plans orbitaux. Chaque plan possède huit satellites soit au total 21 plus 3 de réserve.

Chaque satellite GLONASS dispose de deux canaux de transmission : le canal L1 qui est transmis à $1602+0.5625*n$ MHz et le canal L2 à $1246+0.4375*n$ MHz où n représente le numéro de séquence du satellite.

La disponibilité de la constellation GLONASS pose aujourd'hui un problème car un nombre suffisant de satellites ne peut être simultanément opérationnels.

2.2 Principe de la localisation par satellites ou GPS

Chaque satellite du réseau GPS émet des messages de deux sortes : un message relatif à l'horloge du satellite émetteur et un message concernant les éphémérides du satellite et son état de "santé". Les éphémérides permettent de calculer la position du satellite dans un repère terrestre au moment de la mesure.

La position absolue du récepteur est en général obtenue en quasi-temps réel en quelques secondes d'observation. Elle est déduite de la mesure de la distance qui sépare au moins trois satellites du récepteur. En réalité, quatre satellites sont nécessaires si l'on veut prendre en compte la non synchronisation entre les horloges des satellites et le dispositif de réception. Cette distance est calculée à partir du temps de propagation du signal entre le satellite et le mobile. Connaissant l'heure exacte de production d'une transition donnée, il suffit de lire l'heure d'arrivée de cette transition sur l'horloge du récepteur pour en déduire le temps de propagation par différence. En multipliant cette valeur par la vitesse de la lumière, on obtient la distance cherchée. Dans la terminologie GPS cette distance est traditionnellement appelée "pseudo-distance". La figure 1.1 [12] montre les différentes étapes du calcul de la position du récepteur.

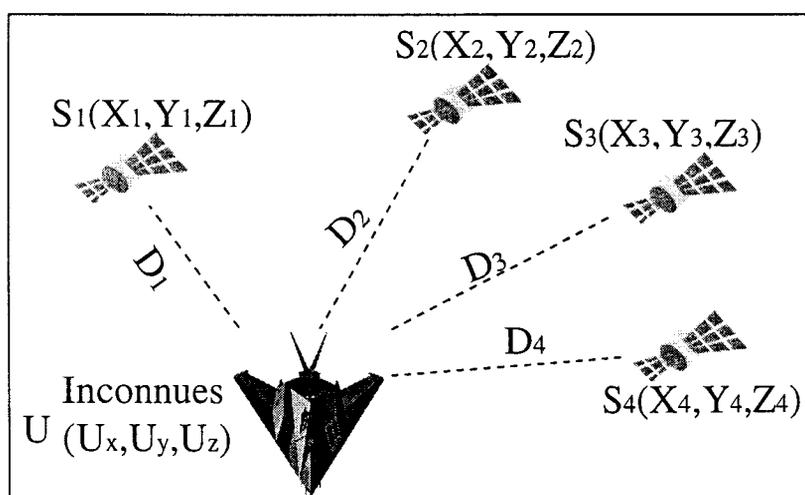


Figure 1.1 : Repère pour le calcul de la position du mobile par GPS

Soient X_1, Y_1 et Z_1 les coordonnées connues du satellite S_1 , soit D_1 la pseudo-distance et soient U_x, U_y, U_z , les coordonnées inconnues du mobile. Pour le premier satellite, on peut établir l'équation suivante:

$$(X_1 - U_x)^2 + (Y_1 - U_y)^2 + (Z_1 - U_z)^2 = D_1^2 \quad (2)$$

L'équation (2) est celle d'une sphère centrée autour du satellite. Pour la résoudre, il faut disposer de deux autres équations, de même type, associées à deux autres satellites. Or l'intersection de deux sphères donne un cercle et l'intersection de ce dernier avec la troisième sphère donne deux points. Le doute est facile à lever car un des points se situe au-dessus des satellites et l'autre point se trouve en dessous des satellites donc au dessus de la terre.

La solution précédente suppose que l'utilisateur dispose d'une horloge locale parfaite, ce qui n'est évidemment jamais le cas. Dans le système GPS, ce problème est résolu en introduisant une inconnue supplémentaire caractéristique de l'erreur d'horloge ou biais d'horloge. Dès lors, le nombre d'inconnues passe à quatre, ce qui conduit à utiliser un quatrième satellite pour résoudre le système d'équations qui se présente sous la forme:

$$(X_1 - U_x)^2 + (Y_1 - U_y)^2 + (Z_1 - U_z)^2 = (D_1 - B * c)^2$$

$$(X_2 - U_x)^2 + (Y_2 - U_y)^2 + (Z_2 - U_z)^2 = (D_2 - B * c)^2$$

$$(X_3 - U_x)^2 + (Y_3 - U_y)^2 + (Z_3 - U_z)^2 = (D_3 - B * c)^2$$

$$(X_4 - U_x)^2 + (Y_4 - U_y)^2 + (Z_4 - U_z)^2 = (D_4 - B * c)^2$$

où c est la vitesse de la lumière et B est le biais de l'horloge locale.

Par la résolution de ce système de quatre équations à quatre inconnues, on détermine la position U du mobile.

La précision dépend de trois facteurs indépendants qui sont :

- la précision avec laquelle on connaît la position des satellites: c'est une donnée calculée à partir du message de navigation de chaque satellite,
- les angles d'observation des satellites: C'est un facteur géométrique dont découle la notion de GDOP ou Geometric Dilution Of Precision qui se traduit en français par la diminution de la précision d'origine géométrique [29] et [30],
- les erreurs de mesure.

Le schéma de la figure 1.2 illustre la notion de diminution de la précision d'origine géométrique [12]. On fera appel à cette notion chaque fois que le principe de localisation d'un mobile est fondé sur la mesure de distance entre le mobile et plusieurs stations d'émissions.

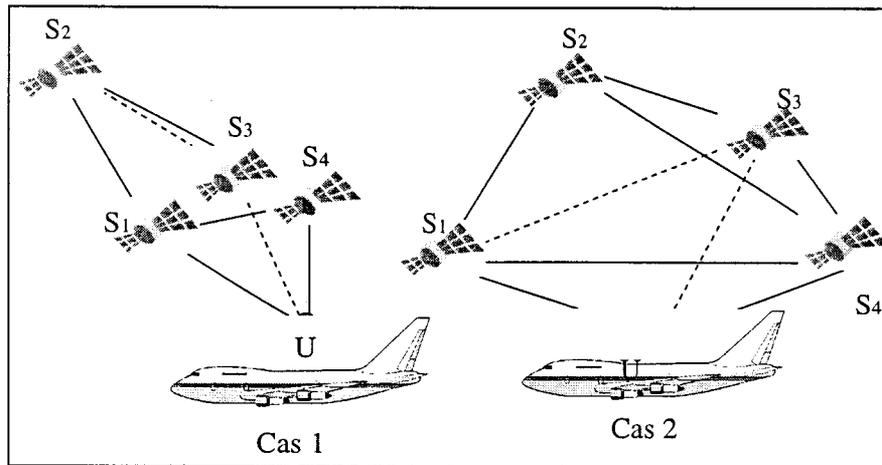


Figure 1.2: Influence de la géométrie des satellites sur la précision de localisation

Le GDOP ou Geometric Dilution Of Precision est un nombre sans dimension qui dépend de la disposition relative des satellites considérés pour la localisation, par rapport au récepteur. Il est considéré comme un facteur d'aggravation de l'erreur imputable à la géométrie du système. Dans la littérature relative au système GPS [35], on parle aussi souvent des notions de dilution de précision pour ce qui concerne les mesures en hauteur (VDOP : Vertical Dilution Of Precision), pour la position horizontale (HDOP : Horizontal Dilution Of Precision), pour le temps (TDOP : Time Dilution Of Precision) et de façon générale pour la position 3D (PDOP : Position Dilution Of Precision). En réalité, ces 4 paramètres permettent de définir le GDOP.

Dans le cas par exemple où l'on considère deux satellites, la meilleure précision est obtenue lorsque l'angle formé par le premier satellite, le récepteur et le second satellite est proche de 90° .

Dans le cas de la localisation par GPS où l'on considère quatre satellites pour se localiser, l'extension de cette notion s'effectue en considérant le volume de l'hexaèdre formé par l'utilisateur et les quatre satellites. La précision sera d'autant meilleure que ce volume sera le plus grand possible car il est démontré que le GDOP est inversement proportionnel au volume de l'hexaèdre [29]. Dans le cas 1 de la figure 1.2, la géométrie à GDOP est élevée et la précision du point est médiocre alors que dans le cas 2, la géométrie de GDOP est faible et la précision du point est meilleure.

Aux erreurs liées à la géométrie du système, viennent s'ajouter d'une part des erreurs dues à la traversée de l'ionosphère et de la troposphère par les signaux émis par les satellites et d'autre part des erreurs dues aux trajets multiples que vont subir les signaux. Une des possibilités pour s'affranchir des erreurs qui entachent les mesures et donc pour améliorer la précision du GPS, consiste à utiliser le GPS-différentiel ou DGPS, c'est à dire à ajouter des balises dont les positions sont géo-référencées, qui vont émettre par voie hertzienne vers le récepteur des corrections à apporter afin de réduire les erreurs dues à la dégradation volontaire des signaux ou à la mauvaise propagation de ces signaux [31] et [32].

2.3. Systèmes de références pour les coordonnées GPS

Les orbites radiodiffusées des satellites de la constellation GPS utilisent un système de référence pour le calcul des coordonnées des satellites, appelé WGS84 (World Geodetic System

1984). Cette notion de système de référence et de coordonnées est fondamentale pour la localisation surtout lorsque l'on cherche à atteindre des précisions inférieures au mètre [35].

En effet, il existe de nombreux systèmes de références qui permettent de positionner des points sur la surface de la terre ou dans l'espace. Ces systèmes dépendent de l'ellipsoïde et du géoïde choisis. Les coordonnées exprimées dans chacun des systèmes peuvent différer considérablement et donc entraîner des erreurs de localisation. Pour le positionnement sur une carte, il convient en outre de passer d'un système de référence géographique à un système de coordonnées cartésiennes.

A titre d'exemple, prenons le cas où l'on souhaite positionner le mobile localisé dans le Nord de la France par GPS sur une carte de type IGN. En toute rigueur, il faudra passer des coordonnées GPS exprimées dans le système WGS84 aux coordonnées IGN ou coordonnées Lambert I (Lambert II pour le centre de la France, III pour le Sud et IV pour la Corse). Un raisonnement possible consistera à effectuer les transformations suivantes :

- 1- Transformation des coordonnées géographiques WGS84 en coordonnées cartésiennes,
- 2- Transformation des coordonnées cartésiennes WGS84 en coordonnées cartésiennes NTF (Clarke80),
- 3- Transformation des coordonnées cartésiennes NTF en coordonnées géographiques,
- 4- Transformation des coordonnées géographiques NTF en coordonnées Lambert.

Dans la plupart des applications de localisation " grand public " utilisant des récepteurs GPS bas coût (marine de plaisance, randonneurs pédestres,...), l'utilisateur se positionne directement en coordonnées GPS exprimées en WGS84. L'erreur commise est en général comprise entre 100 et 200 m et correspond à l'erreur intrinsèque du GPS utilisé sans correction différentielle.

2.4 Corrections différentielles du GPS et perspectives d'avenir

2.3.1 Le DGPS

La correction différentielle connue sous le nom de DGPS (Differential-GPS) s'applique aux signaux GPS ou GLONASS. Deux méthodes ont été développées, l'une appelée " Local Area Differential GPS " ou LADGPS qui procure des corrections valides dans une zone de superficie limitée, l'autre appelée " Wide Area DGPS " ou WADGPS qui couvre une zone étendue. A cette fin, une station réceptrice " géoréférencée " compare en temps réel la localisation fournie par les satellites à sa position absolue ; elle diffuse ensuite des données de correction par un moyen de communication (ex : RDS, GSM, 3-RD, liaison satellite. Géostationnaire, etc...) vers des récepteurs couplés aux capteurs de localisation embarqués (GPS, GLONASS). Les corrections sont alors introduites dans l'équipement au moyen d'un port de communication normalisé. La précision de localisation peut ainsi passer de 100 m à 5 m voire moins d'un mètre[32] et [33].

2.3.2 Le réseau EGNOS

En Europe, l'initiative EGNOS ou European Geostationary Navigation Overlay Service constitue une approche WADGPS décrite dans le paragraphe précédent. Celle-ci propose

notamment de vérifier en temps réel l'intégrité des signaux émis par les satellites GPS et de diffuser tout dysfonctionnement de la constellation grâce à une transmission effectuée depuis un satellite géostationnaire.

EGNOS constitue l'une des options de l'initiative européenne intitulée GNSS 1 (Global Navigation Satellite System 1st generation) visant à pallier les imperfections des solutions GPS et GLONASS seules. Cette disposition est transitoire avant l'arrivée de GNSS 2 qui permettrait à l'Europe de disposer d'une constellation autonome, civile de satellites de localisation.

2.3.3 Autre constellation pour la localisation : les constellations IRIDIUM, GLOBALSTAR

De nouvelles constellations de satellites en orbites basses sont en cours de création et offriront des services de télécommunication et de localisation. La localisation étant effectuée suivant le même principe que dans les systèmes GPS ou GLONASS.

La constellation IRIDIUM par exemple possédera bientôt 66 satellites, en orbite basse, situés à 780 km d'altitude. Elle dispose de 15 à 20 stations de contrôle terrestres et porte, grâce à un terminal usager portable de volume équivalent à un radiotéléphone cellulaire GSM actuel, des services de type : voix, Fax, données à 2400 bps, recherche de personnes, messages courts et localisation.

La constellation GLOBALSTAR utilisera une constellation de 48 satellites défilant à 1410 km d'altitude et offrira un service mondial de communications personnelles comprenant la voix, la transmission de données incluant de la télécopie à 9,6 kbits/s. Les stations terriennes assurent les liaisons avec les mobiles via les satellites.

3. La localisation par les systèmes hyperboliques

Les systèmes hyperboliques de localisation des mobiles sont fondés sur la mesure des différences des temps de propagation entre des signaux issus de groupes de deux émetteurs synchronisés. Comme indiqué sur la figure 1.3, les mesures réalisées sur chaque groupe de deux émetteurs vont définir un jeu d'hyperboles dont les foyers sont les deux émetteurs considérés. Ces hyperboles se croisent et leurs intersections permettent de déterminer la position du mobile.

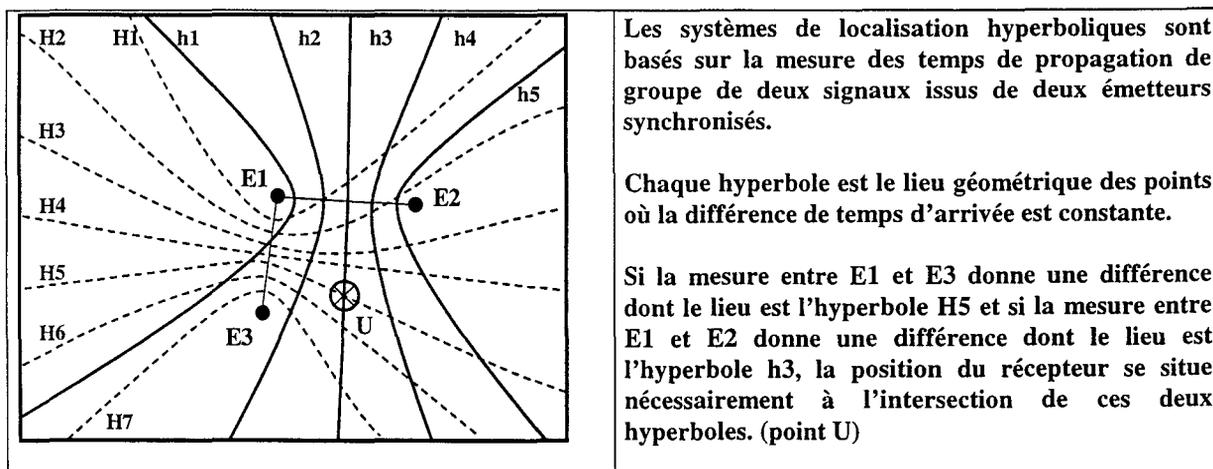


Figure 1.3 : Principe de localisation par le système hyperbolique

Soient X_a, Y_a, X_b et Y_b les coordonnées respectives des émetteurs A et B, soit D_{ab} la différence de distance qui existe entre les émetteurs A et B ; cette valeur D_{ab} est une valeur connue ou mesurée par le mobile.

Soient X_m et Y_m les coordonnées inconnues du mobile M, pour les deux stations de base A et B, on peut établir l'équation suivante :

$$[(X_a - X_m)^2 + (Y_a - Y_m)^2] - [(X_b - X_m)^2 + (Y_b - Y_m)^2] = D_{ab}^2 \quad (1)$$

L'équation (1) est celle d'une hyperbole dont les foyers se situent en A et B. Pour déterminer la position du mobile, il faut disposer de deux autres équations du même type. En prenant deux autres émetteurs C et D de coordonnées connues X_c, Y_c et X_d, Y_d , on a donc deux différences de distances D_{bc} et D_{cd} et on peut également définir deux autres équations :

$$[(X_b - X_m)^2 + (Y_b - Y_m)^2] - [(X_c - X_m)^2 + (Y_c - Y_m)^2] = D_{bc}^2$$

$$[(X_c - X_m)^2 + (Y_c - Y_m)^2] - [(X_d - X_m)^2 + (Y_d - Y_m)^2] = D_{cd}^2$$

Par la résolution du système d'équations précédent, on détermine la position M du mobile.

Parmi les systèmes hyperboliques, on peut citer les systèmes DECCA, OMEGA et LORAN C. A titre d'exemple, nous décrivons à présent le système LORAN C.

3.1 Le système LORAN C

La chaîne LORAN C est constituée d'un émetteur central appelé station pilote qui est entourée de 3 ou 4 stations asservies c'est à dire synchronisées par rapport à la station pilote. La distance entre les stations peut dépasser 2000 km. Les stations du système LORAN C émettent toutes des impulsions à 100 kHz avec une fréquence de répétition des trains d'impulsions variant d'une station à l'autre entre 10 et 33,33 Hz.

La localisation est fondée sur la mesure des différences de temps de propagation entre le signal émis par la station pilote et celui émis par une station asservie. Le mobile mesure cette différence de temps entre les deux stations émettrices avec en plus la connaissance de la distance qui sépare les deux stations. Le lieu des points tels que, la différence de distance entre les deux stations est constante, est une hyperbole dont les foyers sont les stations de base. En utilisant 3 ou 4 stations, on définit un jeu d'hyperboles dont le point commun est la position du mobile.

Le LORAN C est uniquement implanté dans l'hémisphère Nord. Il est très utilisé dans le domaine maritime mais tend progressivement à être complété par le système GPS. Les précisions de mesures varient entre 100 et 500 mètres.

Tout comme nous l'avons exposé pour le système GPS, la dégradation géométrique de la précision, c'est à dire l'erreur de positionnement due à la disposition relative des émetteurs considérés pour la localisation par rapport au mobile, est un paramètre important. Il est montré [29] qu'avec les systèmes circulaires ou sphériques, cette dégradation est supérieure à celle que l'on obtient avec les systèmes hyperboliques utilisant les mêmes stations.

4. La localisation par le radiotéléphone cellulaire GSM

Le principe de localisation repose sur la mesure du temps de propagation des signaux entre le mobile qui cherche à se localiser et au moins trois stations d'émissions fixes distinctes du réseau cellulaire. Selon le même principe que la localisation par satellites, les temps de propagation des signaux permettent de définir trois cercles centrés sur les stations fixes. La position du mobile est donc déterminée dans la zone d'intersection des trois cercles. Les temps de propagation des signaux sont obtenus à partir de l'analyse de certaines informations présentes dans les messages de signalisation du système.

4.1 Description du réseau de radiotéléphone pan européen GSM

L'architecture simplifiée du système GSM présentée figure 1.4 est constituée de quatre sous-systèmes :

- les stations d'émission - réception mobiles (MS ou Mobile Station),
- le sous-système radio ou BSS (Base Sub-System) qui comprend les stations de base (BTS ou Base Transceiver Station) et les contrôleurs de stations de base (BSC ou Base System Controller),
- le sous-système réseau ou NSS (Network Switching Sub-system) qui comprend le centre de commutation des mobiles (MSC ou Mobile Switching Center) et les bases de données associées qui sont le VLR (Visitor Location Register) et le HLR (Home Location Register),
- le centre de maintenance à distance de l'opérateur ou OMC (Operator Management Center).

Les stations mobiles MS dialoguent par l'intermédiaire de l'interface radio air - sol avec les stations BTS. Ces BTS sont implantées judicieusement afin de garantir la couverture radioélectrique sur la base de cellules de rayon approprié en fonction des conditions de propagation et du nombre d'utilisateurs à desservir. L'architecture cellulaire vise à utiliser au maximum le spectre de fréquences disponibles, en conséquence, en fonction de la puissance d'émission des BTS, le rayon d'une cellule peut varier de quelques centaines de mètres en zone urbaine à quelques kilomètres (35 km au maximum) en zone rurale.

Lors du déploiement d'un réseau cellulaire de type GSM, il arrive fréquemment qu'une même station de base gère non pas une mais deux ou trois cellules. La continuité de la communication au cours des déplacements d'un mobile est assurée par le système connu sous le nom de "Handover" ou transfert automatique intercellulaire qui consiste à transférer la communication d'une cellule à une autre soit entre deux cellules (handover intra BTS), soit entre deux BTS (handover inter BTS).

Les stations de base sont connectées à des stations de contrôle (BSC Base Station Controller) elles même reliées au centre de commutation des mobiles (MSC : Mobile - services Switching Centre). Les contrôleurs de stations de base ont pour principale fonction de gérer les ressources radioélectriques et d'assurer la continuité de la communication lorsque l'utilisateur se déplace. Le MSC est connecté au réseau téléphonique fixe commuté afin de pouvoir établir une liaison entre un mobile GSM et un abonné téléphonique fixe. Il gère l'établissement des communications entre un mobile et un autre MSC et la mobilité à travers le réseau en dialoguant avec le VLR (Visitor Location Register : base de données associée au MSC dans

une zone particulière du réseau) et le HLR (Home Location Register : base de données concernant l'ensemble des abonnés du réseau).

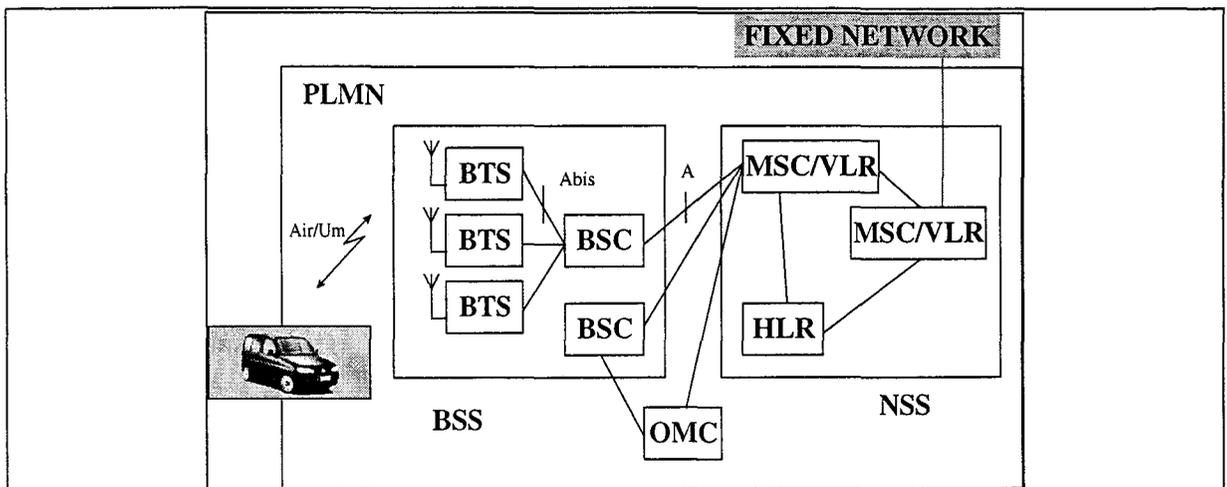


Diagramme 1 - Architecture simplifiée d'un réseau de télécommunication cellulaire GSM et connexion aux réseaux de téléphonies filaires

MS : Radiotéléphone mobile - Mobile Station

BTS : Station émettrice réceptrice fixe - Base Transceiver Station

BSC : Contrôleur de stations fixes - Base Station Controller

MSC : Centre de commutation des mobiles - Mobile Switching Centre

HLR : Base de données résidents du réseau - Home Location Register

VLR : Base de données visiteurs du réseau - Visitor Location Register

PSTN / ISDN : Réseaux de téléphonie fixes (commuté, ...)

Figure 1.4: Eléments de base d'un système de radiotéléphonie cellulaire .

Le GSM offre aujourd'hui à l'utilisateur des services de voix et des services de données à 2,4 4,8 ou 9,6 kbps. Les bandes de fréquences allouées pour le GSM sont 890-915 MHz dans le sens mobiles vers stations fixes et 935-960 MHz dans le sens contraire avec un écart duplex constant de 45 MHz.

Les informations sont portées par une modulation du type GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) à la vitesse de 270,833 kbps. La modulation impose un écart de 200 kHz entre les porteuses dans les deux bandes disponibles. On obtient donc 124 canaux radiofréquences possibles pour chacun des liens montants et descendants. Dans chaque pays, ces 124 fréquences sont réparties par les autorités régulatrices pour les opérateurs en France, CEGETEL (SFR) et FRANCE TELECOM (ITINERIS).

Le partage des ressources radioélectriques dans la bande dédiée se fait simultanément par un partage en fréquence associé à un partage en temps appelé Accès Multiple à Répartition dans le Temps (AMRT ou Time Division Multiple Access) qui consiste à allouer un intervalle de temps (IT) à chaque utilisateur sur un même canal de fréquence. Le protocole de transmission du GSM se fonde sur un échange de données numériques sous forme de trames dans lesquelles sont regroupés 8 IT et appelées trames AMRT (ou TDMA) [8]. Un intervalle de temps a une largeur de 577 μ s soit 156,25 bits.

L'association d'un IT et d'un canal RF ou RadioFréquence constitue un canal physique. Ces canaux sont de deux types [8]:

- les canaux de trafic qui portent la voix ou les données,
- les canaux de contrôle qui portent la signalisation.

Parmi les canaux de contrôle, on distingue:

- les canaux de diffusion ou Broadcast Control CHannel (BCCH) uniquement dans le sens du lien descendant qui portent des informations spécifiques aux stations fixes ETSI/GSM [05.08]. Ces canaux sont parfois appelés "voies balises",
- les canaux de contrôle commun qui portent les informations de signalisation pendant l'établissement d'une connexion avant l'attribution des canaux dédiés,
- les canaux de contrôle dédiés qui portent l'information de signalisation pendant une communication.

L'Accès Multiple à Répartition dans le Temps demande une synchronisation poussée entre les mobiles et les stations de base, renforcée par l'existence d'un décalage constant de 3 IT entre l'émission et la réception. Les stations mobiles sont à des distances variables de la station de base avec laquelle elles établissent une liaison et elles subissent donc des délais de propagation variables qui peuvent être importants. Dans le contexte AMRT, deux mobiles utilisant des intervalles de temps consécutifs se trouvant l'un en limite de portée de la BTS et l'autre très proche de la BTS, subissent des délais de propagation différents et peuvent voir les informations qu'ils transmettent ne pas arriver dans le bon intervalle de temps et se chevaucher au niveau du récepteur de la BTS. Afin de compenser ce délai de propagation, les stations mobiles émettent un peu avant l'instant du début de l'IT. Ce décalage est appelé "Timing Advance (TA)". Il correspond au temps de propagation aller - retour de l'onde entre le mobile et la BTS avec laquelle il est en communication. Ce paramètre est géré automatiquement par le réseau et il est transmis au mobile lors de l'établissement d'une communication. Le paramètre TA est codé de 0 à 63 bits, la durée d'un bit dans le protocole GSM étant égale à 3,7 μ s, le TA peut prendre des valeurs allant de 0 à 233 μ s (ce qui correspond au temps de propagation aller - retour d'une onde sur 35 km, rayon maximal possible pour une cellule d'un réseau GSM). Le paramètre TA sera mis à jour au fur et à mesure que le mobile se déplace dans la même cellule ou quand le mobile change de BTS et cela par pas de 1 bit (3,7 μ s) soit environ une distance MS-BTS de 555 m. Ce processus est appelé alignement adaptatif de trames et est illustré figure 1.5.

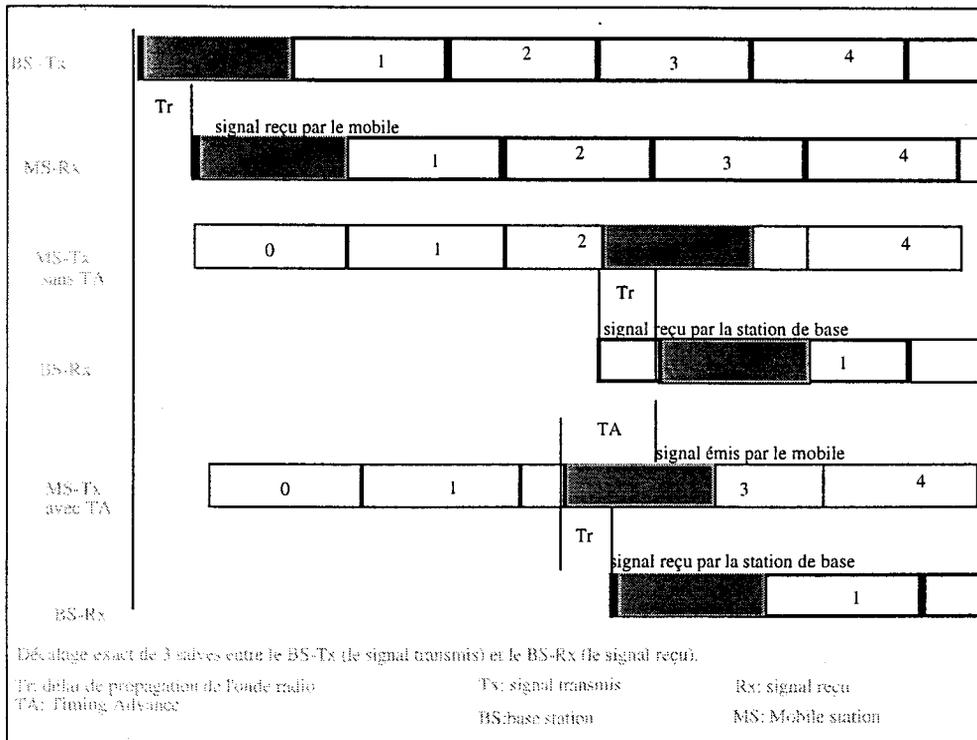


Figure 1.5 : Principe de l'alignement adaptatif de trame dans le GSM

Pour se protéger des erreurs susceptibles d'apparaître durant la transmission, le protocole du GSM met en oeuvre des techniques de codage et d'entrelacement mais aussi un algorithme "d'égalisation adaptative" qui consiste à transmettre une séquence connue du récepteur au milieu de chaque trame formée par les huit intervalles de temps. A partir de cette information et du signal reçu, le récepteur calcule le filtre inverse qui doit être appliqué à l'ensemble de la trame afin de limiter les distorsions introduites par la propagation dans le canal hertzien [7].

4.2 Principe de la localisation à partir du radiotéléphone GSM

Considérons un usager à bord de son véhicule qui se déplace dans la zone couverte par des stations de base différentes portant chacune une seule cellule. La connaissance d'au moins trois paramètres Timing Advance : TA_1 , TA_2 et TA_3 , en provenance de chacune des BTS fournit les informations d_1 , d_2 et d_3 de distance MS - BTS à partir desquelles on peut tracer trois cercles centrés sur les stations de base et de rayon d_1 , d_2 et d_3 comme indiqué figure 1.6. Le mobile pourra donc déterminer sa position à l'intérieur de la zone d'intersection des trois cercles. En pratique, le positionnement du mobile par rapport aux stations de base s'effectue en traçant non pas des cercles mais plutôt des anneaux d'épaisseur équivalente à l'incertitude de mesure de la distance comme illustré figure 1.6.

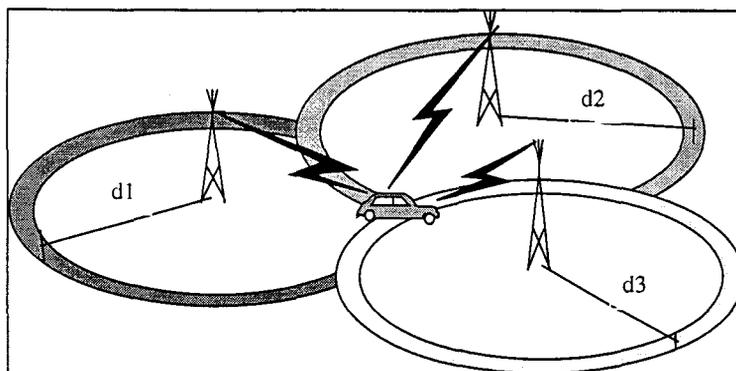


Figure 1.6 : Concept de la localisation par réseau téléphonique cellulaire

Soient X_1 et Y_1 les coordonnées connues de la station de base BTS_1 , située à une distance d_1 du mobile O de coordonnées inconnues X_0 et Y_0 , d_1 est le produit de la vitesse de propagation (vitesse de la lumière c) par la moitié du paramètre Timing Advance TA_1 reçu de la station de base BTS_1 . Le TA correspondant à un temps de propagation de l'onde aller-retour entre la station de base et le mobile. On peut établir l'équation suivante :

$$(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2 = \left(\frac{c * TA_1}{2}\right)^2 \quad (3)$$

L'équation (3) est celle du cercle centré sur la station BTS_1 et de rayon d_1 . Pour déterminer la position du mobile, il faut disposer de deux autres équations du même type. En prenant donc deux stations BTS_2 et BTS_3 , de coordonnées connues X_2, Y_2 et X_3, Y_3 qui sont situées respectivement aux distances d_2 et d_3 du mobile, on définit deux autres équations :

$$(X_2 - X_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 = \left(\frac{c * TA_2}{2}\right)^2$$

$$(X_3 - X_0)^2 + (Y_3 - Y_0)^2 = \left(\frac{c * TA_3}{2}\right)^2$$

Par la résolution de ce système de trois équations, on détermine la position O du mobile. Nous expliciterons au chapitre 2, les différentes étapes de calculs et les conversions qu'il convient de faire.

Le tableau 1 donne à titre indicatif les incertitudes de localisation que l'on peut espérer obtenir dans les cas les plus favorables selon que l'on prend en compte les valeurs de TA reçues de 3, 4 ou 5 stations de base. Pour effectuer ces calculs, on a considéré que les stations de base sont suffisamment éloignées du mobile de façon à pouvoir assimiler les arcs de cercles à des segments de droite.

nombre de BTS considéré	plage d'erreur de mesures (m)
1	0 à 550 m
2	0 à 380 m
3	0 à 275 m
4	0 à 190 m
5	0 à 75 m

Tableau 1 : Précision de la localisation possible en fonction du nombre de BTS

La précision de la localisation dépend de plusieurs paramètres :

- la précision brute obtenue sur le paramètre TA sur chaque station de base courante,
- la disposition relative des stations de base utilisées pour localiser le mobile,
- les erreurs de mesure engendrées par la présence des bâtiments qui sont à l'origine des trajets multiples et des effets de masque.

Comme dans les systèmes de localisation utilisant des réseaux de cercles construits à partir de la mesure des temps de propagation entre le mobile et des stations fixes, on constate que la précision obtenue dépend des positions relatives des stations de base considérées pour la localisation [1] et [12]. De tels systèmes de localisation doivent donc intégrer ce facteur dans le but d'effectuer la mesure avec le maximum de précision possible. On pense notamment ici à un choix judicieux des stations de base qui permet d'obtenir la localisation optimale en fonction de l'environnement proche du mobile. Cette notion de diminution de la précision d'origine géométrique ou GDOP est illustrée à l'aide de l'exemple de la figure 1.7.

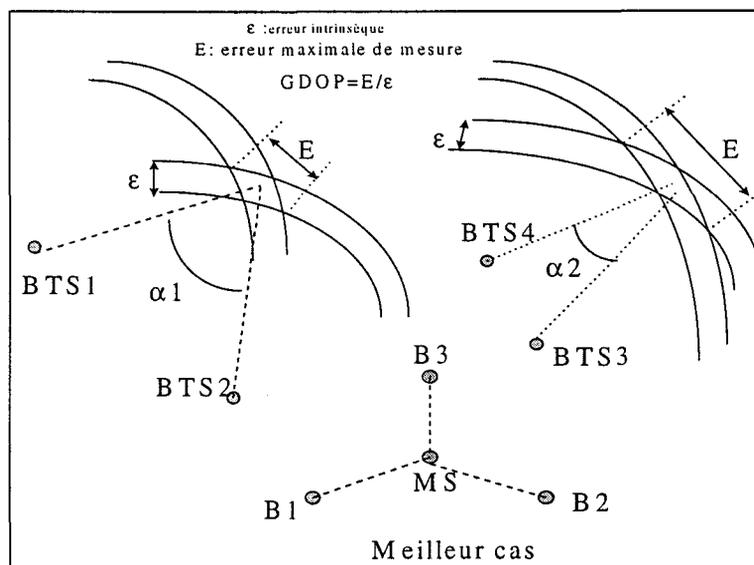


Figure 1.7 : Notion de GDOP, cas de deux stations de base du réseau GSM

La figure 1.7 présente deux cas dont les erreurs intrinsèques sont équivalentes : le cas 1 où le mobile fait un angle d'observation α_1 avec les deux stations de bases BTS_1 et BTS_2 et le cas 2 où le mobile fait un angle d'observation α_2 avec les deux stations de bases BTS_3 et BTS_4 , l'erreur imputable à la géométrie des stations de base est plus grande dans le second cas que dans le premier. En effet, l'angle α_1 étant supérieur à α_2 , l'erreur de mesure maximale possible sur la position du mobile est d'autant plus grande que l'angle d'observation est faible. Pour deux stations de base données, la meilleure précision sera obtenue lorsque l'angle d'observation des deux stations de base est égal à 90° . Dans le cas où l'on considère trois stations de base, la meilleure précision est obtenue lorsque les trois stations de base B_1, B_2 et B_3 sont disposées aux sommets d'un triangle équilatéral ou encore que les 3 angles d'observation sont égaux à 120° .

La localisation du mobile s'effectue à partir de la connaissance du paramètre TA qui varie lorsque le mobile s'éloigne ou se rapproche de la station courante. Pour localiser un mobile en position fixe lorsqu'une communication est établie, il convient de définir un réseau de cercles

distincts et donc d'obtenir des valeurs de TA en provenance d'au moins trois stations de base différentes. Ceci n'est possible que si l'on parvient à provoquer un changement de station de base (BTS) connu sous le nom de "Handover" inter - BTS. La mise au point d'un système de localisation utilisant un réseau cellulaire de type GSM dépend donc de la possibilité de forcer le système à effectuer des "Handovers" inter - BTS et donc de la possibilité pour le mobile de modifier intentionnellement les critères de déclenchement des "Handovers".

Le deuxième chapitre de ce mémoire présentera les solutions techniques mises en œuvre pour déclencher les "Handovers" afin de développer une approche de laboratoire qui n'est pas transposable en l'état sur un réseau de télécommunications mais dont l'objectif est d'évaluer sur site la disponibilité et la précision susceptibles d'être obtenues.

4.3 Cas des stations de base du GSM synchronisées

Plusieurs articles concernant l'évolution de l'infrastructure d'un réseau GSM évoquent la possibilité d'utiliser la synchronisation des stations de base entre elles pour améliorer de manière significative la précision de localisation par GSM. Cette synchronisation pourrait être effectuée en exploitant la référence du temps transmis par les satellites GPS. En effet, si le mobile reçoit, en plus du temps de propagation des signaux entre la station d'émission et le mobile, les temps de propagation des ondes entre les différentes stations de bases ; on peut alors tracer en plus des cercles, des hyperboles dont les foyers sont les stations de bases. Le lieu des points d'intersection de ces hyperboles représentent la position du mobile [7] et [8].

Dans l'état actuel de son fonctionnement, le réseau GSM n'effectue pas de synchronisation entre les différentes stations de base. Chaque station de base dispose de sa propre horloge de référence. Cette piste de recherche n'est donc pas exploitable pour le moment.

4.4 Localisation à partir d'un réseau d'émetteurs DAB - SFN

Avec le déploiement en Europe des réseaux de radiodiffusion sonore numérique de type DAB-SFN ou Digital Audio Broadcasting - Single Frequency Networks, il est possible d'exploiter des informations présentes dans les trames DAB pour localiser des mobiles terrestres à partir de la mesure depuis le mobile de la différence de temps d'arrivée des signaux en provenance de trois émetteurs distincts [41].

Le DAB est un système européen de radiodiffusion des signaux numériques qui offre une large variété de services multimédia tels que la transmission de données et d'images fixes associée à la transmission de signaux audio de grande qualité.

Contrairement aux réseaux actuels de radiodiffusion, il est possible d'utiliser la même fréquence pour la transmission d'un programme de radio national pour l'ensemble d'un territoire. En effet, les informations à transmettre sont portées par un grand nombre de fréquences de l'émetteur considéré. C'est la base du système de modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Chaque porteuse transmet deux informations : l'une relative au son audionumérique et l'autre relative aux autres porteuses (en fréquence et en temps) sur lesquelles se trouve l'information audio. Par ce procédé, les informations détruites du fait des multichemins lors de la transmission, pourront être reconstruites.

Dans le système DAB, les informations sont transmises sous forme de trames de longueur spécifique composées de trois canaux :

- un canal de synchronisation qui signale le début de la trame,
- un canal d'informations appelé FIC (Fast Information Channel) qui précise toute l'organisation de la trame,
- un canal principal appelé MSC (Main Service Channel) qui est divisé en sous-canaux multiplexés qui véhiculent les principales composantes des services.

Pour la localisation des mobiles, le système développé à l'Université de Kassel (Germany) présenté dans [41] exploite des informations présentes sur le canal de synchronisation et plus particulièrement l'information sur l'identité de l'émetteur ou TII (Transmitter Identification Information).

Les coordonnées du mobile à localiser sont obtenues à partir de la mesure depuis le mobile des différences entre les temps d'arrivées des signaux directs en provenance de trois émetteurs distincts. Ces différences de temps d'arrivées sont mesurées sur le TII d'une part, en exploitant des informations de glissement de phase entre plusieurs porteuses et d'autre part, en effectuant une évaluation complémentaire de la réponse impulsionnelle du canal.

Les précisions de localisation obtenues en Latitude et Longitude avec un tel système sont les suivantes :

- 0,1 degré décimal soit 11 km environ pour des mesures statiques lorsque le récepteur est en position fixe et que l'on n'utilise uniquement que le déphasage des signaux pour localiser le mobile, cette précision peut être ramenée à 3 km si on exploite en plus la réponse impulsionnelle du canal de propagation.
- les erreurs varient de 0,05 à 0,25 degré décimal soit entre 6 et 27 km en navigation, c'est à dire lorsque le mobile se déplace.

5. La localisation par radiogoniomètre

La radiogoniométrie est une technique qui permet de situer l'origine d'une émission hertzienne ou radioélectrique.

Il existe plusieurs types de radiogoniomètres, on peut citer : les radiogoniomètres à cadres mobiles, les radiogoniomètres utilisant les antennes présentant des diagrammes de rayonnement particuliers dits Yagi-Uda et cardioïdes et les radiogoniomètres Doppler qui sont les plus couramment utilisés.

5.1 Description des différents types de radiogoniomètre

Un radiogoniomètre est un dispositif permettant de mesurer l'angle de gisement d'une source d'émission radioélectrique. Selon la complexité du radiogoniomètre, il sera possible de connaître la direction, le sens et/ou la distance à laquelle se trouve la source [1]. Il existe différents types de systèmes : les radiogoniomètres à cadre orientable, les radiogoniomètres à cadres fixes et les radiogoniomètres automatiques dont deux utilisations pratiques sont les radiogoniomètres à commutation de diagramme et les radiogoniomètres Doppler.

5.1.1 Le radiogoniomètre à cadre orientable

Il s'agit d'un cadre constitué d'un certain nombre de spires de dimensions petites par rapport à la longueur d'onde, et connectées en série. Le cadre est orientable autour d'un axe vertical et est solidaire d'un écran gradué permettant de repérer son orientation.

La loi de variation de l'amplitude du champ électrique reçu en fonction de l'angle d'orientation du cadre est donné par la courbe de la figure 1.8.

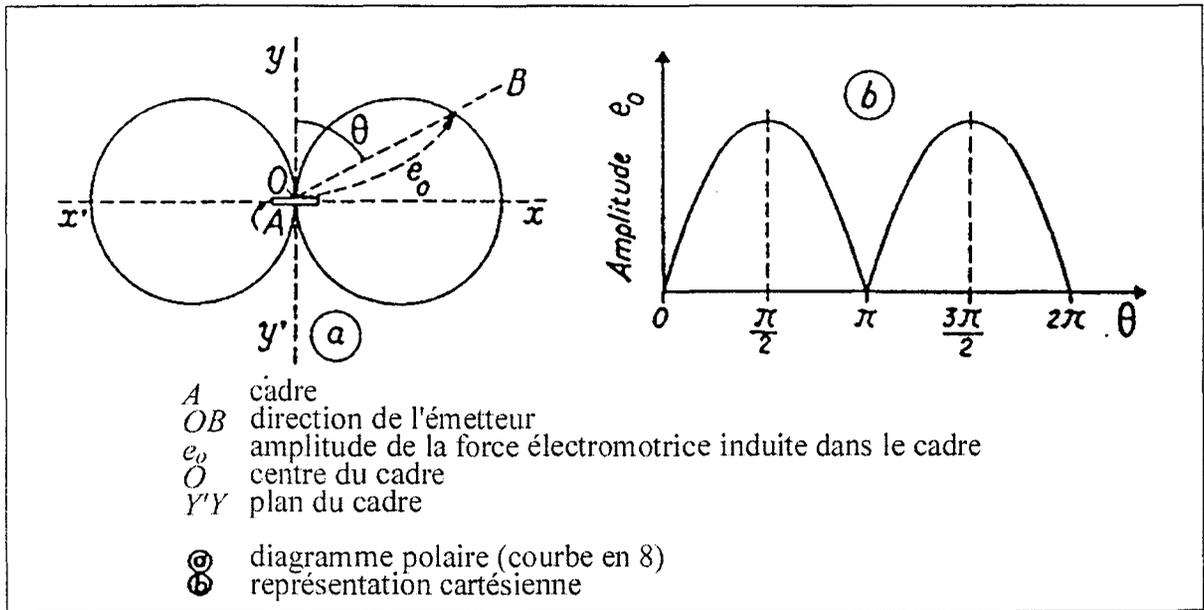


Figure 1.8: Champ électrique induit dans le cadre en fonction de son orientation.

On utilise pour la mesure de l'angle de gisement, le minimum qui se produit lorsque l'émetteur se trouve dans la direction perpendiculaire au plan du cadre. Avec un tel dispositif, on détecte la direction de l'émetteur mais on ne connaît pas son orientation. Pour ce faire on adjoint au dispositif précédent, une antenne omnidirectionnelle.

Moyennant la réalisation de conditions de phase convenables, on obtient selon les cas, l'un des diagrammes de rayonnement présenté figure 1.9 où V_1 représente la tension induite sur l'antenne omnidirectionnelle et V_0 la tension induite sur le cadre.

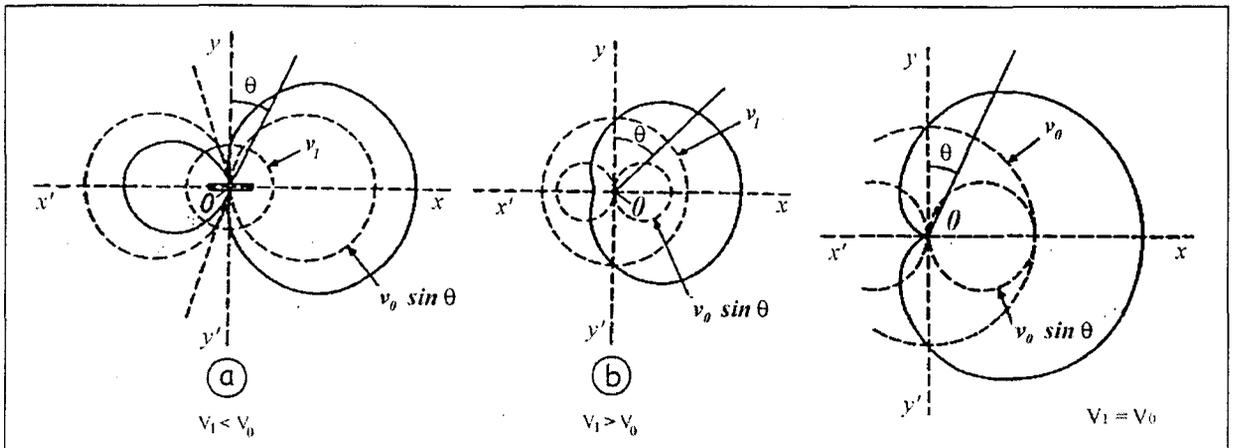


Figure 1.9: Champ électrique induit dans le cadre et l'antenne en fonction de l'orientation.

Si l'émetteur est du côté de l'axe Oy, c'est une rotation du cadre de 90° dans le sens trigonométrique qui permettra d'obtenir le maximum de signal reçu.

L'ajout de l'antenne omnidirectionnelle conduit à utiliser les radiogoniomètres à cadre orientable de la façon suivante:

- lorsque l'on est en période d'écoute simple, seule l'antenne est branchée,
- pour les mesures "radiogoniométriques", le cadre seul est branché,
- pour la détermination du sens de l'émetteur, l'antenne et le cadre sont branchés.

Ce type de radiogoniomètres est pratique tant que les fréquences d'utilisation sont élevées. Pour un fonctionnement dans la gamme des ondes longues (fréquences en dessous de 300 MHz), l'encombrement du dispositif rend difficile l'orientation de ces cadres. On utilise donc des radiogoniomètres à cadres fixes.

5.1.2 Les radiogoniomètres à cadres fixes

Le dispositif est encore connu sous le nom de système Bellini-Tosi (figure 1.10). Il s'agit de deux cadres fixes et perpendiculaires associés à un transformateur sinusoïdal double nommé "chercheur". Ce chercheur produit entre les stators, un champ magnétique dont l'orientation présente les mêmes caractéristiques que celles du champ électrique qui baigne les cadres. L'extinction du signal est obtenue par rotation du rotor du "chercheur", dans les mêmes conditions que celles qui résulteraient de la rotation d'un cadre mis à la place des deux cadres fixes.

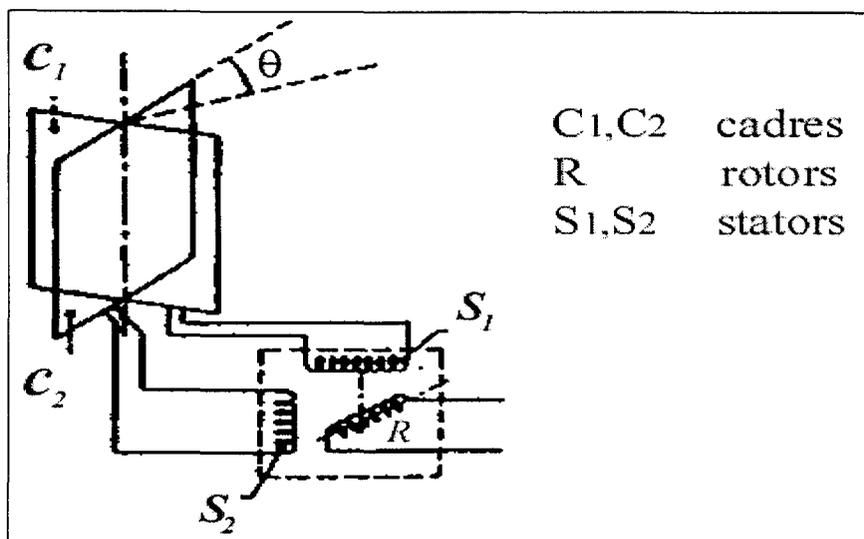


Figure 1.10: Radiogoniomètre Bellini-Tosi

Selon le même procédé de construction que le système Bellini-Tosi, on trouve les radiogoniomètres Adcock (figure 1.11). Il s'agit de deux antennes espacées d'une distance plus petite que la longueur d'onde et orientables autour d'un axe de symétrie. Les signaux recueillis sont mis en opposition de phase à la sortie du dispositif de réception.

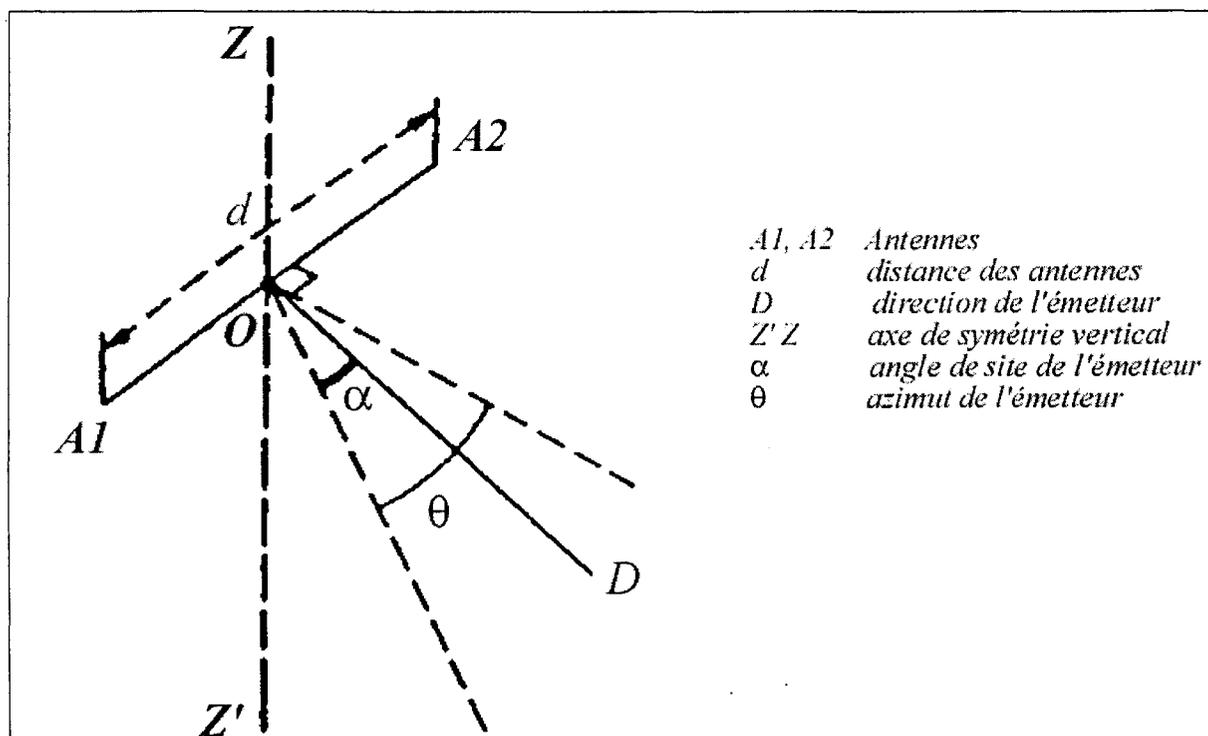


Figure 1.11: Radiogoniomètre Adcock.

En pratique, Pour des fonctionnements en ondes longues, moyennes et courtes, les systèmes Adcock sont constitués de quatre antennes fixes définissant deux plans perpendiculaires et reliées au stator d'un "chercheur". Pour lever le doute quant au sens de l'émetteur, une cinquième antenne est placée au centre de l'installation.

Aux fréquences UHF et VHF, les capacités parasites présentées par le "chercheur", rendent inexploitable le dispositif de mesures. On est alors amené à substituer le "chercheur" par un autre dispositif à tube cathodique comme indiqué figure 1.12.

5.1.3 Les radiogoniomètres automatiques

Ils sont aussi connus sous le nom de système de Watson-Watt (figure 1.12). C'est le même procédé de fonctionnement que le système Bellini-Tosi, le "chercheur" est remplacé par deux amplificateurs reliés à deux paires de plaques d'un tube cathodique supposées de même sensibilité. Le spot oscille au rythme du signal HF et décrit symétriquement par rapport au centre, une ligne droite dont l'orientation représente celle du champ électrique dans l'espace. Il suffit par la suite de disposer une échelle circulaire graduée superposée à l'écran du tube, pour mesurer l'azimut de l'émetteur.

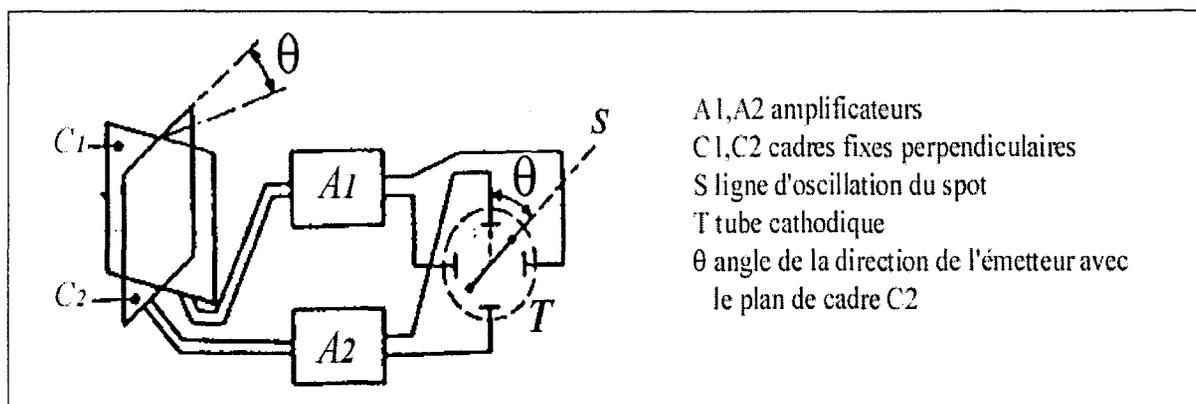


Figure 1.12: Radiogoniomètre Watson-Watt

L'utilisation essentielle des radiogoniomètres consiste en la détermination de la position des mobiles (avions, navires, mobiles terrestres) par rapport à des émetteurs connus.

On peut exploiter de plusieurs autres manières ces dispositifs selon l'application souhaitée. Nous présentons ici deux exemples d'utilisations pratiques des radiogoniomètres.

a) Les radiogoniomètres à commutation de diagrammes

Considérons un radiogoniomètre à cadre et antenne donnant un diagramme de rayonnement en forme de cardioïde. Si l'on commute de manière périodique le sens des connexions du cadre par rapport à celui de l'antenne, on obtient la courbe présentée sur la figure 1.13 représentative de l'amplitude du signal reçu au rythme de la commutation, de OM à ON ou de OM' à ON'.

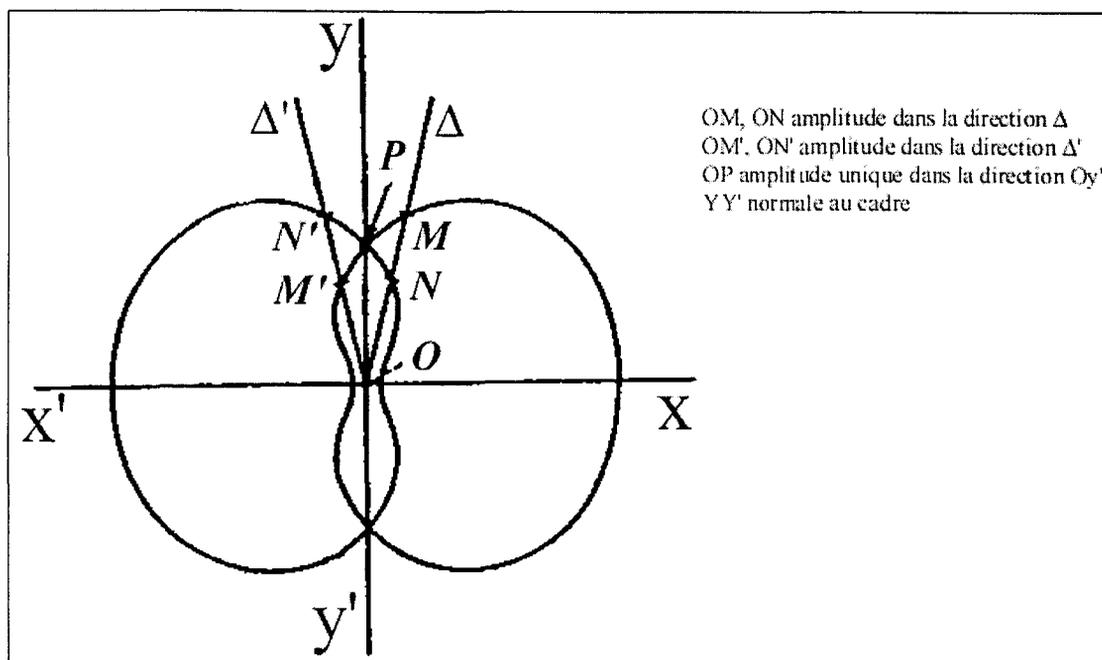


Figure 1.13: Radiogoniomètre à commutation de diagramme.

L'amplitude du champ électrique reste constante dans le cas où l'émetteur est placé suivant la normale au cadre.

Au lieu d'effectuer une commutation simple, on peut également procéder à une modulation d'amplitude du signal reçu. Le cadre est mis en rotation rapide à la fréquence de f tours/s, le diagramme tournant à cette vitesse, le signal reçu varie de façon sinusoïdale. La phase de cette modulation est caractéristique de la direction de l'émetteur. Pour réaliser la mesure de l'azimut de l'émetteur, il faut transmettre au récepteur, une phase de référence, par exemple celle qui correspond à la direction du Nord géographique. Par comparaison des phases, on obtient une valeur rattachée à l'azimut de l'émetteur.

b) Les radiogoniomètres à effet Doppler

Schématiquement, le radiogoniomètre Doppler comporte une antenne non directive qui tourne à f tours/s sur un cercle de rayon r grand devant la longueur d'onde. Le signal reçu en provenance de l'émetteur à localiser est modulé en fréquence de façon sinusoïdale à la fréquence f du fait des rapprochements et éloignements successifs de l'antenne provoqués par sa rotation. La phase du signal subit donc une modulation d'amplitude proportionnelle au rayon du cercle, et inversement proportionnelle à la longueur d'onde. La phase de cette modulation de fréquence est caractéristique de la position de l'émetteur. Par comparaison avec les signaux de référence correspondant à une position de référence donnée, on détermine [37] l'azimut de l'émetteur comme illustré figure 1.14.

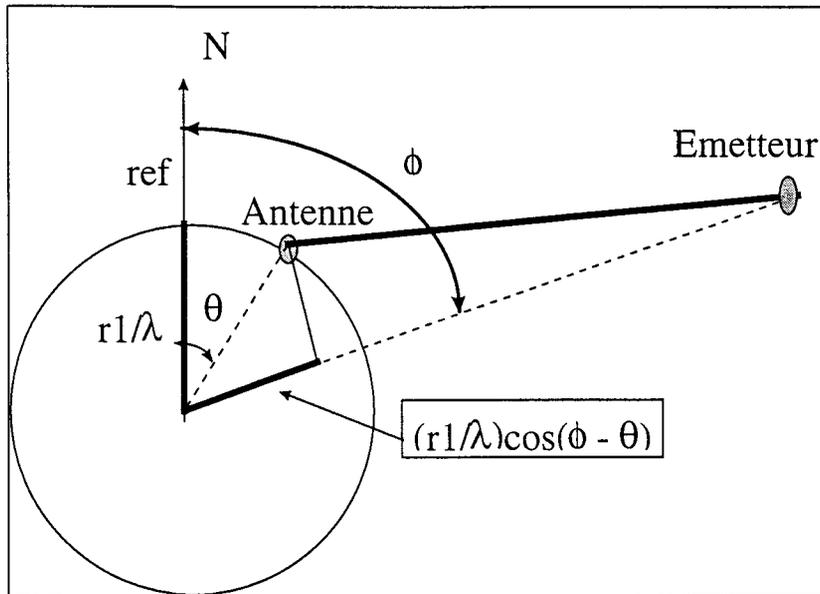


Figure 1.14: Radiogoniomètre Doppler : une antenne tournant.

L'amplitude du champ électrique reçu peut se mettre sous la forme suivante [37] :

$$E_r = A \sin(\omega_c t + \psi)$$

où ω_c est la pulsation de la porteuse et ψ est la phase à l'origine des dates telle que

$$\psi = \frac{2\pi r_1}{\lambda} \cos(\phi - \theta)$$

avec :

- r_1 / λ qui représente le rayon du cercle de référence sur lequel se déplace l'antenne,
- ϕ l'angle que fait l'émetteur avec l'axe de référence (par exemple le Nord géographique),
- θ l'angle que fait l'antenne avec cet axe de référence.

Lorsque l'antenne est mise en rotation autour d'un axe à la pulsation ω_d , θ est donné par la relation :

$$\theta = \omega_d t$$

La nouvelle expression de ψ est donc :

$$\psi = \frac{2\pi r_1}{\lambda} \cos(\phi - \omega_d t)$$

La rotation de l'antenne engendre une modulation de phase sur la porteuse. Si l'antenne est connectée à un récepteur muni d'un détecteur de modulation de phase (fréquence), le signal BF produit est une sinusoïde d'équation [37] :

$$E_{audio} = K_a \frac{2\pi r_1}{\lambda} \cos(\phi - \omega_d t)$$

Le signal BF a une fréquence F_d et une phase ϕ . A l'aide d'un traitement spécifique des signaux, on peut séparer la fréquence Doppler des autres et en déduire par la même occasion la mesure de la phase ϕ sur le signal " audio " qui correspond à l'azimut de l'émetteur.

En pratique, de tels radiogoniomètres sont réalisés surtout en ondes métriques et compte tenu de l'encombrement, il est difficile de faire tourner l'antenne. On substitue la rotation réelle de l'antenne par une succession d'antennes fixes disposées de manière régulière sur la circonférence du cercle et on commute de manière successive sur les antennes les unes après les autres à la fréquence f . Afin que les petits paliers constitués par la juxtaposition des signaux issus de chaque antenne se rapprochent d'une sinusoïde, il convient d'utiliser suffisamment d'antennes.

5.2 Principe de la localisation par radiogoniomètre

La localisation repose ici sur la connaissance de la position géographique des émetteurs conventionnels de radiodiffusion et les mesures angulaires de ces émetteurs obtenues à l'aide d'un radiogoniomètre à bord du mobile. Il s'agit pour cela de tracer les droites issues de l'émetteur et faisant un angle θ correspondant à l'angle mesuré par le radiogoniomètre par rapport à une référence donnée (typiquement le Nord géographique). En considérant plusieurs sources d'émission, on peut donc calculer l'intersection d'au moins deux droites qui correspondent aux directions des émetteurs.

Comme indiqué sur la figure 1.15, si un radiogoniomètre est placé en O (position du récepteur), un émetteur situé en E_1 et un autre émetteur situé en E_2 permettent de tracer deux droites (OE_1) et (OE_2). L'intersection des deux droites correspond à la position du mobile. Pour améliorer la précision de la mesure, un troisième émetteur placé en E_3 permet de définir un triangle d'incertitude au sein duquel se trouve le mobile; on détermine ainsi par triangulation la position du mobile [27].

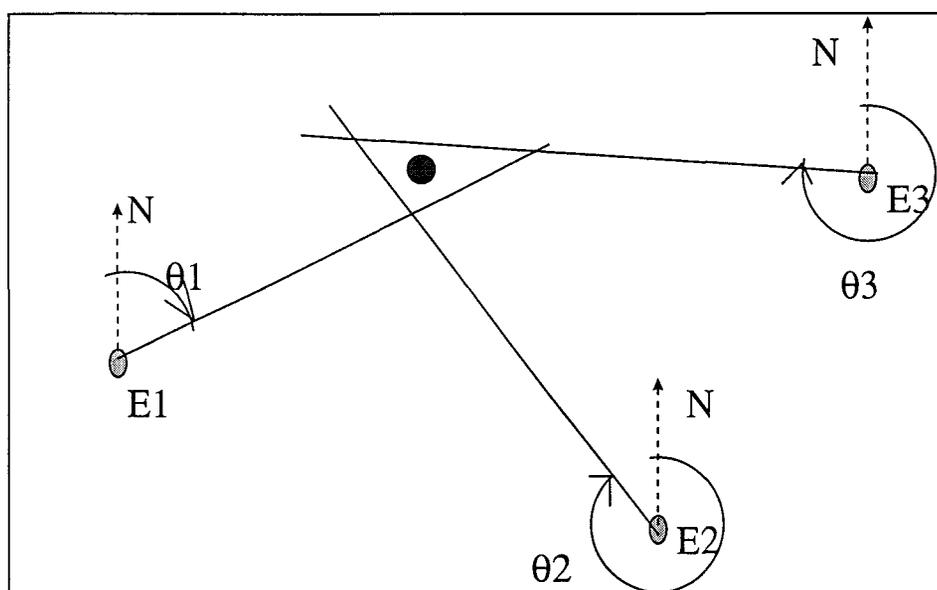


Figure 1.15: Principe de repérage d'un récepteur mobile par triangulation.

Les différentes étapes de calculs de la position du récepteur sont les suivantes :

Soient X_1 et Y_1 les coordonnées connues de l'émetteur E_1 . Soit θ_1 l'angle que fait l'émetteur avec O la position du mobile de coordonnées inconnues X_0 et Y_0 , par rapport au Nord. La droite passant par E_1 et faisant un angle θ_1 avec le Nord géographique est donnée par l'équation (4) suivante :

$$\tan(\theta_1) = \frac{X_0 - X_1}{Y_1 - Y_0} \quad (4)$$

En considérant un deuxième émetteur E_2 de positions connues X_2 et Y_2 et faisant un angle θ_2 avec le Nord géographique permet écrire l'équation (5) d'une deuxième droite :

$$\tan(\theta_2) = \frac{X_0 - X_2}{Y_2 - Y_0} \quad (5)$$

La résolution du système d'équations formé par les équations (4) et (5) permet de déterminer la position du mobile. En réalité, les erreurs intrinsèques de certains appareils de mesures sont élevées (5 à 10 degrés d'erreur angulaire); c'est pourquoi, dans un souci d'amélioration de la précision de localisation, on considère généralement un troisième émetteur E_3 de coordonnées X_3 , Y_3 et faisant un angle θ_3 avec le Nord géographique ; ce qui permet de définir une troisième équation :

$$\tan(\theta_3) = \frac{X_0 - X_3}{Y_3 - Y_0} \quad (6)$$

A moins d'être parallèles ou confondues, les droites définies par les équations (4) et (5) se coupent en un point P_1 , celles définies par les équations (4) et (6) se coupent en P_2 et celles définies par (5) et (6) se coupent en P_3 . Si les trois angles de gisement sont mesurés sans erreur, les points P_1 , P_2 et P_3 sont confondues et correspondent à la position O du mobile. Dans la pratique, les points P_1 , P_2 et P_3 sont disjoints. Dans ces conditions on considère que le barycentre des points P_1 , P_2 et P_3 correspond à la position O la plus probable du mobile. Les différentes étapes de calculs seront reprises au chapitre 3 de ce mémoire.

Parmi les erreurs qui entachent la mesure des angles, on peut citer:

- les erreurs dues aux imperfections des appareils ou erreurs intrinsèques des radiogoniomètres, typiquement, la précision du radiogoniomètre est de l'ordre d'une dizaine de degrés [26],

- les erreurs dues à la propagation. En effet, les ondes réfléchies ou diffractées sont retardées et présentent une polarisation différente de l'onde directe. Ce qui entraîne des erreurs quand on veut exploiter les caractéristiques d'amplitude ou de phase des signaux reçus.

Tout comme les procédés de localisation précédents, la disposition géométrique des émetteurs par rapport au récepteur joue un rôle important dans la précision de la localisation. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque les trois émetteurs forment un triangle équilatéral autour du récepteur [25] tout comme dans le cas de la localisation par GSM.

6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe de fonctionnement de trois grandes familles de systèmes de localisation de mobiles terrestres. Il s'agit :

- des systèmes de localisation fondés sur la mesure des temps de propagation des signaux entre le mobile à localiser et au moins trois stations d'émission, satellites GPS, stations de base d'un réseau de radiotéléphonie cellulaire GSM ou encore émetteurs de radiodiffusion DAB,
- des systèmes hyperboliques fondés sur la mesure des différences de temps de propagation entre les signaux issus d'émetteurs synchronisés pris deux à deux tels que les systèmes DECCA et LORAN C,
- des systèmes de localisation par radiogoniométrie fondés sur la mesure des angles de gisement d'émetteurs fixes.

Nous avons montré que dans chacun des cas, la précision de localisation dépend de plusieurs paramètres à savoir :

- l'erreur intrinsèque des mesures due aux imperfections des appareils de mesures,
- l'erreur due à la disposition relative des stations de base utilisées pour localiser le mobile ou encore le GDOP (Geometric Dilution Of Precision),
- les erreurs de propagation dues aux phénomènes de multichemins notamment en milieu urbain.

Dans la suite de ce mémoire, nous présenterons les résultats obtenus lors de la localisation d'un mobile terrestre à partir des stations de base d'un réseau de radiotéléphonie cellulaire GSM et de la mesure avec un radiogoniomètre Doppler des angles de gisement des émetteurs d'un réseau de radiodiffusion sonore conventionnel. Nous montrerons comment l'utilisation conjointe des deux systèmes permet d'améliorer la précision de localisation.

Chapitre II :

Utilisation des signaux de stations de base d'un réseau de radiotéléphonie GSM

Chapitre II : Utilisation des signaux de stations de base d'un réseau de radiotéléphone GSM

1. Introduction

Le principe de localisation par le réseau de radiotéléphonie cellulaire GSM repose sur la mesure du temps de propagation des signaux qui transitent entre le mobile qui cherche à se localiser et au moins trois stations d'émissions fixes distinctes du réseau GSM. Lors d'une communication, la mesure du temps de propagation est réalisée normalement par le réseau et codée sous le paramètre Timing Advance ou TA qui est à la base du principe de l'alignement adaptatif des trames dans le temps. Pour localiser le mobile, il faut obtenir des valeurs de TA en provenance d'au moins trois stations de base distinctes et ceci n'est possible que si l'on parvient à provoquer un changement de station de base ou handover inter-BTS. La faisabilité de la localisation par un réseau cellulaire de type GSM dépendra donc dans notre analyse, de la capacité du mobile muni du système à forcer le réseau à effectuer des handovers inter-BTS. Il ne s'agit que d'une étude exploratoire. Le processus ne pouvant être généralisé qu'avec l'accord et l'aide des opérateurs.

Quel que soit le procédé mis en œuvre, il convient de remarquer qu'il sera exigeant vis à vis du réseau et qu'il ne constitue aujourd'hui qu'une approche de laboratoire qui n'est pas généralisable en l'état sur un réseau de télécommunications.

Ce chapitre est consacré à l'évaluation des différentes solutions techniques que nous avons mises en œuvre pour provoquer des handovers inter-BTS à partir du mobile. Les solutions envisagées permettent au mobile de modifier intentionnellement les critères de déclenchement des handovers. Après avoir exploité des solutions simples fondées sur la modification localement du niveau et de la qualité du signal mesurés par le mobile, nous présenterons un système de source de brouillage agile en fréquence développé en vue d'automatiser le processus de déclenchement des handovers et d'améliorer ainsi la disponibilité du système de localisation.

2. Les paramètres du système GSM nécessaires pour la localisation et le principe du calcul des coordonnées du mobile

Pour se localiser en position fixe lorsqu'une communication est établie avec une station de base du réseau GSM, le mobile doit forcer le réseau à commander des handovers inter-BTS sur le canal dédié à sa communication. Pour se faire, il convient d'accéder à certains paramètres présents dans les messages de signalisation et influençant les critères de handovers afin de les modifier localement. Ces paramètres sont les suivants :

- les identificateurs des cellules et des stations de base (BCCH, BSIC, TCH, LAI, PLMN),
- la puissance émise par le mobile (TxPower),
- le niveau du signal reçu sur la cellule courante et sur les cellules voisines (RxLev),
- la qualité de la communication sur la cellule courante et sur les cellules voisines (RxQual),
- le paramètre TA ou Timing Advance.

Nous allons d'abord décrire brièvement chacun de ces paramètres pour bien comprendre leur rôle dans le processus de handover.

2.1 Les identificateurs des cellules

La couverture radioélectrique d'une zone géographique est assurée par le biais de cellules. D'après les spécifications et recommandations de l'ETSI [04.08], les identificateurs de cellules contiennent des informations suivantes :

- le numéro de canal radiofréquence du canal de diffusion BCCH (Broadcast Control CHannel). Les numéros de canaux radiofréquences disponibles sur la cellule pour les canaux de trafic TCH (Traffic CHannel). Ces numéros sont définis par l'opérateur en fonction des contraintes de la couverture radioélectrique ETSI [03.03], [04.08] et les valeurs attribuées aux cellules peuvent être modifiées par l'opérateur.
- Le BSIC (Base Station Identification Code) ou code d'identification de station de base est un paramètre codé sur six bits constitués de trois bits représentant le code du réseau et de trois bits représentant la station de base. Il est défini par l'opérateur lors du déploiement du réseau et peut être modifié en fonction des contraintes de la couverture radioélectrique notamment dans le cas de changement du plan de fréquences [8] ETSI [03.03] souvent lié à l'augmentation du trafic.
- La zone de localisation (LAI ou Local Area Identification) qui permet au réseau de situer le mobile dans un groupe de cellules bien précis.
- Le numéro de PLMN (Public Land Mobile Network) qui est le numéro du réseau GSM au sein duquel se trouve le mobile. La notion de PLMN découle de la vision pan européenne du GSM et permet de différencier les cellules d'un opérateur à un autre.

Chaque cellule du réseau d'un opérateur donné est identifiable par son numéro de PLMN et localisable dans une zone LAI. Elle est caractérisée par ses numéros de BCCH, de BSIC et de TCH, attribués par le réseau. Toutes ces informations sont accessibles sur les messages de signalisation par exemple via un mobile de test GSM.

2.2 Le TxPower ou la puissance à émettre par le mobile

Lorsqu'une communication est établie entre la station mobile (MS) et la station de base (BTS), cette dernière calcule périodiquement le niveau de puissance que doit émettre la station mobile et le transmet via les canaux de contrôle spécifiques SACCH (Slow-rate Associated Control CHannel) qui sont associés aux canaux de trafic qui portent la voie ou les données utilisateur. Ce niveau de puissance ou TxPower est codé sur cinq bits et prend des valeurs entières allant de 0 à 19. La valeur du TxPower évolue par pas de 2 dB et son expression en unité de puissance est donnée par la relation suivante:

$$P \text{ (dBm)} = 43 - 2 * \text{TxPower}(0 : 19) \quad (2.1)$$

La valeur maximale de la puissance que peut émettre un mobile dépend de sa classe [ETSI 05.05], [8], ce qui correspond en fonction des mobiles, à une variation comprise entre 43 dBm et 5 dBm ETSI [04.08], [8].

2.3 Le RxLev et RxQual, le niveau et la qualité du signal reçu par le mobile

Le paramètre RxLev est représentatif du niveau de signal reçu par le mobile en provenance des stations de base environnantes. En effet, dans un réseau de radiotéléphonie cellulaire au standard GSM, en mode veille ou en communication, le mobile mesure périodiquement toutes les 480 ms le niveau RxLev et la qualité RxQual des signaux en provenance d'au plus six cellules entourant ce mobile et les classe par ordre décroissant de niveau de signal en identifiant leur provenance. Ces mesures sont réalisées afin que le mobile puisse établir et maintenir une communication sur le canal offrant le niveau et la qualité des signaux reçus les meilleurs comparativement aux six stations entourant le mobile [8].

Le paramètre RxLev est codé sur 6 bits et prend des valeurs entières allant de 0 à 63 (ETSI [05.08]) ce qui correspond à des niveaux inférieurs à - 110 dBm jusqu'à des niveaux supérieurs à - 47 dBm. La correspondance en unité de puissance est donnée par la relation suivante:

$$\text{RxLev(dBm)} = \text{RxLev}(0:63) - 110 \quad (2.2)$$

Le paramètre RxQual caractérise la qualité du signal reçu. Il représente un taux d'erreurs bit (ou Bite Error Rate (BER)) calculé toutes les 480 ms à partir d'une séquence de bits connue du récepteur. Le paramètre RxQual est codé sur 3 bits et prend des valeurs entières allant de 0 (BER inférieur ou égal à 0,14 %) à 7 (BER supérieur ou égal à 12,8%) [ETSI 05.08]. Les opérateurs de radiotéléphone considèrent par exemple que, pour la voix, la qualité de la communication est correcte tant que le paramètre RxQual associé est inférieur ou égal à 3.

2.4 Le paramètre TA ou Timing Advance

Le paramètre Timing Advance (TA) représente le temps de propagation aller et retour des ondes radioélectriques entre le mobile et la station de base avec laquelle il est en communication. Ce paramètre est codé sur six bits et prend des valeurs entières allant de 0 à 63 [ETSI 04.08]. Une unité de TA correspond à la durée d'un bit, soit 3,7 μ s. Les valeurs de TA correspondent donc à des valeurs de temps de propagation comprises entre 0 et 233 μ s. Un TA de valeur 1 correspond à une distance aller/retour de deux fois 550 m. Le TA est transmis dans les messages de signalisation du protocole GSM associé au canal dédié. Sa

valeur est rafraîchie toutes les 480 ms. Le paramètre TA évolue si le mobile s'éloigne ou se rapproche de la cellule courante ou si en cours de communication, il y a un changement de station de base.

2.5 Calcul des coordonnées du mobile à partir du paramètre Timing Advance

Sans présumer des solutions techniques mises en œuvre, nous précisons dans ce paragraphe les équations qui permettent de calculer la position du mobile à partir de la connaissance des positions géographiques des stations fixes. Les informations de signalisation utilisées pour localiser le mobile transitent sur le réseau GSM entre le mobile et les stations fixes. Elles peuvent être analysées au niveau de l'interface air (ou Um) par le biais d'un mobile GSM dit de " tests " de type Orbitel qui les décode et les transmet au travers d'une liaison série RS232 vers un ordinateur de type PC. Des algorithmes ont été développés pour effectuer le décodage et le traitement des informations de signalisation utiles pour la localisation du mobile. Sous réserve de l'obtention d'un nombre suffisant de TA en provenance de stations de base différentes, on définit les cercles centrés sur chacune des BTS et de diamètre égal au Timing Advance. La position du mobile se situe dans la zone d'intersection des trois cercles.

Nous donnons ci-après un exemple de calcul des points d'intersection de deux cercles obtenus à partir de deux valeurs de TA de deux stations différentes.

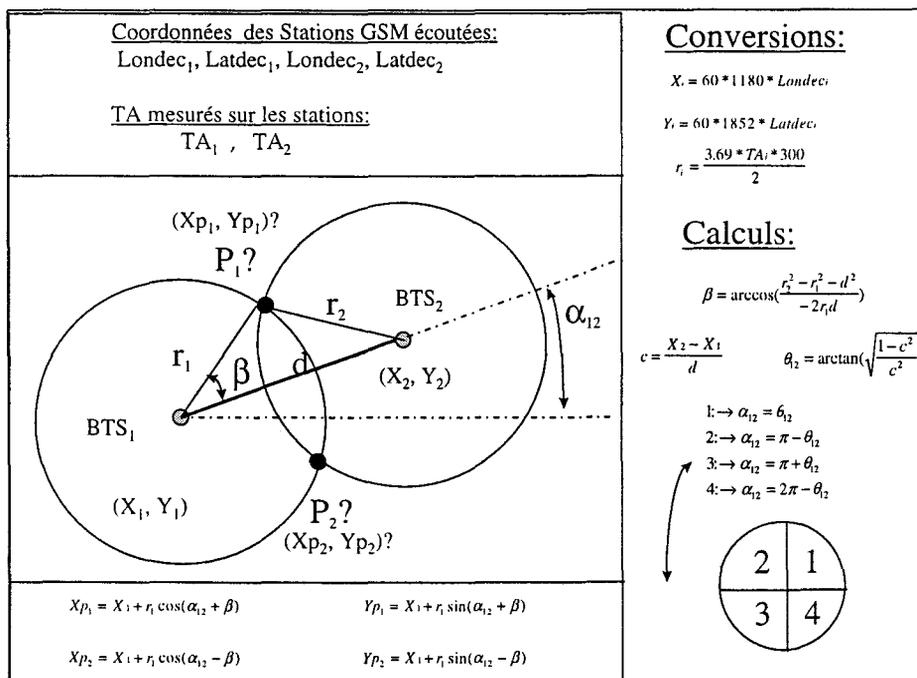


Figure 2.1 : Etapes de calcul de l'intersection de deux cercles

Sur le schéma de la figure 2.1 :

- X_1, Y_1 et X_2, Y_2 sont respectivement les coordonnées géographiques connues des stations de base BTS_1 et BTS_2 ,
- $Latdec_i$ et $Londec_i$ représentent respectivement la latitude et la longitude en valeurs décimales de ces stations de base ($i=1,2$),
- r_1 et r_2 sont les rayons des cercles centrés sur les stations BTS_1 et BTS_2 ,
- α_{12} est l'angle que fait l'axe horizontal du repère trigonométrique avec les stations BTS_1 et BTS_2 ,
- β est l'angle que fait un des points communs des deux cercles avec les stations BTS_1 et BTS_2 ,
- P_1 et P_2 sont les points d'intersections recherchés de coordonnées respectives X_{p_1}, Y_{p_1} et X_{p_2}, Y_{p_2} .

Il convient de convertir au préalable les valeurs de longitude et de latitude en valeurs métriques USI, ce qui donne les relations suivantes:

$$X_1 = 60 * 1180 * Londec_1 \quad X_2 = 60 * 1180 * Londec_2 \quad (2.3)$$

$$Y_1 = 60 * 1852 * Latdec_1 \quad Y_2 = 60 * 1852 * Latdec_2 \quad (2.4)$$

La valeur de TA_i reçue de la station i ($i=1,2$) est convertie en distance r_i correspondant au rayon du cercle qui s'exprime alors sous la forme :

$$r_i = (3,69 * TA_i * 300) / 2 \quad (2.5)$$

L'angle β est donné par la relation suivante :

$$\beta = \arccos\left(\frac{r_2^2 - r_1^2 - d^2}{-2r_1 d}\right) \quad (2.6)$$

L'angle α_{12} est calculé en prenant en compte les quatre cas de figures rencontrés correspondant aux 4 cadrans du repère trigonométrique comme illustré figure 2.1.

Enfin, les coordonnées des points d'intersection sont données par les relations :

$$X_{p_1} = X_1 + r_1 \cos(\alpha_{12} + \beta) \quad X_{p_2} = X_1 + r_1 \cos(\alpha_{12} - \beta) \quad (2.7)$$

$$Y_{p_1} = X_1 + r_1 \sin(\alpha_{12} + \beta) \quad Y_{p_2} = X_1 + r_1 \sin(\alpha_{12} - \beta) \quad (2.8)$$

Nous allons maintenant détailler les différentes solutions techniques mises en œuvre pour forcer le processus de « handover » à partir du mobile et obtenir ainsi un nombre suffisant de TA différents pour la localisation.

3. Les techniques développées pour forcer les handovers

La faisabilité de la localisation d'un mobile à partir du calcul des temps de propagation des signaux entre ce mobile et au moins trois stations de bases distinctes dépend dans notre analyse, de la capacité du mobile à forcer le réseau à déclencher le processus de handover. Pour ce faire, il convient d'accéder aux différents paramètres que nous venons d'expliquer afin d'en modifier la valeur localement pour déclencher des handovers inter-BTS.

Les solutions techniques que nous allons présenter ont été développées à partir de l'utilisation d'un mobile GSM dit de "tests" de type Orbitel qui décode et fournit au travers d'une liaison série RS232 vers un ordinateur de type PC, les informations de signalisation transitant sur le réseau GSM entre le mobile et les stations fixes.

Le niveau de signal RxLev reçu sur une cellule et la qualité de communication RxQual reçue par le mobile sur la cellule courante sont des paramètres importants parmi les critères de déclenchement des handovers ou de changement de cellule courante par le réseau. Deux approches de laboratoire ont été développées et sont illustrées par la figure 2.2. Elles permettent de modifier relativement les valeurs des RxLev et RxQual au niveau du mobile de test GSM.

- la première solution consiste à brouiller la qualité du signal reçu de la station courante par superposition d'un signal HF présentant les mêmes caractéristiques que le signal reçu, cela avant l'étage d'entrée du mobile afin qu'il puisse modifier la valeur du RxQual qu'il renverra au réseau,

- l'autre solution consiste à modifier le niveau de signal reçu sur la station courante par rotation d'une antenne directive du type Yagi-Uda qui, grâce à la forme particulière de son diagramme de rayonnement, va atténuer ou amplifier le signal dans des directions privilégiées. Par cet artifice, le mobile modifiera la valeur du RxLev qu'il renverra au réseau.

Comme indiqué sur la figure 2.2, ces solutions sont insérées avant l'étage d'émission/réception de ce dernier et ne modifient pas le fonctionnement normal du mobile de tests.

Une des difficultés pour la mise en œuvre de ces deux solutions réside dans le fait qu'il convient de provoquer un nombre suffisant de "handovers" inter-BTS et non pas des changements intra-BTS ou inter-cellules qui ne conduisent pas à l'obtention de nouvelles valeurs de TA nécessaires pour la construction des réseaux de cercles pour la localisation.

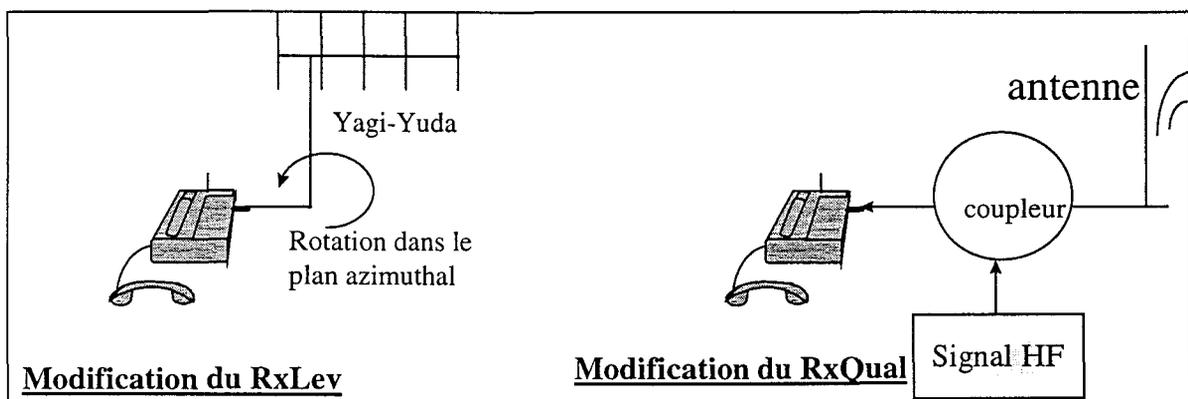


Figure 2.2 : Solutions techniques développées pour forcer les "handovers"

Nous détaillons dans les paragraphes suivants le principe et la mise en application de chacune des deux solutions développées dans le but d'évaluer la disponibilité et la précision susceptibles d'être obtenues par la seule exploitation d'informations transitant par le réseau cellulaire.

3.1. Modification du RxQual par brouillage du signal de la BTS

La première solution technique développée pour forcer les « handovers » à partir du mobile consiste à additionner, via un coupleur hybride, les signaux reçus de la station courante avec les signaux en provenance d'un dispositif perturbateur. Le dispositif perturbateur est un générateur de signal modulé qui présente les mêmes caractéristiques d'amplitude, de fréquence et de bande passante que le signal du canal de diffusion BCCH ou du canal de trafic dédié TCH à l'instant considéré. Un tel signal perturbateur permet de dégrader suffisamment la qualité de la communication pour qu'au regard des informations qu'il reçoit, le réseau provoque dans la plupart des cas des « handovers » sans coupure de communication.

En effet, en perturbant, après l'antenne, le signal du canal de contrôle de diffusion BCCH ou du canal de trafic dédié TCH, le mobile mesure une qualité de signal faible. Ces mesures étant retransmises au réseau, ce dernier réagit comme si le mobile s'était déplacé ou comme si des interférences étaient survenues. Si la qualité est suffisamment dégradée, il ordonne donc des changements de station de base courante et il sera alors possible de récupérer une nouvelle valeur de TA en provenance d'une nouvelle BTS. Si l'opération est répétée sur chacune des stations de base reçues (parmi les six que surveille le mobile) lors de la communication il est en théorie possible de récupérer 6 valeurs de TA différentes. Il faut noter ici que le mobile pourra analyser les informations en provenance de 6 BTS différentes uniquement s'il existe 6 BTS au voisinage du mobile. En zone rurale, la taille des cellules est généralement grande et le mobile ne sera capable de décoder les informations qu'en provenance de 3 ou 4 BTS. En zone urbaine dense, la taille des cellules est généralement faible mais en raison des constructions denses qui forment des masques, le mobile dans ce cas aussi n'est capable de recevoir les signaux qu'en provenance de 3 ou 4 BTS voire moins.

Comme indiqué sur la figure 2.3, le dispositif perturbateur est inséré entre le mobile et son antenne de réception omnidirectionnelle. Il est composé d'un générateur de signaux modulés et d'un coupleur hybride qui permet d'isoler les deux voies et d'additionner le signal en provenance de la BTS et le signal « perturbateur ».

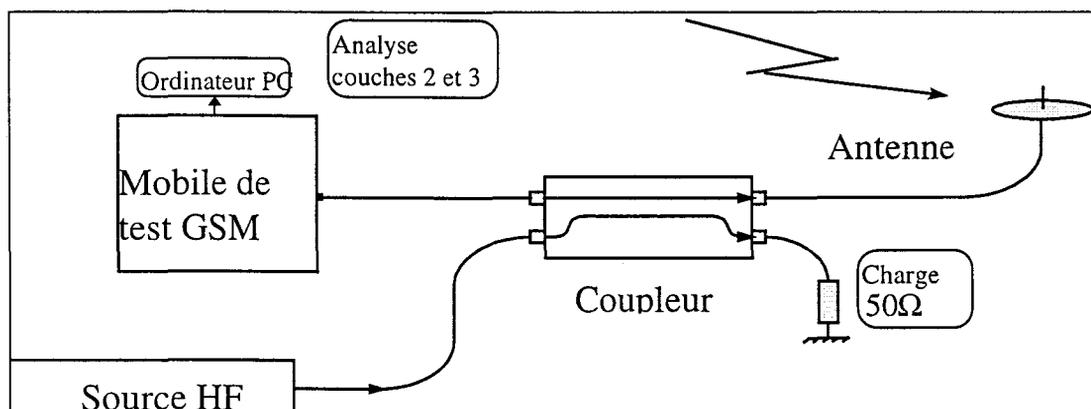


Figure 2.3 : Dispositif de brouillage du signal reçu de la station courante.

3.1.1 Résultats expérimentaux

Des essais ont été réalisés avec le dispositif de brouillage décrit. On constate que dans la plupart des cas, il est difficile d'obtenir les trois valeurs de Timing Advance nécessaires à la localisation. En effet, lorsque le signal reçu à la fréquence F1 de la BTS courante est perturbé, on provoque dans la plupart des cas un handover vers la BTS voisine que le mobile entend le mieux et dont le BCCH est à la fréquence F2. Lorsque cette fois on apporte la perturbation sur la BTS à la fréquence F2, le mobile qui ne s'est pas déplacé retourne généralement vers la BTS dont le BCCH est à la fréquence F1 qui n'est plus perturbée.

Pour déclencher un handover vers une troisième BTS dont le BCCH serait à la fréquence F3, une solution consisterait donc à perturber simultanément les fréquences F1 et F2. Ceci suppose de disposer à cet effet de deux générateurs commandés extérieurement et capable de perturber les canaux radiofréquences au fur et à mesure de leurs évolutions.

Si l'on veut maintenant généraliser le processus sur 6 fréquences, il est donc nécessaire de développer un système capable de perturber la fréquence F_i tout en maintenant les perturbations sur toutes les autres fréquences déjà perturbées au préalable et cela en relation avec les informations relatives aux BTS que le mobile analyse en permanence. Le système perturbateur devra donc perturber successivement toutes les fréquences sauf une, celle en provenance de la BTS pour laquelle on souhaite mesurer le TA.

3.2 Modification du RxLev ou niveau de signal reçu de la BTS courante

Le deuxième procédé développé pour forcer les handovers consiste à remplacer l'antenne de réception omnidirectionnelle du mobile par une antenne à grand gain de type " Yagi-Uda " comme illustré par la figure 2.4. De par son diagramme de rayonnement, une telle antenne directive offre la possibilité " d'amplifier " les signaux dans la direction du lobe principal et " d'atténuer " ceux dans les autres directions.

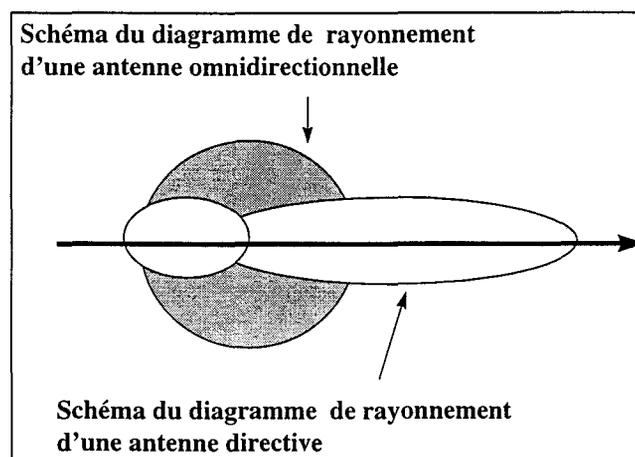


Figure 2.4 : Comparaison schématique des deux diagrammes de rayonnement

En effectuant un balayage lent de 360° dans le plan azimutal de l'antenne, on favorise la réception successive des signaux issus de la station de base courante, puis ceux issus des stations de base avoisinantes. De cette façon, on indique au réseau que la liaison avec la station de base courante se dégrade tandis que celle avec d'autres stations de base s'améliore au fur et à mesure de la rotation de l'antenne. Ces conditions simulent un déplacement fictif

du mobile sans modification de la valeur de TA et une dégradation artificielle des paramètres RxLev et RxQual aptes à provoquer des changements de stations de base.

3.2.1 Principe des expérimentations

Des expérimentations ont été effectuées en connectant le mobile de tests à l'antenne Yagi-Uda seule, puis en associant cette antenne directive avec un dispositif perturbateur.

Dans la zone d'essais, le mobile est entouré d'un nombre important de cellules et de stations de base. Lorsqu'une communication est établie entre le mobile et le réseau GSM, une rotation très lente de 360° de l'antenne directive est effectuée dans le plan azimutal de l'antenne, afin de laisser suffisamment de temps au réseau pour effectuer les "handovers".

Nous utilisons pour localiser le mobile, la base de données des coordonnées géographiques des stations de base du réseau de radiotéléphonie GSM Itineris de l'agglomération lilloise très aimablement fournie par l'opérateur France Telecom. Ces positions étant confidentielles, nous ne donnerons qu'une représentation schématique des stations de base par rapport au mobile, lorsqu'il s'agira d'illustrer les tableaux de mesures expérimentales. Nous indiquerons uniquement les noms génériques choisis qui sont pour la plupart les noms des villes de l'agglomération Lilloise dans lesquelles sont implantées quelques BTS du réseau GSM Itineris. Il s'agit de Roubaix, Tourcoing, Wasquehal, Hem, Ascq, Villeneuve d'Ascq (V d'Ascq), Loos, Haubourdin, Canteleu, Ronchin, Lille, Faches, Forum.

L'acquisition, le décodage et la mise en forme en temps réel des messages de signalisation disponible sur la liaison série RS232 du mobile de test se font à l'aide d'un logiciel développé à cet effet. Ce logiciel permet également de définir, à partir des valeurs de TA obtenues, le réseau de cercles nécessaires à la localisation du mobile et d'évaluer les erreurs qui existent entre la position calculée et celle déterminée sur une carte IGN (Institut Géographique National) au 1 : 25 000ème. Les positions du mobile sont choisies et reportées sur la carte IGN sachant que 1 cm représente 250 m. Il convient de noter ici qu'une erreur de positionnement sur la carte de l'ordre de 6 mm sera du même ordre de grandeur que l'erreur que l'on cherche à mesurer. Les coordonnées des points sont calculées et servent de valeurs de référence pour évaluer l'erreur de positionnement par comparaison avec les valeurs déterminées par GSM.

L'objectif de ces expérimentations n'est pas de « localiser » le mobile mais d'évaluer, pour des positions pré-déterminées, la disponibilité et la précision susceptibles d'être obtenues avec les procédés mis en œuvre, cela en comparant, sur une même carte IGN, la position théorique du mobile avec celle mesurée par GSM.

3.2.2 Résultats expérimentaux obtenus avec l'antenne Yagi-Uda seule

Pour trois positions différentes du mobile (Points A, B et C) en milieu urbain et suburbain de l'agglomération lilloise, les tableaux 1 à 3 présentent des exemples de localisation obtenus en remplaçant l'antenne de réception omnidirectionnelle de la station mobile par une antenne directive et en effectuant une rotation lente de 360° dans le plan azimutal de l'antenne.

Dans les tableaux 1 à 3, nous indiquons les cellules courantes avec lesquelles le mobile a établi une communication et les valeurs de TA (en fraction de bits) reçues sur les stations de base courantes correspondantes qui permettent de calculer la position du mobile. Cette position est comparée d'une part à la position déterminée sur la carte IGN et d'autre part à la position obtenue par GPS et reportée sur la carte IGN. A titre indicatif, nous donnons la valeur de TA attendue c'est à dire la valeur de TA qui correspondrait à la distance exacte entre la

station de base et le mobile. Nous rappelons qu'une unité de TA (1 bit) correspond à 550 mètres environ.

Certaines cellules dépendent d'une même station de base. Dans ce cas, elles portent le même nom de BTS mais sont affectées de numéros différents. Elles ne permettent de définir que des cercles de même centre. Comme illustré dans le tableau 1, la localisation ne peut donc se faire qu'en considérant des informations de deux groupes de trois cellules : abc et ab'c appartenant à des BTS distinctes.

Dans le tableau 1, nous présentons le résultat d'essais effectués au point A situé en milieu suburbain.

Point A Suburbain				
Identifiant de la cellule		TA attendu	TA reçu	Erreur GSM/IGN
Roubaix	a	3,27	3	abc 150 m ab'c 450 m
Wasquehal 1	b	6,42	6	
Wasquehal 2	b'	6,42	7	
Tourcoing	c	8,72	9	

Tableau 1 : Résultats des essais au Point A en milieu suburbain.

Les niveaux des signaux reçus en mode veille avec l'antenne de réception omnidirectionnelle du mobile au point A montrent que les différences entre les niveaux des signaux en provenance des stations des BTS environnantes sont faibles et varient entre 0 et 6 dB. Au cours des quatre essais effectués à cet endroit, quatre valeurs de TA ont été obtenues en provenance de trois stations de base, les BTS Roubaix, Wasquehal et Tourcoing. Deux valeurs de TA ayant été obtenues sur la station de base Wasquehal.

Les erreurs sur les mesures de distances entre la station mobile et les stations de base Roubaix, Wasquehal 1 (TA=6), Wasquehal 2 (TA=7) et Tourcoing sont respectivement de 150, 230, 320 et 154 mètres et l'écart entre la position déterminée par GSM et la position IGN est de 150 mètres ou 450 mètres selon que l'on considère pour les calculs, la valeur de TA égale à 6 ou à 7 pour la BTS Wasquehal. La précision de localisation dépend donc des valeurs de TA utilisées.

Bien que les erreurs sur les mesures de distances entre le mobile et les stations de base n'excèdent pas 320 mètres, les erreurs sur la localisation avoisinent les 500 mètres dans le second cas (cas **ab'c** du tableau 1). On observe que ce résultat est lié à la "mauvaise" disposition des stations de base autour du mobile. Ceci fait référence à la notion de « Geometric Dilution Of Precision » (GDOP) explicité au chapitre 1 pour le système GPS. Dans le cas de la localisation à partir de trois stations d'émissions fixes, la précision de localisation sera d'autant meilleure lorsque les droites reliant le mobile et les BTS feront un angle proche de 120° entre elles, autrement dit lorsque les BTS seront équiréparties autour du mobile. Sur la figure 2.5 nous illustrons ce résultat par la représentation graphique des deux cas suivants :

- le cas réel considéré (mesure au point A) où les BTS occupent leurs positions exactes sur la carte IGN,
- le cas dit " idéal " où les BTS sont à la même distance du mobile que précédemment, mais disposées de façon que les droites passant par le mobile et chacune des BTS se coupent à environ 120° . Dans une telle configuration, les calculs montrent que l'erreur de localisation n'excéderait pas 275 mètres.

Dans le cas où l'on considère la valeur moyenne arithmétique (6,5) des deux valeurs de TA obtenues sur la station Wasquehal, l'erreur de mesure de distance sur cette station n'est plus que de 44 mètres. Une seule position est alors possible pour le mobile avec une erreur de localisation de 275 mètres dans le " cas réel " et de 165 mètres pour une disposition des stations de base à 120° autour du mobile.

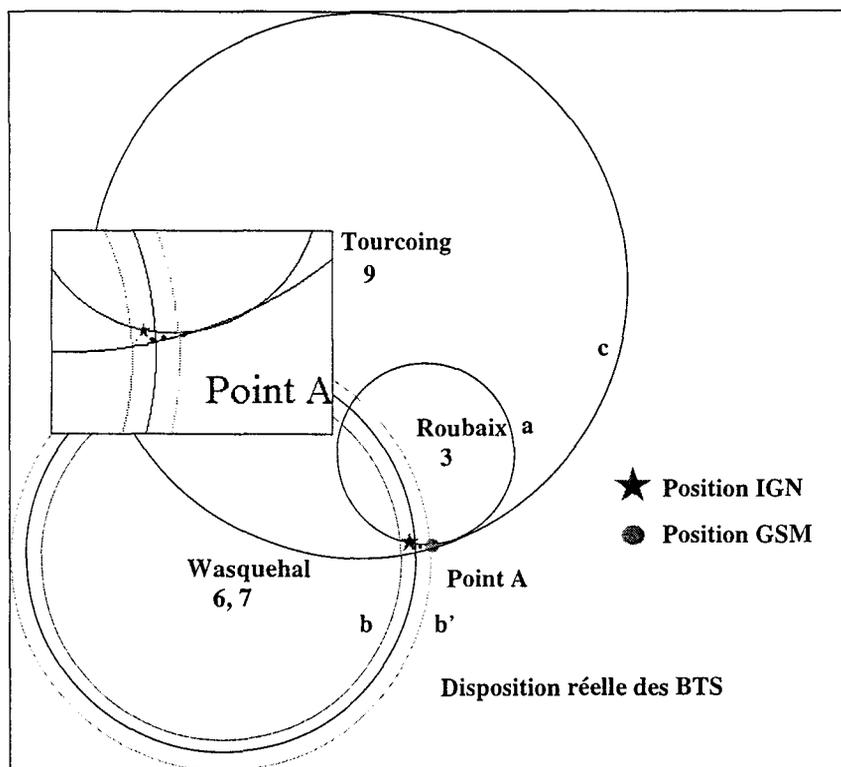


Figure 2.5-a: Détermination de la position du mobile au Point A par GSM.

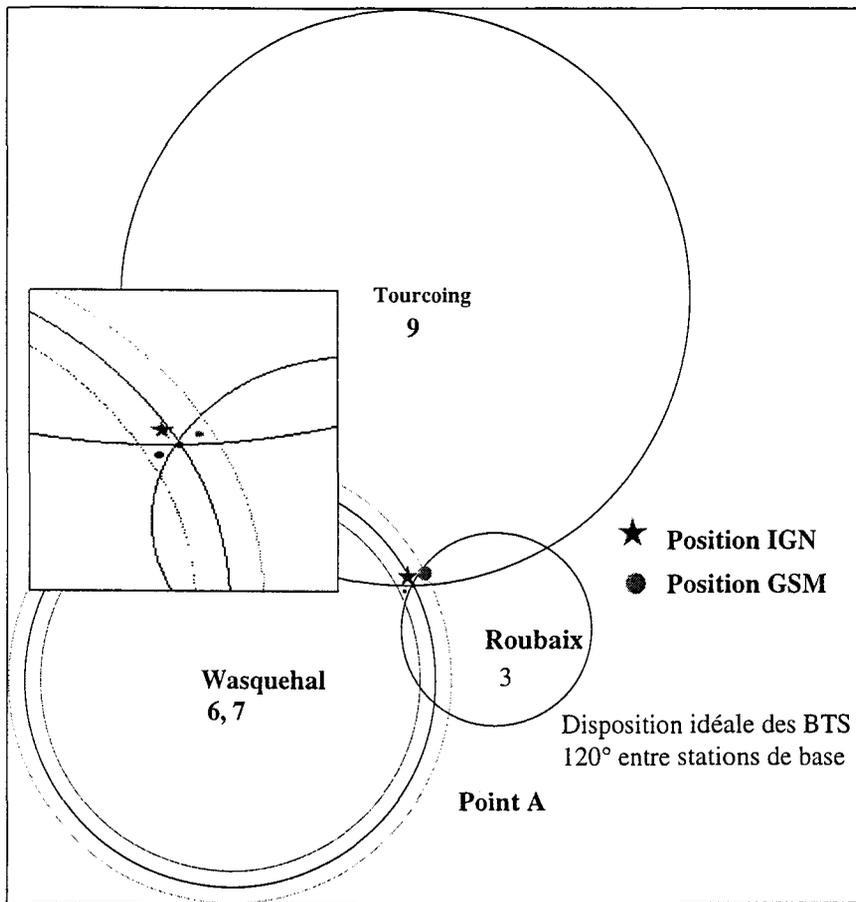


Figure 2.5-b: Détermination de la position du mobile au Point A par GSM.

Dans le tableau 2, nous présentons le résultat d'essais effectués au Point B en milieu urbain et la figure 2.6 donne une représentation schématique de la position réelle des stations de base autour du Point B.

Point B urbain				
Identifiant de la cellule		TA attendu	TA reçu	Erreur GSM/IGN
Roubaix	a	6,12	6	abc/abcd 75 m
Hem	b	3,18	3	abd 300 m
Hellemmes	c	12,14	12	abd' 275 m
Ascq 1	d	10,76	10	bcd 250 m
Ascq 2	d'	10,76	11	acd 212 m

Tableau 2 : Résultats des essais au Point B en milieu urbain.

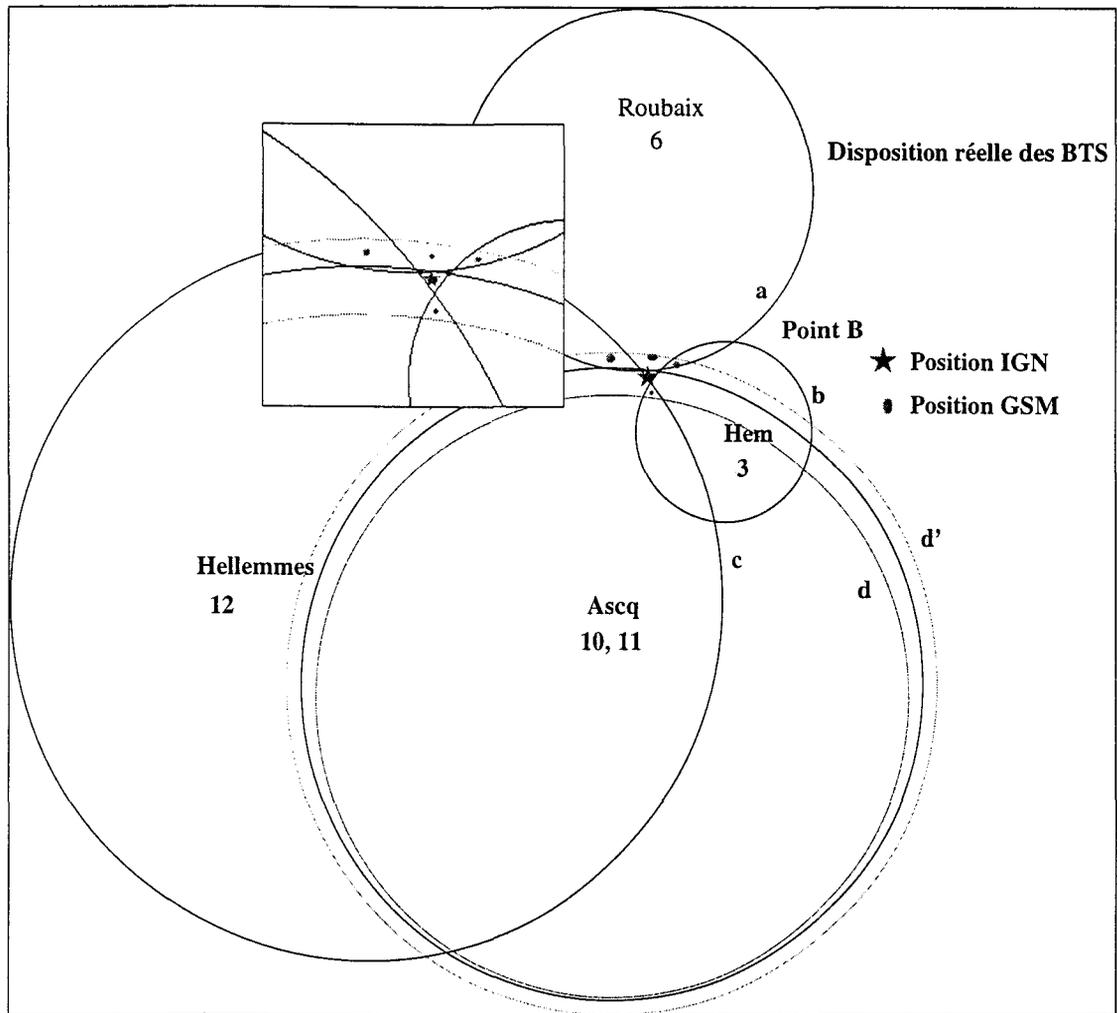


Figure 2.6 : Détermination de la position du mobile au Point B par GSM.

Le Point B est situé à Hem en milieu urbain. Cinq valeurs de TA ont été obtenues en provenance des stations de base de Roubaix, Hem, Hellemmes et Ascq. Les écarts de distance entre la position GSM et la position du mobile sur la carte IGN varient entre 75 (cas **abc** et **abcd** du tableau 2) et 300 mètres dans le cas le plus défavorable (cas **abd** du tableau 2). Cet exemple illustre le fait que la précision de la localisation du mobile obtenue dans le cas favorable, dépend de deux facteurs qui sont :

- la disposition des stations de base autour du mobile (dans ce cas les BTS sont presque équi-réparties autour du mobile),
- la précision de la mesure des distances aux stations de base.

Les distances entre le point B et les BTS Roubaix, Hem et Hellemmes sont respectivement de 66, 99 et 77 mètres. Sur la station Ascq, l'erreur sur la mesure de distance est égale à 418 mètres, si on considère 10 comme valeur de TA et à 132 mètres, si on prend la valeur 11. Comme dans le cas précédent, en considérant plutôt la valeur moyenne des deux valeurs de TA obtenues soit 10,5, l'erreur sur la mesure de distance sur la station Ascq devient égale à 143 mètres, et la précision de la localisation varie de 75 à 125 mètres selon les cas considérés.

Dans le tableau 3 ci-après, nous présentons le résultat d'essais effectués au Point C en milieu urbain.

Point C urbain			
Identifiant de la cellule	TA attendu	TA reçu	Erreur GSM/IGN
Loos	4,27	4	475 m
Haubourdin	4,63	4	
Canteleu	4,54	4	

Tableau 3 : Résultat au Point C en milieu urbain

A l'issue de l'essai, trois valeurs de TA ont été obtenues avec les BTS Loos, Haubourdin et Canteleu. Les erreurs sur la mesure de distances entre le mobile et chaque station de base ne dépassent pas 350 mètres. L'écart de distance entre la position IGN et la position obtenue par GSM est de 475 mètres.

A nouveau, on observe que l'erreur de localisation est importante d'une part, à cause des erreurs de mesures de distance entre les BTS et le mobile et d'autre part, à cause de la disposition des stations de base considérées qui ne sont pas équi-réparties autour du mobile comme indiqué sur la figure 2.7. Comme le cercle centré sur la station Canteleu et celui centré sur la station Loos sont disjoints, l'incertitude sur la position du mobile est grande et contribue à l'augmentation de l'erreur de localisation. Nous présentons à nouveau ce que serait le cas " idéal " où les stations de bases seraient disposées régulièrement à la même distance du mobile, puisque nous avons obtenu par la mesure les mêmes valeurs de TA dans les 3 cas. L'erreur de localisation devient alors inférieure à 150 mètres.

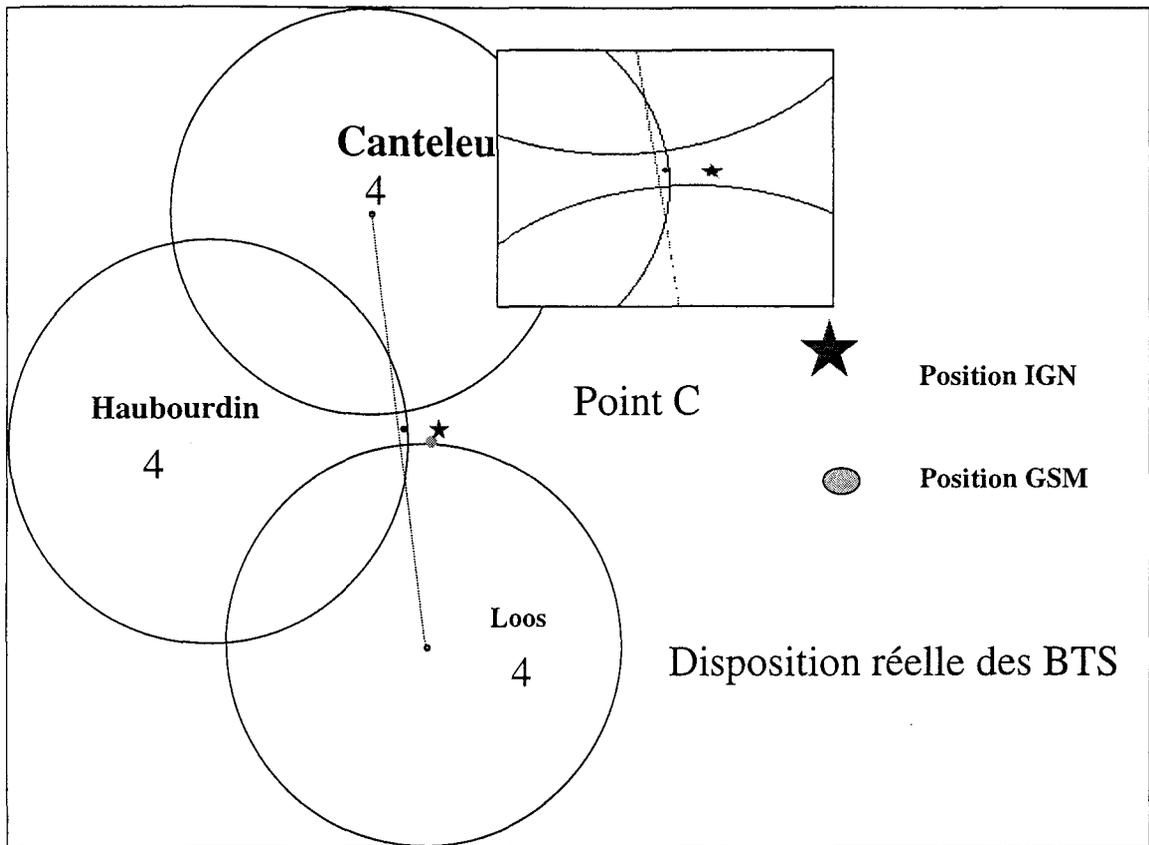


Figure 2.7-a: Détermination de la position du mobile au Point C par GSM.

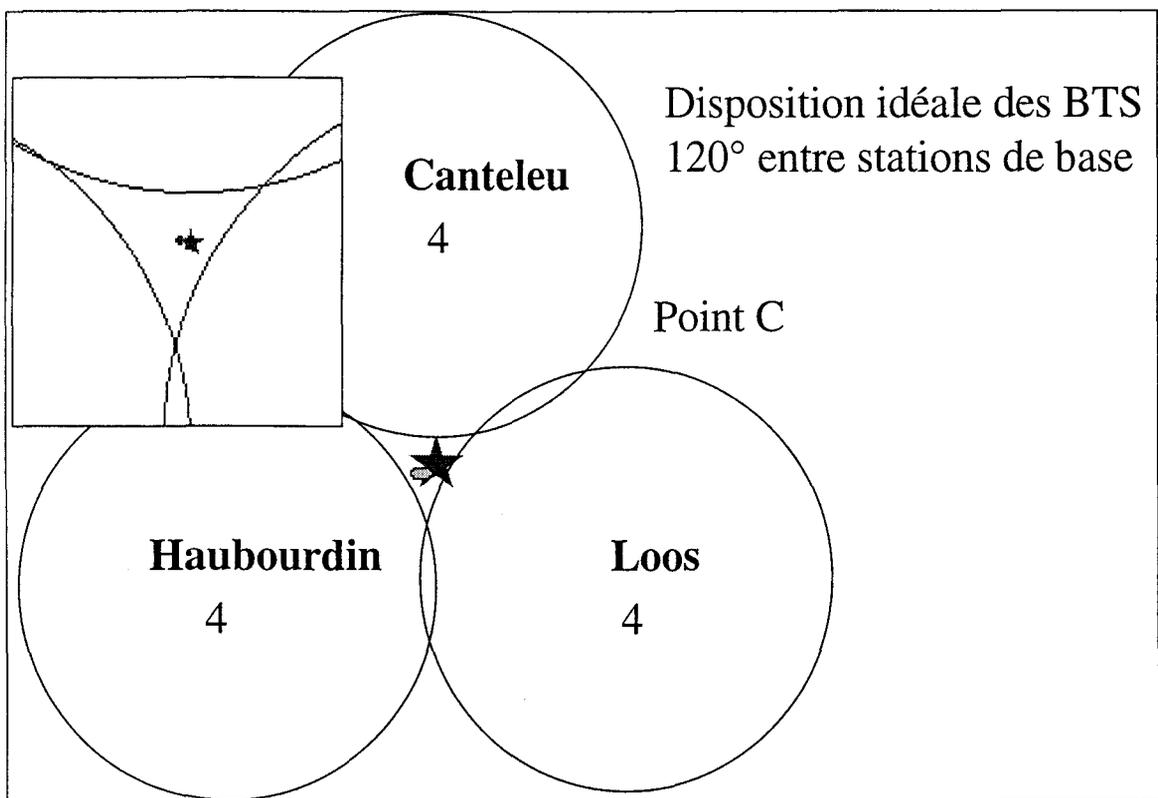


Figure 2.7-b : Détermination de la position du mobile au Point C par GSM.

Avec les mesures réalisées aux points A, B et C, trois cas significatifs de localisation ont été présentés à partir des nombreuses expérimentations effectuées. Ils permettent de mettre en évidence que la précision de la localisation dépend de deux paramètres essentiels :

- la précision de la mesure des distances entre les BTS utilisées et le mobile,
- la disposition des BTS utilisées pour la localisation autour du mobile.

La solution simple qui consiste à remplacer l'antenne omnidirectionnelle du mobile par une antenne « Yagi-Uda » ne permet pas la localisation avec un taux de réussite important. En effet, il arrive que le mobile ne puisse établir la communication qu'avec deux, voire seulement une station de base du réseau GSM, ce qui est insuffisant pour la localisation.

Les essais réalisés en milieu urbain et suburbain ont montré que cette méthode est surtout efficace, lorsque les niveaux des signaux reçus sur les stations voisines avec l'antenne omnidirectionnelle du mobile sont du même ordre de grandeur (différence entre 0 et 6 dB), ce qui permet de tirer partie du diagramme de rayonnement particulier de l'antenne « Yagi-Uda ». Dans les zones urbaines denses, là où la différence entre les niveaux des signaux reçus sur la cellule courante et les cellules voisines est grande (différences de 10 à 15 dB) du fait de la présence de masques, il est assez difficile de provoquer un ou plusieurs handovers par la "simple" rotation de l'antenne directive. En effet, lorsque la différence de niveau entre les stations est du même ordre de grandeur que le gain de l'antenne, la rotation ne permet pas d'atténuer suffisamment le niveau de signal de la cellule courante par rapport aux cellules voisines. Pour pallier cet inconvénient, l'idée consiste maintenant à insérer un atténuateur entre l'antenne directive et le mobile de façon à réduire artificiellement le gain de l'antenne, sans toutefois modifier fondamentalement la forme de son diagramme de rayonnement.

3.2.3 Résultats obtenus avec l'antenne Yagi-Uda associée à un atténuateur variable

Dans cette configuration un atténuateur variable est inséré entre l'antenne directive Yagi-Uda et le mobile de tests.

Pour trois nouvelles positions du mobile (D, E et F) en milieu urbain et suburbain de l'agglomération lilloise, les tableaux 5 à 7 présentent les résultats de localisation obtenus à partir des cercles centrés sur au moins trois stations de base distinctes schématisés sur les figures 2.8 à 2.10.

Le tableau 4 résume les résultats obtenus au point D et la disposition relative des BTS courantes est présentée figure 2.8.

Point D urbain				
Identifiant de la cellule		TA attendu	TA reçu	Erreur GSM/IGN
Canteleu	a	5,36	5	abc 150 m
Lille 2	b	3,67	4	
Lille 3	b'	3,67	3	
Ronchin	c	6,67	6	ab'c 500 m

Tableau 4 : Résultat au Point D en milieu urbain

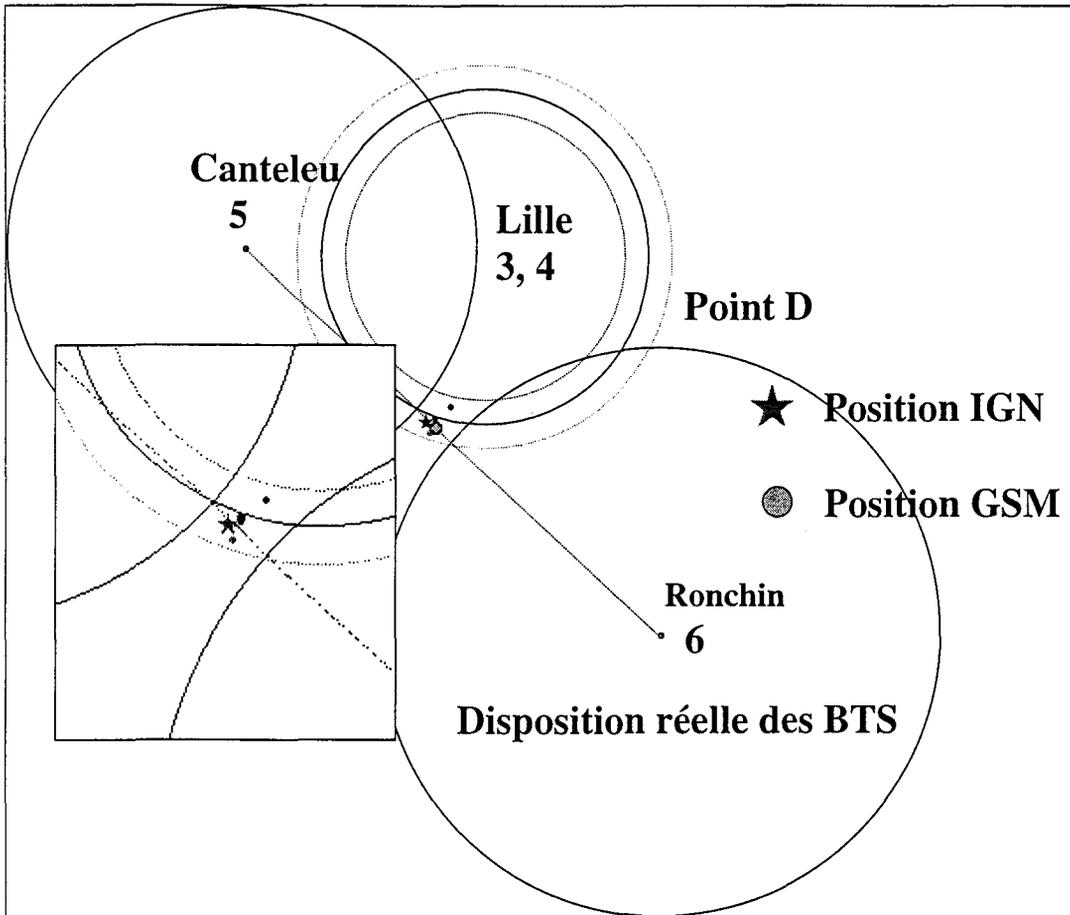


Figure 2.8-a: Détermination de la position du mobile au Point D par GSM.

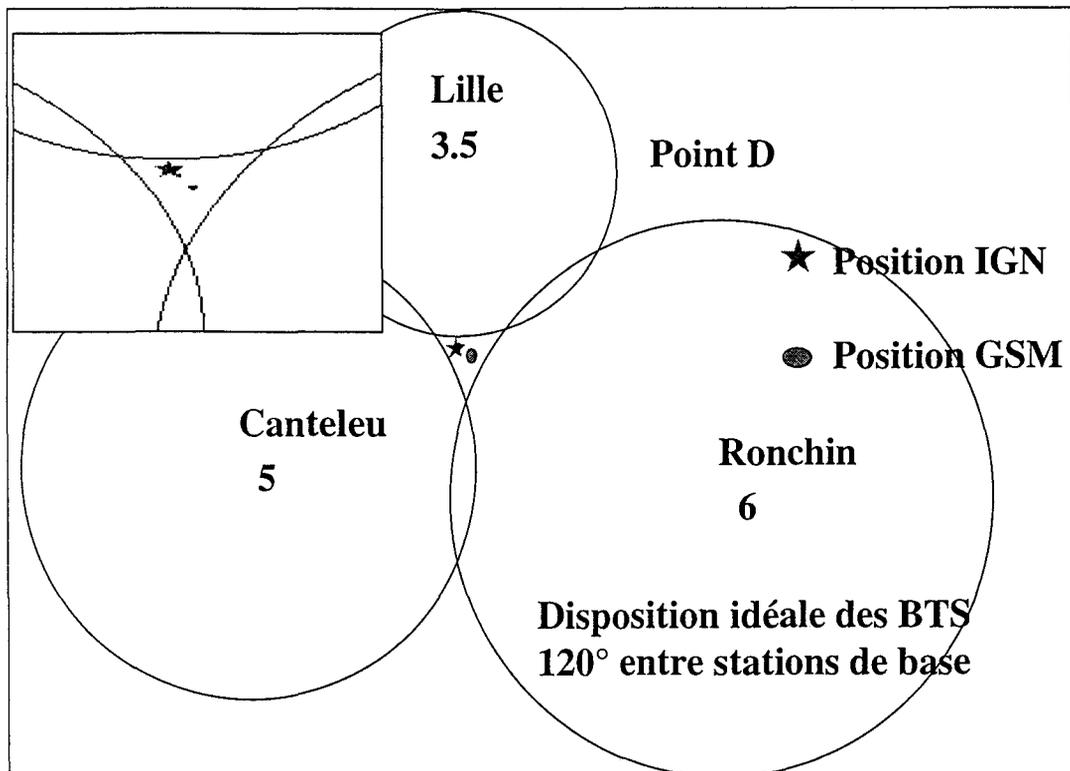


Figure 2.8-b: Détermination de la position du mobile au Point D par GSM.

Le point D est situé en milieu urbain. Les erreurs de mesures de distances entre le mobile et les stations de base Canteleu, Ronchin et Lille sont respectivement de 200 et 370 mètres et de 180 et 370 mètres selon que l'on considère 4 ou 3 comme valeur de TA pour la localisation. L'erreur entre la position GSM et la position IGN est de 150 mètres dans le cas favorable (cas abc, TA de 4 sur la station Lille), et de 500 mètres dans le cas défavorable (cas ab'c, TA de 3 sur la station de base Lille). Dans cette configuration de mesure, si on utilise la valeur moyenne des TA sur la station de base Lille, on améliore la précision de la mesure de distance (90 mètres au lieu de 180 ou 370 m), mais la précision de la localisation devient égale à 200 mètres, ce qui est supérieur aux 150 m obtenus dans le cas favorable précédent. Si les stations de base étaient disposées régulièrement comme sur la figure 2.8, la précision de la localisation GSM serait de 300 mètres par rapport à la position IGN.

Ce cas de figure montre qu'en considérant la valeur moyenne des TA obtenue pour une même BTS, la précision de la mesure de la distance entre le mobile et la BTS n'évolue pas nécessairement dans le même sens que la précision de la localisation. Ici encore, on observe que c'est la disposition relative des stations de base par rapport au mobile qui influence la précision du résultat final.

En effet, dans le cas de figure considéré, les cercles centrés sur les BTS Ronchin et Canteleu étant disjoints, les points d'intersection de ces cercles avec le cercle centré sur la BTS se trouve plus proche du point D, dans le cas où l'on considère la valeur de TA égale à 4 pour la BTS Lille et s'éloigne du point D, lorsque l'on prend la valeur moyenne des TA obtenus comme indiqué figure 2.8. Cet exemple montre que, lorsque la mesure donne plusieurs valeurs possibles du TA sur une seule BTS, la précision de la localisation peut être dégradée, si l'on considère simplement la moyenne des valeurs de TA.

Dans le tableau 5, nous présentons le résultat d'essais au Point E en milieu suburbain.

Point E urbain				
Identifiant de la cellule		TA attendu	TA reçu	Erreur GSM/IGN
Lille	a	3,82	4	ab'c 75 m
Ronchin 1	b	5,1	4	
Ronchin 2	b'	5,1	5	abc 500 m
Faches 1	c	2,9	3	ab'c' 350 m
Faches 2	c'	2,9	2	

Tableau 5 : Résultat au Point E en milieu urbain

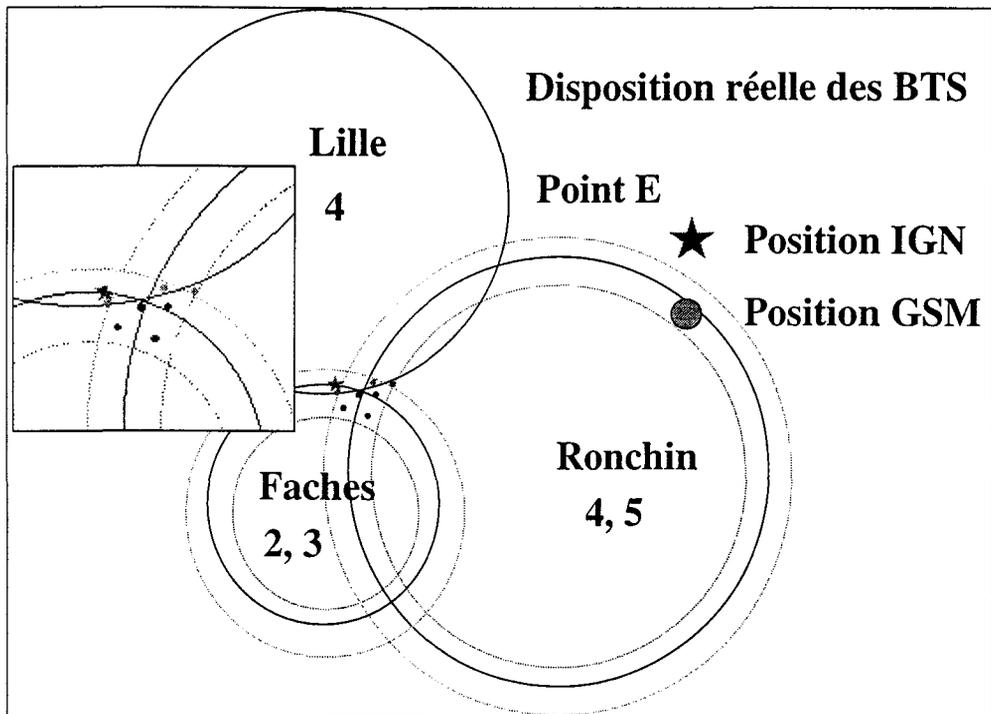


Figure 2.9-a: Détermination de la position du mobile au Point E par GSM.

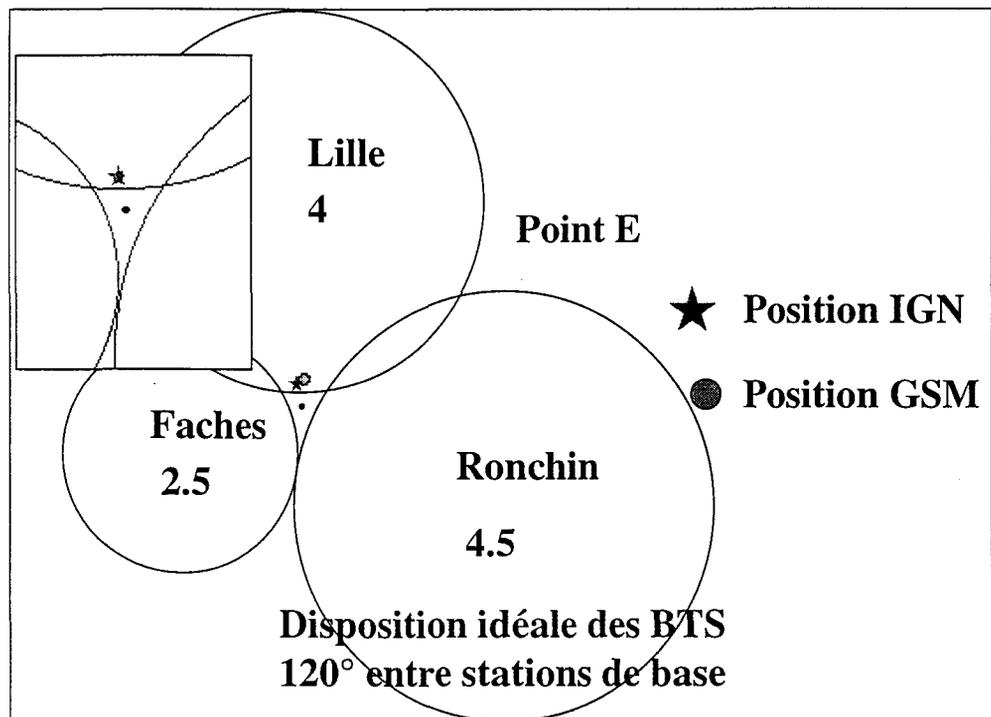


Figure 2.9-b: Détermination de la position du mobile au Point E par GSM.

Le point E est situé à Lille-sud en zone urbaine. Cinq valeurs de TA ont pu être reçues des stations de base Lille, Ronchin et Faches. Deux valeurs de TA ayant été reçues sur chacune des BTS Ronchin et Faches.

Les erreurs de mesures sur les distances entre le mobile et les stations de base Lille, Ronchin et Faches sont respectivement de 100 mètres, 605 m (cas b du tableau 5), 55 m (cas b' et c du tableau 5) et 495 m (cas c' du tableau 5). On constate que l'erreur intrinsèque sur la valeur de TA, garantie par le constructeur, est parfois plus grande que l'unité soit supérieure à 550 mètres. Ceci engendre des erreurs de localisation élevées (350 m entre la position IGN et la position GSM dans le cas **ab'c'** du tableau 5). Ces erreurs peuvent même être du même ordre de grandeur que l'erreur intrinsèque (500 m entre la position IGN et GSM dans le cas **abc** du tableau 5). Les stations de bases étant relativement bien disposées autour du mobile et les erreurs sur la mesure de distance entre le mobile et les BTS étant inférieure à 100 m (cas ab'c du tableau 5), l'écart de localisation entre la position GSM et la position IGN est ici de 75 mètres.

Dans ce cas de figure aussi, les précisions ne peuvent pas être améliorées en considérant la valeur moyenne des TA. Comme illustré sur la figure 2.9, la position GSM obtenue avec la valeur moyenne des TA s'éloigne de la position IGN même pour une disposition dite "idéale" des BTS autour du mobile.

Dans le tableau 6, nous présentons le résultat obtenu au Point F en milieu suburbain et sur la figure 2.10, nous présentons la disposition relative des BTS courantes.

Point F				
Suburbain				
Identifiant de la cellule		TA attendu	TA reçu	Erreur GSM/IGN
Wasequehal	a	4,8	6	acd 275 m ade/cde 350 m ace 562 m bde 800 m bef 700 m def 400 m
Roncq	b	12,2	14	
ST-André	c	6,31	6	
Canteleu	d	13,54	13	
Pérenchies	e	14,67	14	
Quesnoy	f	10,67	10	

Tableau 6 : Résultat au Point F en zone rurale.

Six valeurs de TA ont été obtenues sur les stations Wasquehal, Roncq, St-André, Canteleu, Pérenchies et Quesnoy, ce qui permet d'obtenir plusieurs positions possibles du mobile.

Les écarts entre les positions GSM possibles et la position IGN varient entre 275 et 800 mètres. L'erreur sur la précision de la localisation obtenue par GSM montre une fois de plus le rôle de la précision de la mesure de la distance (précision du paramètre TA). En effet, les écarts de TA observés sur les BTS Wasquehal et Roncq par rapport à la valeur attendue dépassent 550 mètres et expliquent en majeure partie l'augmentation de l'erreur de localisation. Les erreurs sur les mesures de distance sur les stations de base Wasquehal, Roncq, St-André, Canteleu, Pérenchies et Quesnoy sont respectivement de 660, 990, 170, 297, 368 et 368 mètres.

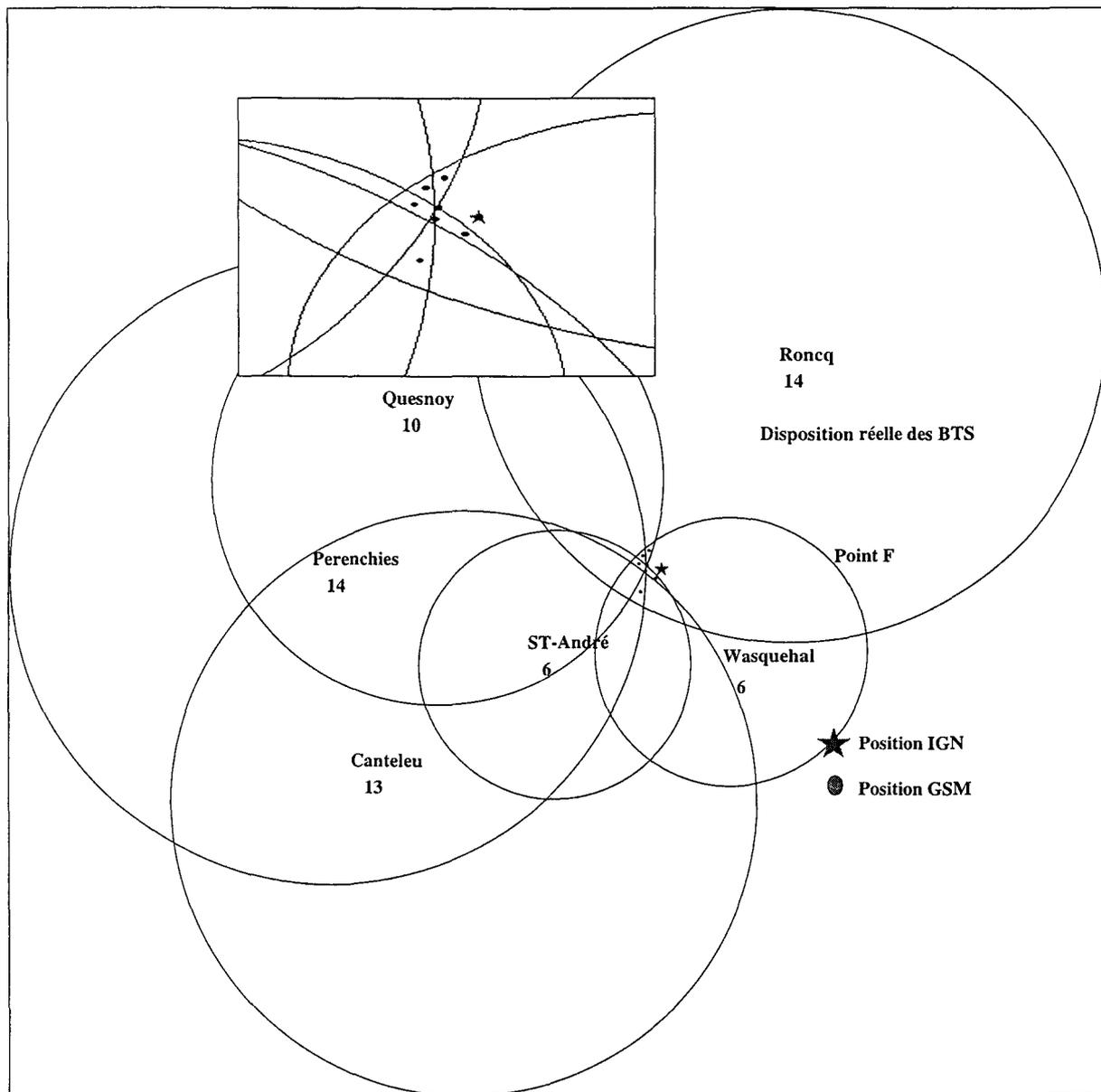


Figure 2.10 : Détermination de la position du mobile au Point F par GSM.

Le dispositif associant la rotation d'une antenne « Yagi-Uda » couplée à un atténuateur variable a permis d'augmenter la disponibilité du système de localisation en milieux suburbain et urbain. Dans la plupart des cas, on parvient à forcer au moins trois handovers, cependant il n'est pas possible de s'affranchir d'éventuelles coupures de communication dues à une valeur importante de l'atténuation. Remarquons que le dispositif simple mis en œuvre permet de provoquer indifféremment des handovers intra-BTS ou inter-BTS, or seuls les derniers permettent d'aboutir à l'obtention de nouvelles valeurs de TA. Dans le but d'augmenter le nombre de TA différents, nous avons donc associé le procédé visant à dégrader la qualité du signal (RxQual) et celui visant à modifier le niveau du signal (RxLev).

3.3 Association des deux solutions techniques développées

Dans cette partie, trois exemples de résultats significatifs de localisation sont donnés dans les tableaux 7 à 9 pour les points d'expérimentation nommés G, H et I.

Point G Suburbain		
Identifiant de la cellule	TA reçu	Erreur GSM/IGN
Wattrelos	5	125 m
Tourcoing	4	
Roncq	9	

Tableau 7 : Résultats des essais au Point G en milieu suburbain.

Point H Suburbain		
Identifiant de la cellule	TA reçu	Erreur GSM/IGN
Roubaix	3	473 m
Wasquehal	5	
Hem	9	

Tableau 8 : Résultats des essais au Point H en milieu suburbain.

Point I Suburbain		
Identifiant de la cellule	TA reçu	Erreur GSM/IGN
Hellemmes	3	250 m
Ascq	3	
Canteleu	7	

Tableau 9 : Résultats des essais au Point I en milieu suburbain.

Le point G se trouve sur un pont enjambant une autoroute en zone bien dégagée. Dans ce cas de figure, un grand nombre de handovers a pu être provoqué, cependant nous avons rencontré ici le problème de la mise à jour des bases de données des BTS fournies par

l'opérateur. En effet, le plan de fréquences de l'opérateur n'étant pas totalement figé en particulier en milieu urbain, il advient qu'il change occasionnellement son plan de fréquences pour des raisons qui lui sont propres. Les raisons sont souvent liées à l'augmentation du trafic et des interférences. Au cours des essais présentés, les bases de données construites pour la reconnaissance des BTS à partir des messages du BCCH, se sont avérées partiellement erronées. Alors que plus de 6 handovers ont été provoqués dans cette configuration, seules trois valeurs de TA ont permis de déterminer la position du mobile par GSM avec une précision de 126 mètres. Cet exemple laisse pressentir une des difficultés pour la mise en œuvre pratique d'un tel système qui nécessitera la mise à jour régulière des bases de données permettant l'identification des BTS. Ceci n'est pas un problème majeur si la localisation est fournie par l'opérateur car il connaît son réseau et donc, met à jour ses données de manière régulière et de façon immédiate.

Le point H est situé sur le parking d'une grande surface, en zone suburbaine. En considérant les trois valeurs de TA du tableau 8 et le barycentre des points d'intersection des cercles correspondants, on obtient une différence de 473 mètres avec la position estimée sur la carte IGN.

Le point I est aussi en zone suburbaine. En considérant les trois valeurs de TA du tableau et le barycentre des points d'intersection des cercles correspondants, la différence avec la position estimée sur la carte IGN est de 250 mètres.

L'association des deux procédés augmente légèrement la disponibilité du système en autorisant plus de handovers, cependant, les résultats sont similaires à ceux obtenus en utilisant l'antenne « Yagi-Uda » seule. En effet, que l'on se trouve en zone dégagée ou en zone urbaine dense, certaines mesures ne sont pas concluantes pour les raisons suivantes :

- on ne parvient pas toujours à provoquer un nombre suffisant de changements de stations de base,
- un manque de rafraîchissement des coordonnées géographiques des stations de base est à l'origine de problèmes d'identification des stations de base et donc, la localisation ne peut pas avoir lieu,
- une coupure de la communication intervient souvent au cours de l'expérimentation à cause des perturbations apportées (atténuation forte, dispositif de brouillage),
- les erreurs observées sur certaines valeurs de TA sont supérieures à l'erreur intrinsèque du système (550 m) et engendrent donc des erreurs importantes de localisation.

3.3.1 Synthèse des résultats et problèmes rencontrés

Les expérimentations qui viennent d'être présentées ont été réalisées dans le but d'évaluer deux solutions techniques simples mises en œuvre pour provoquer des handovers inter-BTS à partir du mobile. Les solutions envisagées permettent au mobile de modifier intentionnellement deux des paramètres influençant les critères de déclenchement des handovers : le RxLev et le RxQual. Ces essais ont montré la faisabilité de la localisation dans le cas réel et ont mis en évidence, les difficultés qu'il convient de résoudre pour le développement d'une telle solution. La synthèse des résultats obtenus sur une cinquantaine de cas expérimentaux, en zone rurale ou urbaine dense est donnée ci-après :

- la précision varie de 125 à 500 mètres,
- la disponibilité de localisation est voisine de 80%,

- les coupures de communication surviennent dans 10% des cas,
- dans 10% des cas le système développé ne parvient pas à effectuer de Handover.

L'association de l'antenne directive Yagi-Uda et de la source de perturbation (cf. figure 2.3) a permis d'effectuer la localisation du mobile dans 80% des cas. Dans 65% des cas, des changements inter-BTS (entre stations de base) ont été obtenus. Dans 15% des cas d'expérimentation, des Handovers intra-BTS (entre cellules d'une même station de base) ont été obtenus.

La source de perturbation fonctionne « manuellement » c'est à dire qu'on ne peut perturber qu'une fréquence à la fois, ce qui ne peut provoquer que des handovers entre les deux meilleures stations de base écoutées par le mobile empêchant la localisation du mobile.

Les procédés mis en œuvre engendrent indifféremment des « handovers » inter-BTS et des « handovers » intra-BTS, les derniers ne permettant pas d'obtenir de nouvelles valeurs du TA. En effet, d'après [3] ETSI [05.08] et [08.08], lorsque le RxLev de la cellule courante reste relativement élevé par rapport aux cellules voisines et que la qualité de communication sur le canal de trafic est mauvaise (RxQual supérieur à 3), le réseau déclenchera si cela est possible un « handover » inter-cellule. De plus, des coupures de communication surviennent du fait de l'atténuation trop forte des signaux ou d'une perturbation trop forte engendrée par le dispositif de dégradation du RxQual.

Ces expérimentations ont permis d'identifier les paramètres critiques influençant la précision de la localisation des mobiles, à savoir :

- la précision de la mesure des distances entre la station de base et le mobile, qui influence le tracé des cercles nécessaires à la localisation,
- la disposition des stations de base, servant à la localisation, autour du point de mesures.

La précision de la mesure des distances entre le mobile et la station de base dépend essentiellement, des valeurs de TA obtenues sur les BTS reçues et de la distance réelle existant entre le mobile et la BTS. Dans le cas où, au cours des essais, plusieurs valeurs de TA sont reçues sur la même BTS, il en découle plusieurs positions possibles pour le mobile. Nous avons vu que le fait de prendre comme valeur de TA résultante la valeur moyenne arithmétique des valeurs de TA obtenues ne va pas nécessairement dans le sens d'une amélioration de la précision. Il convient de trouver une méthode d'extraction des valeurs de TA plus adaptée pour la localisation.

La disposition relative des stations de base du réseau GSM autour du mobile est une donnée fixe qui dépend de l'opérateur et qui est liée à la couverture radioélectrique d'une zone géographique. Un choix entre plusieurs BTS ne peut intervenir qu'à partir du moment où, plus de trois BTS ont été utilisées par le réseau au cours de la communication et ceci dépend en partie du nombre de stations de base reçues par le mobile et de l'efficacité du dispositif développé pour forcer les handovers. Dans ces conditions, il convient d'améliorer l'efficacité du dispositif mis en œuvre, non seulement par la mise en place d'une source agile en fréquences qui permettrait de perturber simultanément plusieurs canaux radiofréquences et cela en fonction des fréquences écoutées par le mobile, mais encore, de développer un procédé permettant de mesurer la direction des BTS par rapport à une direction donnée afin de « choisir » pour la localisation des BTS réparties de manière équitable autour du mobile.

Avant de présenter les résultats relatifs au développement d'une source agile en fréquences, nous avons d'abord exploré de nouvelles pistes qui pourraient améliorer le calcul de la distance entre l'émetteur GSM et le récepteur mobile.

3.4 Quelques pistes pour l'amélioration du calcul de la distance Mobile-Station de base

Dans cette partie, nous illustrons comment nous pourrions affiner la mesure de la distance entre la station de base du réseau et le mobile en utilisant d'autres informations de signalisation qui transitent à travers le réseau GSM.

3.4.1 Utilisation du niveau de puissance émis par la BTS et du niveau de puissance reçu par le mobile

Avec le développement des radiocommunications mobiles, des modèles de propagation du champ électrique se sont développés. Ces modèles permettent d'exprimer de façon plus ou moins complexe la puissance reçue par le mobile sur un canal radiofréquence donné, en fonction de la puissance émise par la station de base et de la distance d les séparant. Trois grandes familles de modèles existent : les modèles empiriques, les modèles semi-empiriques et les modèles déterministes.

Les modèles empiriques donnent la variation du champ reçu en un point, en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, et d'un certain nombre d'atténuations subies par le signal. Les équations sont déterminées par d'autres formules empiriques. Parmi ces modèles, on peut citer le modèle d'Okumara-Hata.

Pour les modèles semi-empiriques, les atténuations spécifiques à des phénomènes physiques sont calculées à partir de considérations géométriques ou statistiques sur l'environnement de propagation. Ces atténuations s'ajoutent à une formule empirique de l'atténuation en espace libre en fonction de la distance émetteur-récepteur. Ces modèles nécessitent une base de données représentant l'environnement de propagation du mobile. Parmi ces modèles, on trouve le modèle COST 231 Walfish-Ikegami.

Les modèles déterministes sont des modèles qui font appel à la notion de rayons et qui utilisent la Théorie Géométrique de la Diffraction. On modélise le champ reçu comme la somme du rayon direct et d'un certain nombre de rayons réfléchis et diffractés. Ces modèles nécessitent en général une connaissance fine de l'environnement du mobile et en particulier des coefficients de réflexions et de diffractions. Ces modèles engendrent des temps de calculs importants.

En espace libre, lorsque le dispositif de réception est en visibilité directe de l'émetteur, la puissance reçue est donnée en première approximation par la relation suivante :

$$P_r = P_e * G_1 * G_2 * \left(\frac{\lambda}{4 * \pi * d} \right)^2 \quad (2.10)$$

où

- **Pr** et **Pe** désignent respectivement la puissance reçue par le mobile et celle émise par la station de base,

- **G1** et **G2** représentent les gains des antennes d'émission et de réception,
- λ est la longueur d'onde de la fréquence de communication
- d est la distance séparant le mobile de la station de base.

Dans le modèle d'OKUMURA-HATA le champ électrique reçu à la distance d s'exprime de la façon suivante [48] :

$$E_m = P + E_r - A_n - A_z - A_h - A_p - A_a \quad (2.11)$$

où **P** est la puissance apparente rayonnée par l'émetteur en dBkW

E_r est le champ reçu par une antenne mobile située à 1,5 m au-dessus du sol et s'exprime en dB μ V/m de la façon suivante :

$$E_r = 69,85 - 6,16.\log f + 13,82.\log H - (44,9 - 6,55.\log H). \log d \quad (2.12)$$

où f , H , et d désignent respectivement la fréquence, la hauteur de l'antenne d'émission et la distance entre l'émetteur et le récepteur,

et A_n , A_z , A_h , A_p et A_a représentent respectivement l'atténuation due aux obstacles (collines...), l'atténuation due aux obstacles proches (différente en zone suburbaine, rurale peu dégagée ou rurale dégagée), la correction à apporter si la hauteur de l'antenne du mobile est différente de 1,5 mètres, l'atténuation due à la pente et des atténuations supplémentaires dues par exemple à un trajet maritime, une réception en zone boisée, etc...

Connaissant la puissance émise par la station de base (valeur présente dans les informations du canal de diffusion BCCH) et la puissance reçue par le mobile (RxLev) sur un canal radiofréquence donné, l'idée développée dans ce paragraphe consiste à extraire des formulations empiriques d'un modèle de propagation du champ électrique, la valeur de la distance d entre le mobile et l'émetteur afin de pouvoir affiner la valeur du paramètre TA qui traduit également cette distance en termes de temps de propagation. Ainsi la précision de la mesure de la distance mobile-BTS serait améliorée, de même que la précision de la localisation finale.

Nous avons choisi de nous limiter au modèle le plus simple, à savoir la formulation selon le modèle d'Okumara-Hata. Toutefois, cette étape nécessite d'ajouter aux bases de données relatives au réseau GSM, les bases de données relatives aux diverses atténuations A_i de l'équation (2.11) et cela en fonction du type d'environnement du mobile. En outre la résolution de l'équation permettant d'extraire la valeur d n'est pas immédiate. En conséquence, bien que cette méthode semble présenter un intérêt, nous ne l'avons pas exploitée en raison des difficultés liées à sa mise en œuvre.

3.4.2 Exploitation du temps de propagation point à point dans le réseau GSM

L'objectif visé ici est de procéder à une mesure indépendante du temps de propagation des signaux émis entre la station de base et le mobile grâce à un message spécifique envoyé à la station courante depuis le mobile, afin de disposer d'une nouvelle valeur de TA. Ceci permettrait de choisir la valeur du TA à utiliser, lorsque plusieurs valeurs sont obtenues sur une même BTS.

Le temps de propagation d'un caractère d'un bout à l'autre du réseau GSM est un paramètre désigné par le vocable « temps de transmission point à point » ou encore selon le standard ETSI: End-to-end transmission time. Cette grandeur est définie dans la normalisation GSM et des valeurs de référence sont indiquées en fonction des services. Le temps de transmission point à point est une caractéristique du type de matériel (BTS et BSC) et peut donc varier en fonction du constructeur. Les valeurs de référence indiquées dans la norme GSM sont généralement les valeurs que cherchent à atteindre les constructeurs mais on peut assister à des dépassements de l'ordre de 10% environ.

A titre indicatif, nous donnons dans le tableau 10 quelques unes des valeurs de référence GSM en fonction du type de service pour un trajet incluant le sens montant et descendant sans « sortir » du réseau. Les valeurs de référence dans un seul sens (lien montant ou lien descendant) correspondent à la moitié des valeurs précédentes.

Valeur de Référence GSM Transmission de Mobile à Mobile	
Service voix	180 ms
Transmission de données transparente - ISDN 9600 bps	422,6 ms
Transmission de données transparente - ISDN 2400 bps	317,6 ms

Tableau 10 : Valeurs de référence GSM pour le temps de transmission point à point

On peut facilement vérifier l'ordre de grandeur de ces valeurs sur le réseau GSM considéré, en utilisant deux mobiles dont l'un est configuré en mode « écho » et un oscilloscope numérique.

L'ordre de grandeur des temps de transmission point à point est de quelques centaines de millisecondes, il ne sera donc pas possible de déceler des variations de quelques centaines de nanosecondes correspondant à des déplacements du mobile de quelques centaines de mètres. Cette voie ne peut donc pas être exploitée pour la validation des valeurs de TA obtenues sur le réseau.

3.5 Développement d'une source agile en fréquence

Une des solutions proposée pour améliorer l'efficacité du dispositif mis en œuvre pour provoquer les « handovers » consiste à développer une source agile en fréquences qui permettrait de perturber de façon dynamique et simultanée, plusieurs canaux radiofréquences en fonction des fréquences écoutées par le mobile.

Afin de développer une source agile en fréquence qui peut être pilotée de façon externe en fonction des canaux radiofréquences que le mobile écoute et sur lesquels il transmet, il convient au préalable de bien comprendre le fonctionnement séquentiel du synthétiseur du mobile de tests, et de suivre les évolutions de la tension de commande du VCO (Voltage Control Oscillator) du mobile de tests pour établir la relation qui existe entre ces tensions et la fréquence du canal de trafic dédié à la communication à un instant donné, ainsi que celles des

canaux de diffusion des stations de base voisines. Les résultats préliminaires obtenus ainsi que les procédés électroniques développés sont présentés en annexe I.

3.6 La source agile en fréquence commandée par les messages de signalisation du mobile de tests

La vocation de la source agile en fréquences est d'être insérée dans le dispositif de localisation des mobiles par radiotéléphonie cellulaire GSM. Dans le concept de fonctionnement, cette source agile en fréquence a les mêmes caractéristiques que celle décrite précédemment, mais les oscillateurs utilisés pour la génération des signaux perturbateurs sont pilotés par voie logicielle de façon extérieure, en analysant les informations présentes sur différents canaux de signalisations. Elle permet de commander simultanément le brouillage d'au moins trois fréquences différentes et d'ajuster les niveaux de puissance de sortie en fonction des RxLev reçus des canaux à perturber.

La source est donc composée d'oscillateurs verrouillés en phase (PLL) sur la fréquence désirée. Le dispositif est couplé à une antenne omnidirectionnelle ou à une antenne de grand gain de type Yagi-Uda mise en rotation pour favoriser ou non l'écoute de la station courante et des stations voisines.

Au travers d'une liaison parallèle de type I2C, on commande un relais ou commutateur connecté à un circulateur qui permet d'atténuer de 20 dB le niveau de signal émis TxPower vers la station de base. Un schéma synoptique du dispositif complet est présenté sur la figure 2.11. Le schéma général du circuit de la source agile est donné en annexe II. La photo 1 présente le dispositif.

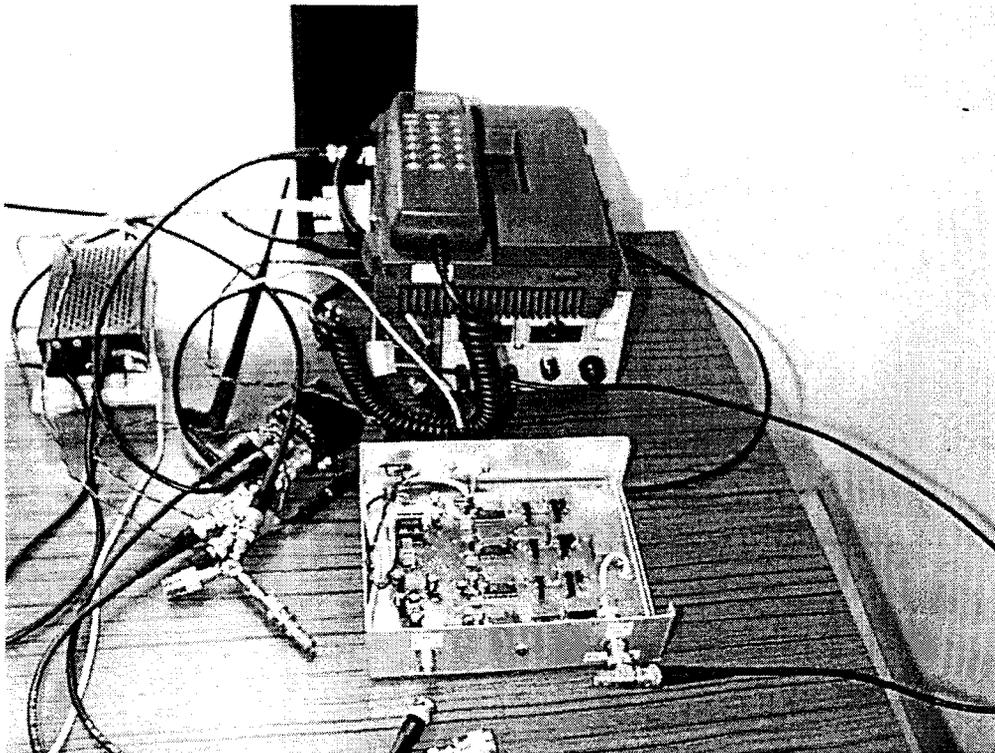


Photo 1 : Source agile en fréquence développée pour la localisation par GSM

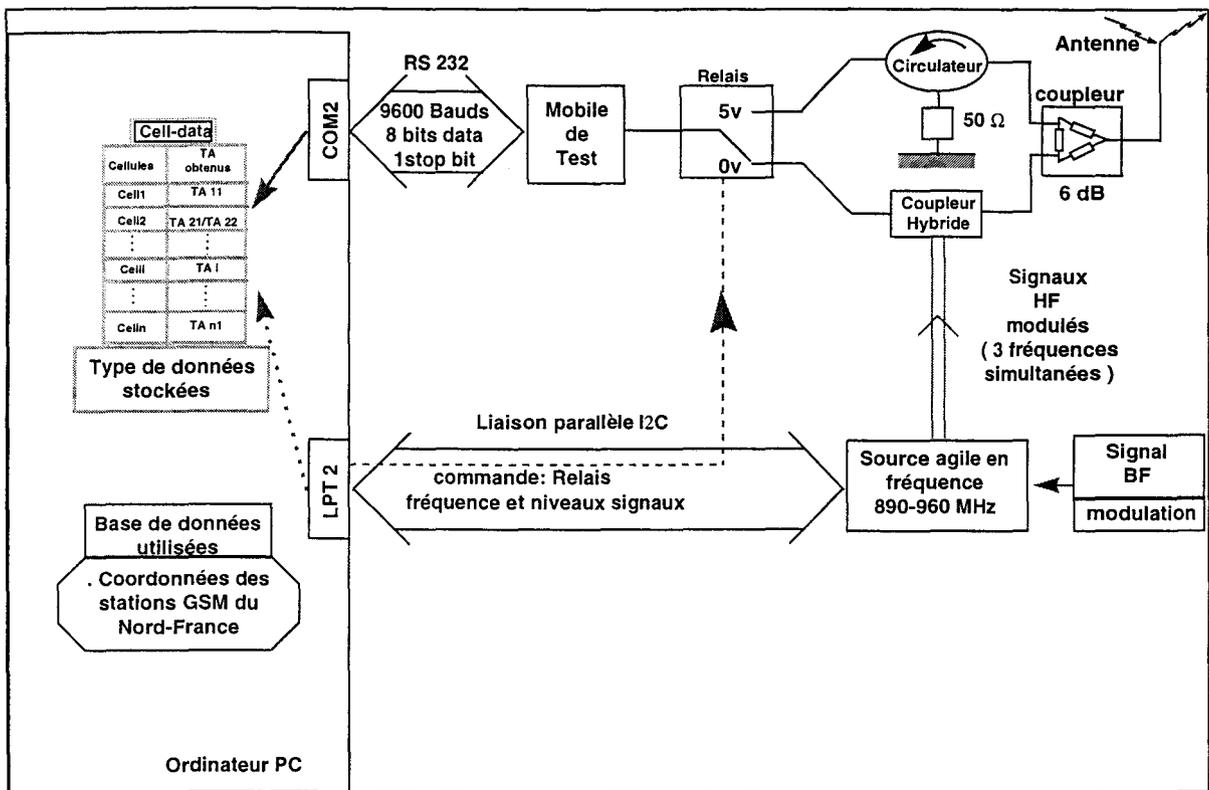


Figure 2.11 : Banc complet de la localisation des mobiles par GSM

L'automatisation du processus de mesures avec la source agile en fréquences est réalisée par un logiciel d'acquisition et de traitement développé en C sous l'environnement Windows NT.

A l'aide de la base de données des coordonnées géographiques des stations de base du réseau de radiotéléphonie GSM de l'agglomération Lilloise, nous effectuons une acquisition en temps réel des messages de signalisation lorsqu'une communication est établie au travers de la liaison série COM2 de l'ordinateur. A partir des différents messages recueillis, nous pilotons via la liaison parallèle de type I2C, la source agile en fréquences qui permet de perturber de manière successive, la qualité de la communication des trois premières stations courantes obtenues sur le lien montant (890-915 MHz) ou sur le lien descendant (935-960 MHz) tout en maintenant chaque perturbation ayant provoqué un « handover ».

De cette façon, on réussit à leurrer le réseau qui va commander les changements de stations de base désirées. On obtient alors un tableau de données semblable à celui présenté sur le schéma de la figure 2.11 où les Cell_i représentent les différentes cellules avec lesquelles le mobile a communiqué, et les TA_{ij} sont les différentes valeurs de Timing Advance obtenues sur la cellule identifiée Cell_i.

Le système a été testé dans un premier temps en position fixe en laboratoire où on constate un taux de succès élevé pour le déclenchement des handovers. Les tableaux 11, 12 et 13 illustrent trois exemples de résultats obtenus pour la même position du mobile.

Contrairement aux étapes précédentes, où nous avons évalué les erreurs de positionnement par GSM pour chaque cas lorsque des valeurs différentes de TA sont obtenues sur les cellules appartenant à la même station de base, nous calculons ici une moyenne géométrique de toutes les valeurs de TA reçues sur toutes les cellules appartenant à la même station de base. Cette méthode de filtrage très simple devrait permettre de s'affranchir des valeurs de TA qui s'écartent trop de la valeur réelle, et permet d'améliorer la précision de la mesure de la distance entre la BTS et le mobile.

Point J			
Identifiant de la cellule	TA attendu	moyenne des TA reçus	Erreur GSM/IGN
Forum	9,39	9,29	461 m
FoireCommerciale	7,677	6,33	
Faches	9,7	10	

Tableau 11 : Essai 1 - résultat au Point J en milieu suburbain.

Point J			
Identifiant de la cellule	TA attendu	moyenne des TA reçus	Erreur GSM/IGN
Forum	9,39	9,43	213 m
Faches	9,7	9,67	
Villeneuve d'Ascq	2,5	2,6	

Tableau 12 : Essai 2 - résultat au Point J en milieu suburbain.

Point J			
Identifiant de la cellule	TA attendu	moyenne des TA reçus	Erreur GSM/IGN
Forum	9,39	9,43	3 m
Ronchin	4,5	4,6	
Ascq	3,72	3,67	

Tableau 13 : Essai 3 - résultat au Point J en milieu suburbain.

Pour trois expérimentations effectuées à une même position du mobile à des périodes différentes, trois positions voisines sont obtenues. L'erreur de positionnement varie de 3 à 461 mètres suivant la précision de la mesure du TA obtenue et la disposition relative des stations de base courantes autour du point de mesures.

Concernant le premier essai ou tableau 11, l'écart de plus d'une unité de TA sur la station de base Foire-Commerciale est à l'origine de la faible précision des mesures au Point J. En effet, bien que l'écart de positionnement du mobile par rapport aux stations de base Forum et Faches soit raisonnable pour la localisation (respectivement 55 m et 165 m), l'écart obtenu sur la station Foire-Commerciale est grand (740 mètres près : erreur supérieure à l'erreur intrinsèque du TA qui est de 550 m environ) et de ce fait l'erreur de positionnement est de l'ordre de 461 mètres.

En ce qui concerne le deuxième essai ou tableau 12, l'erreur de positionnement est relativement élevée (213 mètres) du fait de la disposition des stations de base autour du Point J. Bien que les écarts entre les valeurs de TA sur lesdites BTS soient faibles (respectivement 22 m sur Forum, 16,5 m sur Faches et 55 m sur Villeneuve d'Ascq).

Pour ce qui concerne l'essai 3 ou tableau 13, la grande précision du positionnement obtenue au Point J (3 m) résulte de la grande précision des mesures des TA moyens sur les stations (les écarts avec le valeur vraie étant respectivement de 22 m sur Forum, 55 m sur Ronchin et 27,5 m sur Ascq) et de la relative bonne disposition des stations de base autour du point de mesures.

Ces trois essais montrent encore le rôle fondamental pour la localisation du mobile des deux paramètres que sont la précision des mesures de la distance BTS - mobile et la nécessité que les stations de bases soient équiréparties autour du point de mesure.

4. Conclusion

Le principe de la localisation par le réseau de radiotéléphonie cellulaire GSM repose sur la mesure du temps de propagation des signaux qui transitent entre le mobile qui cherche à se localiser et au moins trois stations d'émissions fixes distinctes du réseau GSM. Lors d'une communication, la mesure du temps de propagation est réalisée normalement par le réseau et codée sous le paramètre Timing Advance ou TA qui est à la base du principe de l'alignement adaptatif des trames dans le temps. Pour localiser le mobile, il faut obtenir des valeurs de TA en provenance d'au moins trois stations de base distinctes, et ceci n'est possible que si l'on parvient à provoquer un changement de station de base ou handover inter-BTS. La faisabilité de la localisation par un réseau cellulaire de type GSM dépend donc de la capacité du mobile à forcer le réseau à effectuer des handovers inter-BTS.

Ce chapitre a été consacré à l'évaluation des différentes solutions techniques que nous avons mises en œuvre pour provoquer des handovers inter-BTS à partir du mobile. Les solutions envisagées permettent au mobile de modifier intentionnellement les critères de déclenchement des handovers. Après avoir exploité des solutions simples fondées sur la modification locale du niveau et de la qualité du signal mesurés par le mobile, nous avons présenté un système de source de brouillage agile en fréquence développé, en vue d'automatiser le processus de déclenchement des handovers et d'améliorer ainsi la disponibilité du système de localisation.

Des expérimentations ont été effectuées en milieu urbain et suburbain. Quelques problèmes ont été rencontrés parmi lesquels on peut citer : les coupures de communication intervenues au cours de l'expérimentation du fait d'un niveau trop élevé des perturbations apportées, insuffisance du nombre de BTS pour localiser le mobile. Ces problèmes n'ont été rencontrés que dans 20% des cas des expérimentations effectuées. Dans 80% des cas, des précisions de localisation allant de 125 à 500 mètres ont été obtenues. Ces précisions dépendent essentiellement de la précision de la mesure des distances entre la station de base et le mobile (TA obtenu), et de la disposition relative des stations de base servant à la localisation autour du point de mesures (notion de GDOP ou dilution de précision d'origine géométrique développée au chapitre I).

Chapitre III :

Utilisation des signaux des émetteurs de radiodiffusion pour la localisation des mobiles par radiogoniomètre

Chapitre III : Utilisation des signaux des émetteurs de radiodiffusion pour la localisation des mobiles par radiogoniométrie

Introduction

Il existe de nombreux émetteurs de radiodiffusion susceptibles d'être reçus en milieu urbain dans les bandes des fréquences allant de 100 MHz à 1000 MHz et il nous a semblé intéressant d'exploiter cette ressource pour localiser les mobiles dans les zones où les systèmes par satellites ne sont pas (ou peu) disponibles.

Ce chapitre donc est consacré à la mise en œuvre d'un système de localisation du mobile par radiogoniométrie. Le principe de la localisation a été exposé dans le premier chapitre. Il repose sur la mesure des angles de gisement d'au moins trois émetteurs de radiodiffusion par rapport à une direction donnée, par exemple le Nord Géographique.

Dans la première partie de ce chapitre, nous étudions les méthodes de mesure d'angles de gisement des émetteurs en utilisant des radiogoniomètres dont le fonctionnement repose sur la forme particulière du diagramme de rayonnement des antennes de réception. Deux types d'antennes sont pris en compte : les antennes à grand gain de type "Yagi-Uda" et les antennes dites "Cardioïde". Nous analyserons de façon expérimentale, successivement dans trois bandes de fréquences centrées sur 100 MHz, 475 MHz et 900 MHz, l'influence des phénomènes de propagation par trajets multiples sur la précision des mesures des angles de gisement. Nous conclurons sur la nécessité ou non d'exploiter la totalité de la bande de fréquences allant de 100 MHz à 1000 MHz.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous envisagerons la mise en œuvre du procédé de localisation des mobiles terrestres par radiogoniométrie en utilisant un radiogoniomètre Doppler du commerce dans la bande des 100 MHz. Nous présenterons les modifications qu'il convient d'apporter au système et une méthode de mesures afin de minimiser les erreurs angulaires générées par les trajets multiples des signaux reçus.

Première Partie : Méthodes de mesures d'angles de gisement des émetteurs

1. Introduction

Nous avons vu dans le Chapitre I de ce mémoire que la localisation des mobiles par radiogoniométrie s'effectue à partir de la mesure des angles de gisement d'au moins trois sources d'émission radioélectriques de positions géographiques différentes. Le principe de la mesure repose sur la forme particulière des diagrammes de rayonnement des antennes de réception encore appelées radiogoniomètres qui peuvent être construits suivant plusieurs technologies. Les deux types d'antennes les plus utilisés sont soit des antennes à grand gain de type Yagi-Uda, soit des antennes dites " cardioïdes " du fait de la forme de leur diagramme de rayonnement.

L'objectif visé ici est de proposer une méthode qui permet d'effectuer des mesures d'angles de gisement des émetteurs avec la plus grande précision possible tout en minimisant les erreurs ou écarts angulaires dus à l'influence des trajets multiples en milieu urbain ou suburbain. Les angles sont mesurés par rapport à une direction de référence, par exemple le Nord géographique. L'écart angulaire représente la différence entre l'angle mesuré par le dispositif et l'angle vrai existant entre l'émetteur et le récepteur sur une carte de type IGN.

Après un rappel de la théorie uniforme de diffraction ou TUD qui régit la propagation des signaux en milieu urbain ou suburbain, nous étudierons l'influence des conditions différentes de propagation et les effets de multichemins sur la précision des relevés d'angles de gisement des émetteurs. Cette étude s'effectue dans la bande de fréquences allant de 100 MHz à 1000 MHz afin de couvrir la totalité du spectre d'émission des nombreuses sources de radiodiffusion existantes en milieu urbain et suburbain. Cette gamme de fréquence peut être subdivisée en trois sous bandes : FM, VHF et UHF et les antennes développées pour un fonctionnement dans chacune d'elle sont présentées. Ces antennes seront caractérisées en espace libre puis placées dans diverses configurations en milieu urbain ou suburbain près des bâtiments et des obstacles. Les résultats expérimentaux obtenus dans les trois bandes de fréquences permettront d'évaluer les écarts angulaires et d'étudier les effets des trajets multiples sur la précision des mesures.

Cette partie se conclura sur le choix de la méthode de mesures des angles de gisement envisagée ainsi que sur la nécessité ou non d'exploiter successivement les trois bandes de fréquences pour le développement d'un prototype de localisation.

2. Approche théorique de mesure d'angle de gisement

A cause de la présence de bâtiments et d'obstacles de toute nature entre une source d'émission et le dispositif de réception, les signaux issus de l'émetteur subissent des réflexions et des diffractions multiples et suivent des trajets multiples ou multichemins avant d'atteindre le récepteur. Dans ces conditions, pour mesurer l'angle de gisement de la source émettrice, le dispositif de réception cherche à déterminer l'angle d'arrivée du signal prépondérant issu de cet émetteur.

Le comportement du champ électromagnétique dans un milieu donné est régi par les équations de MAXWELL. Pour calculer les champs diffractés et réfléchis, il convient de résoudre ces équations. Plusieurs méthodes existent parmi lesquelles les méthodes classiques d'analyse numérique des équations de MAXWELL qui prennent en compte la forme des obstacles et les méthodes numériques dites approchées qui utilisent les calculs mathématiques plus simples.

Les méthodes classiques d'analyse numérique sont basées sur la représentation des équations de MAXWELL soit sous forme différentielle (éléments finis, différences finies) soit sous forme intégrale (méthode des moments). Ces formulations nécessitent une discrétisation de la structure ou obstacle diffractant, ce qui est pénalisant dans le cas des applications envisagées (100 - 1000 MHz) puisque l'obstacle devra être maillé avec un pas beaucoup plus petit que la longueur d'onde et que l'application de cette méthode nécessite des calculateurs puissants.

Parmi les méthodes numériques approchées de prédiction du champ reçu par un récepteur, on peut citer par exemple la méthode d'Okumura-Hata qui utilise une série de formules mathématiques simples faisant intervenir des coefficients correcteurs dépendant des conditions générales dans lesquelles s'effectuent les liaisons radioélectriques (cf. Chapitre II), la méthode adoptée par le CCIR (Comité Consultatif International en Radiocommunication) qui calcule l'atténuation due à des obstacles isolés lorsque ces derniers sont éloignés de l'émetteur et du récepteur et la théorie uniforme de diffraction ou TUD qui découle de la théorie géométrique de diffraction ou TGD qui s'appuie elle-même sur les concepts fondamentaux de l'optique géométrique. Ces notions d'optique géométrique ainsi que les théories évoquées, sont largement explicitées dans [17].

2.1 Introduction aux notions de la théorie uniforme de diffraction (TUD)

Les fondements de l'optique géométrique découlent d'une solution approchée de l'équation de propagation de Helmholtz qui se déduit des équations de MAXWELL dans l'air. En espace libre, le principe de Fermat impose aux rayons d'être des droites, de se réfléchir et de se réfracter selon les lois de Descartes.

La Théorie Géométrique de Diffraction (TGD) a été élaborée en vue de prendre en compte le champ diffracté ou reçu dans la zone d'ombre de l'émetteur. Cette théorie est principalement due à J. KELLER [42] qui a élargi le domaine d'application de la méthode des rayons. Elle s'applique notamment lorsque les dimensions de l'obstacle sont beaucoup plus grandes que la longueur d'onde. Le champ diffracté par l'obstacle dans ces conditions dépend essentiellement du champ au voisinage de certains points de l'obstacle encore appelés points de diffraction. Les rayons diffractés résultent alors des rayons incidents de l'optique

géométrique qui illuminent les arêtes ou encore les rayons incidents qui rasant de telles surfaces. En se basant sur le principe de Fermat généralisé, Keller a formulé une loi de diffraction qui détermine la position du point de diffraction et la direction de propagation d'un rayon diffracté d'une manière analogue à la loi de réflexion de Snell-Descartes qui détermine la position de réflexion et la direction de propagation du rayon réfléchi de l'optique géométrique.

Cependant, le coefficient de diffraction élaboré par Keller présente une divergence au voisinage des frontières d'ombre géométrique. Les principales théories uniformes de diffraction développées par Koumyoumjan, Pathak [43] et Luebbers [44] permettent d'étendre l'approche théorique aux diffractions sur un dièdre diélectrique à trois dimensions et de rendre compte des phénomènes physiques mis en jeu.

L'expression du signal diffracté par une arête d'un bâtiment en trois dimensions en fonction du champ direct est donnée par l'équation (1) [17,45] :

$$E_d = E_i D_d \sqrt{\frac{s'}{s(s+s')}} \times e^{-jKs} \quad (1)$$

- avec
- E_d représente le champ diffracté,
 - E_i représente le champ incident,
 - D_d est une matrice 3*3 des coefficients de diffraction,
 - s' est la distance entre l'émetteur et le point de diffraction,
 - s est la distance entre le point de diffraction et le récepteur,
 - et $K=2\pi/\lambda$ représente le vecteur d'onde ; il est colinéaire au vecteur de Poynting et est de même sens.

NB : Dans un système à trois dimensions, la matrice des coefficients de diffraction peut être réduite en une matrice 2*2 cf.[45].

L'équation qui relie les champs direct et réfléchi est exprimée par la relation (2) suivante:

$$E_r = E_i D_r \frac{s_i}{s_i + s_r} e^{-jKs_r} \quad (2)$$

- E_r est le champ réfléchi,
- E_i est le champ incident,
- D_r est la matrice des coefficients de réflexion,
- s_i est la distance existant entre l'émetteur et le point réfléchi,
- s_r est la distance entre le point de réflexion et le récepteur,
- et $K=2\pi/\lambda$, est le vecteur d'onde.

Le champ réfléchi peut être décomposé en une composante parallèle à la surface réfléchissante et une composante perpendiculaire à la surface réfléchissante. Les expressions des coefficients de réflexion des composantes parallèles ($R_{//}$) et perpendiculaires (R_{\perp}) sont données par :

$$R_{//} = \frac{\varepsilon_r^* \cos \theta_i - R}{\varepsilon_r^* \cos \theta_i + R} \quad R_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - R}{\cos \theta_i + R}$$

avec $\varepsilon_r^* = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$ et $R = \sqrt{\varepsilon_r^* - \sin^2 \theta_i}$,

- θ_i est l'angle existant entre le rayon incident et la perpendiculaire au plan réfléchi.

Dans ce cas, la matrice D_r des coefficients de réflexion est une matrice 2*2 composée des éléments $R_{//}$ et R_{\perp} .

A partir du calcul des amplitudes des champs diffractés et réfléchis et de l'évolution du champ total reçu par le récepteur, on veut déterminer l'angle d'arrivée du signal prédominant en provenance d'un émetteur (en absence du signal direct). Un exemple pratique concerne un récepteur qui est masqué pour l'émetteur et qui se déplace transversalement dans une rue bordée d'immeubles.

2.2 Etude de la propagation des signaux radioélectriques le long d'une rue

Le modèle analytique de calcul des amplitudes repose sur la prise en compte des rayons réfléchis sur le sol et les bâtiments bordant les rues ainsi que sur les rayons diffractés par les arêtes horizontales formées par le toit des bâtiments.

On s'appuie sur les expressions des champs diffractés et réfléchis, du vecteur d'onde et du vecteur de Poynting pour calculer l'angle d'arrivée du signal prédominant dans deux configurations simples à mettre en oeuvre (en absence du signal direct) afin d'évaluer les écarts angulaires obtenus entre la direction réelle de l'émetteur et la direction apparente du champ total vue du récepteur. Une configuration géométrique illustrée par la figure 3.1, dans laquelle la largeur de la rue est à peu près égale à la hauteur des bâtiments la bordant, est un cas fréquemment rencontré et constitue le cas de figure qui a été étudié dans [17]. La figure 3.2 présente les résultats théoriques obtenus par simulation.

Dans chacun des deux cas de figure, le récepteur est placé dans une rue entre deux bâtiments A et B qui ont chacun 16 mètres de haut, 9 mètres de large et 50 mètres de long. Les calculs ont été effectués en considérant deux positions de l'émetteur comme indiqué figure 3.1. L'émetteur est un dipôle électrique de Hertz placé à 4 mètres au-dessus du toit du bâtiment B (cas 1) et à une trentaine de mètres du bâtiment B (cas 2). Dans les deux cas, l'émetteur est masqué pour le récepteur.

Le récepteur est placé à 1 m 50 au-dessus du sol, à 3 mètres du mur du bâtiment B dans le cas 1 et du bâtiment A dans le cas 2. Il se déplace longitudinalement entre les deux bâtiments A et B.

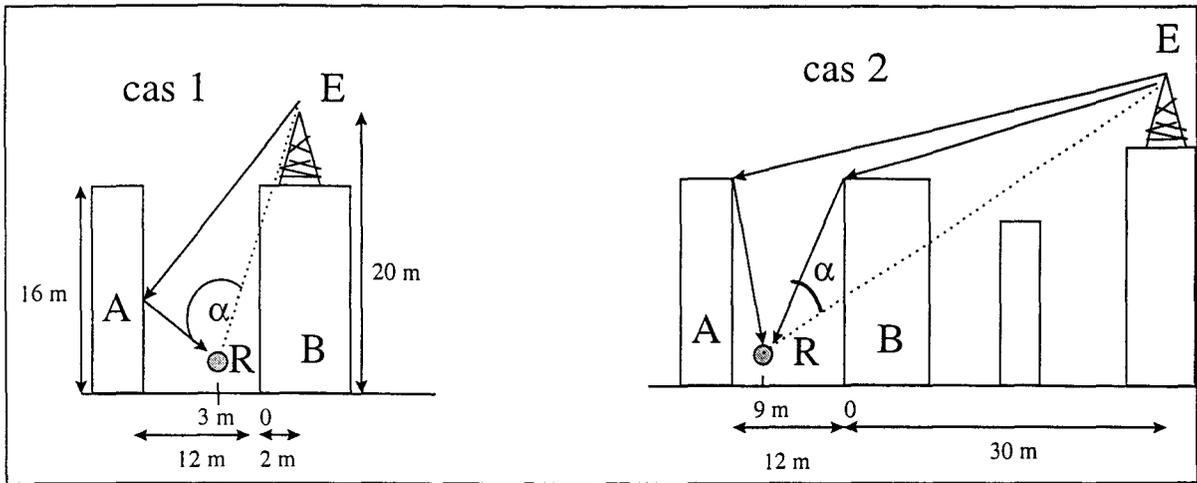


Figure 3.1 : Positions de l'émetteur et du récepteur

Les résultats de calculs de la figure 3.2, représentent l'erreur ou la déviation angulaire en fonction de la distance. La déviation angulaire est la différence entre l'angle d'arrivée du champ total calculé et l'angle réel existant entre l'émetteur et le récepteur par rapport à une direction de référence.

L'exploitation de l'outil numérique de calcul permet de déterminer la direction du signal prédominant ou champ total à partir des expressions sinusoïdales des champs diffractés et réfléchis sur les obstacles présentées précédemment. Pour les calculs, il convient de prendre en compte tous les champs réfléchis ou diffractés une ou plusieurs fois sur les parois ou arêtes des bâtiments. Les résultats théoriques [17] montrent que la prise en compte de dix rayons ou champs réfléchis une ou deux fois sur les obstacles est suffisante pour les calculs.

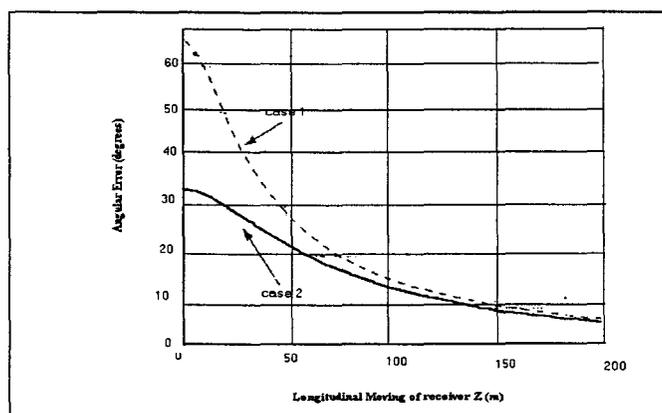


Figure 3.2 : Résultats de simulation de la déviation angulaire

On note que lorsque le récepteur est à l'aplomb de l'émetteur, les écarts angulaires sont grands. La déviation angulaire est de 65 degrés dans le premier cas et de 35 degrés dans le second cas. Ceci s'explique par le fait qu'en l'absence du trajet direct entre l'émetteur et le récepteur, la direction du signal prédominant coïncide avec celle du signal réfléchi sur le bâtiment A de gauche dans le premier cas. Dans le second cas de cet exemple, le signal prédominant est le champ diffracté par l'arête horizontale du bâtiment B. Les résultats obtenus sont indépendants de la fréquence.

Au fur et à mesure que le récepteur s'éloigne de l'émetteur, la déviation angulaire décroît dans les deux cas. Sur la première cinquantaine de mètres, ces écarts angulaires restent relativement élevés.

A partir d'une centaine de mètres, les rayons se réfléchissent sur les parois des deux bâtiments alentours suivant les angles d'incidence rasants et les trajets parcourus sont de longueurs comparables. La direction prédominante du champ total reçu est proche de l'angle de gisement vrai de l'émetteur. L'écart angulaire dans les deux cas tend vers une valeur voisine de 10 degrés.

Les écarts angulaires importants obtenus lors du calcul théorique sur les premières dizaines de mètres de l'émetteur sont à relativiser.

En effet, en pratique, la distance réelle entre la source d'émission et de réception est bien souvent supérieure à quelques dizaines de mètres ; l'erreur ou l'écart angulaire engendré devrait donc fortement diminuer et être inférieur à 10 degrés (la distance entre l'émetteur et le récepteur étant bien souvent de quelques centaines de mètres en milieu urbain ou suburbain).

Ces résultats théoriques seront illustrés par les mesures expérimentales effectuées à l'aide des antennes développées. Nous présenterons d'abord les différentes caractéristiques de ces antennes et en particulier leur diagramme de rayonnement.

3. Développement et caractérisation des antennes dans la bande de fréquences 100-1000 MHz

Dans cette partie, deux types d'antennes ont été développés pour les mesures d'angles de gisement des émetteurs. Il s'agit des antennes à grand gain de type Yagi-Uda et des antennes dites " cardioïdes " compte tenu de la forme de leur diagramme de rayonnement.

La bande de fréquences a été subdivisée, pour raisons d'étude, en trois sous bandes à savoir : la bande HF autour de 100 MHz, la bande VHF autour de 500 MHz et la bande UHF autour de 900 MHz. Des antennes sont développées dans chacune des bandes.

3.1 Caractéristiques des antennes et principe de la mesure des angles de gisement

3.1.1 Caractéristiques des antennes et principe de la mesure des angles de gisement en espace libre

Sur la figure 3.3, nous présentons les diagrammes de rayonnement que l'on cherche à obtenir dans le plan de l'azimut des antennes " cardioïde " et Yagi-Uda développées pour l'application dans chacune des trois sous bandes envisagées.

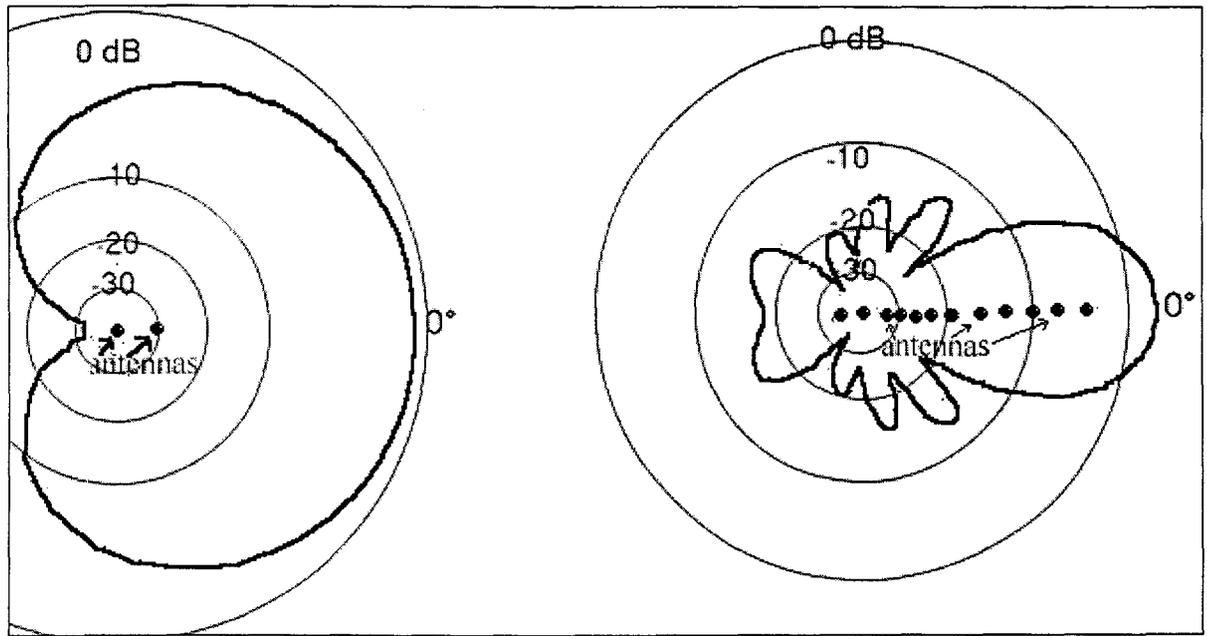


Figure 3.3 : Diagrammes de rayonnement des antennes “cardioides” et “Yagi-Uda”.

La forme de “cardioïde” du diagramme de rayonnement est obtenue en associant deux dipôles résonnants en $\lambda / 2$, espacés de $\lambda / 4$ et tels que les signaux recueillis sur les deux brins soient mis en quadrature de phase.

La forme du diagramme de rayonnement de l’antenne directive à grand gain de type “Yagi-Uda” s’obtient en associant plusieurs dipôles de longueur proche de $\lambda / 2$ et d’espacement proche de $\lambda / 4$.

Le principe de la mesure d’un angle de gisement à partir de ces antennes repose sur la forme de leur diagramme de rayonnement. En espace libre, la direction de l’émetteur recherchée correspond à la droite passant par l’axe de symétrie du diagramme de rayonnement en forme de “cardioïde” ou par l’axe du lobe principal du diagramme de rayonnement de l’antenne “Yagi-Uda”.

En pratique, pour obtenir la direction de l’émetteur recherchée par rapport à une direction de référence (le Nord géographique par exemple), il convient d’orienter au préalable le dispositif de réception par rapport à l’axe de référence choisi puis d’effectuer le relevé de l’amplitude des signaux reçus dans tout le plan azimutal de l’antenne. Les relevés sont réalisés par exemple par pas de 5° pour une rotation de l’antenne de 360° autour de son axe de révolution. A partir des relevés d’amplitude ainsi obtenus, on fera une recherche des axes de symétrie des diagrammes de rayonnement particuliers des antennes.

Le dispositif des mesures utilisé pour ces relevés est présenté figure 3.4. Il est constitué d’un émetteur de signal sinusoïdal placé à 4 mètres du sol en un lieu suffisamment éloigné des bâtiments afin d’éviter les réflexions dans le plan azimutal. Le dispositif de réception est placé à 70 mètres environ de l’émetteur et est constitué des antennes, solidaires d’un moteur tournant qui assure par rotation, la couverture totale (de 0 à 360°) dans le plan azimutal. Les signaux recueillis sur les antennes tous les 5° sont mesurés à l’aide d’un analyseur de spectre. Ce dernier est relié à un ordinateur de type PC via une liaison GPIB pour l’acquisition des mesures au fur et à mesure de la rotation des antennes.

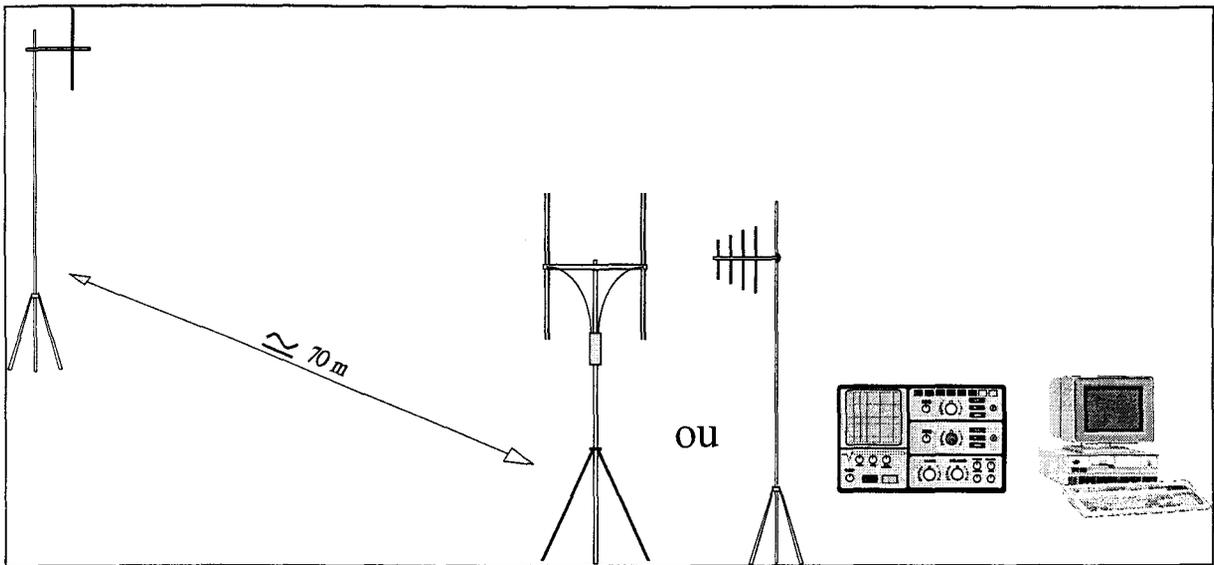


Figure 3.4 : Dispositif de relevés des signaux et de mesure d'angle de gisement.

3.1.2 Principe de la mesure d'angle de gisement avec les antennes développées en milieu urbain et suburbain

En milieu urbain ou suburbain, la présence des bâtiments engendrent des réflexions et diffractions multiples à l'origine de la propagation par trajets multiples qui se traduit au niveau de l'amplitude du signal reçu par une succession rapide de minima et de maxima. Par les figures qui suivent, nous allons illustrer que dans ces conditions, il est difficile d'extraire, de façon immédiate l'angle de gisement recherché, des relevés expérimentaux.

Prenons l'exemple d'une antenne "cardioïde" qui fonctionne de façon optimale dans une bande de 3 MHz autour de 100 MHz et qui présente un rapport max./min. de 30 dB et d'une antenne de type "Yagi-Uda" constituée de douze éléments dont un élément réflecteur, un élément alimenté et plusieurs directeurs. L'antenne fonctionne de façon optimale dans une bande de 25 MHz autour de 940 MHz et présente un gain de 10 dB et une ouverture de 20° à 3 dB en dessous du signal maximal.

Sur les schémas des figures 3.5 et 3.6, nous montrons une évolution typique, en coordonnées cartésiennes et polaires, des maxima de signaux reçus relevés en milieu suburbain, à l'aide de ces antennes dans leur gamme de fonctionnement.

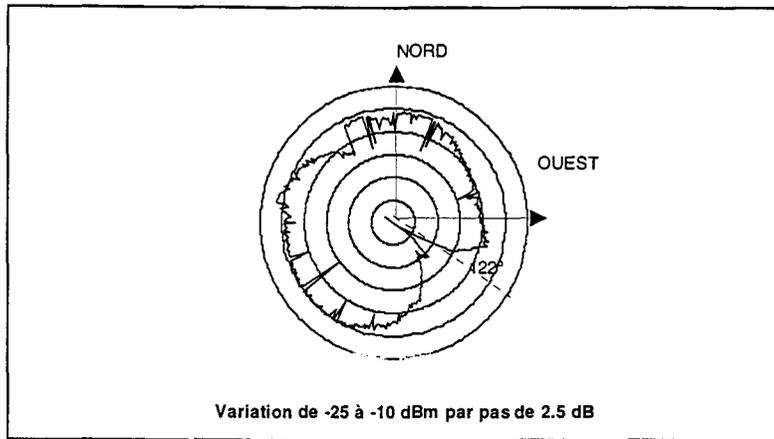


Figure 3.5-a : Relevés obtenus à 106.6 MHz (coordonnées polaires).

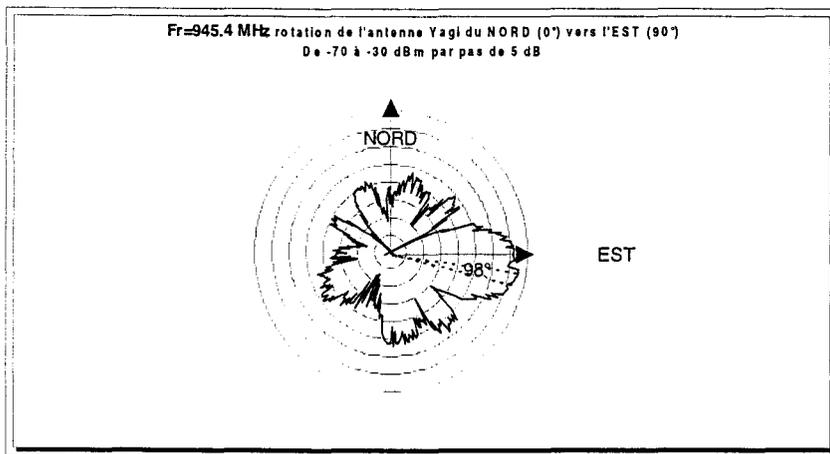


Figure 3.5 -b: Relevés obtenus à 945.5 MHz (coordonnées polaires).

Les niveaux de signaux reçus peuvent également être représentés en coordonnées cartésiennes comme sur la figure suivante.

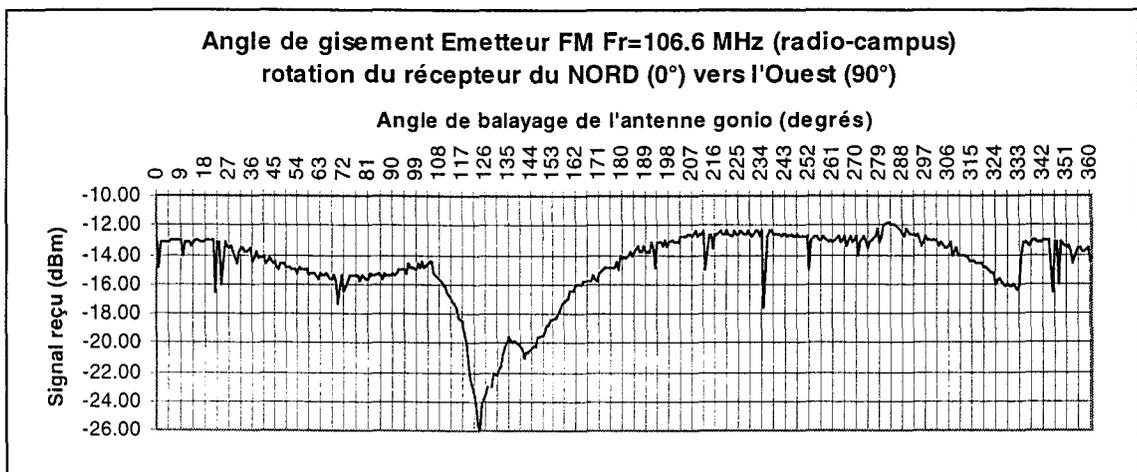


Figure 3.6-a : Relevés obtenus à 106.6 MHz (coordonnées cartésiennes).

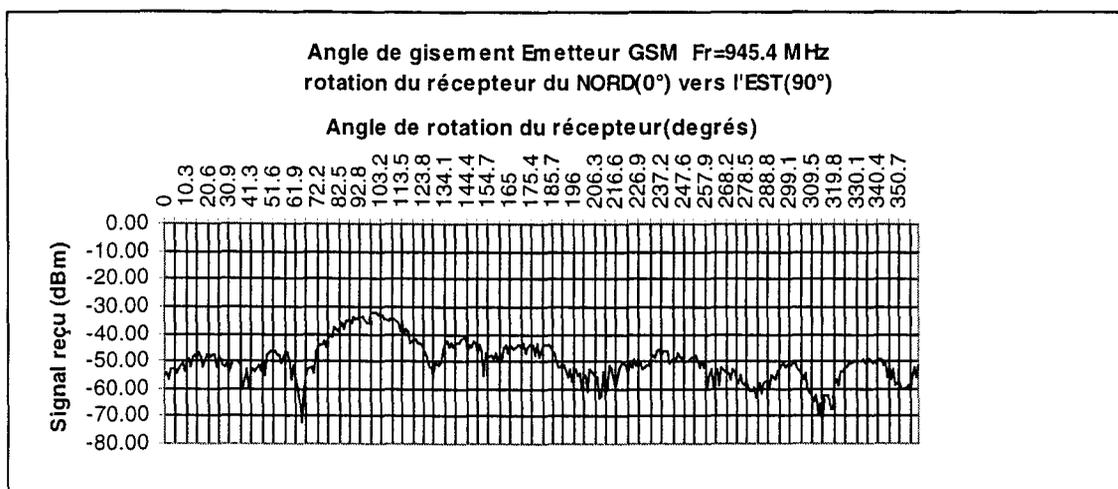


Figure 3.6-b : Relevés obtenus à 945.5 MHz (coordonnées cartésiennes).

Sur ces courbes, l'angle de gisement de l'émetteur à 106.6 MHz à mesurer est de **115 degrés** Ouest par rapport au lieu d'expérimentation (axe de référence zéro degré : le Nord géographique). En orientant au début de l'essai l'axe des dipôles (suivant le minimum de signal reçu) vers le Nord géographique et en effectuant un balayage de 360 degrés du Nord vers l'Ouest, nous avons mesuré avec l'antenne cardioïde, un angle de **122 degrés** Ouest.

L'angle de gisement de l'émetteur GSM considéré est de 105 degrés Est. L'antenne "Yagi-Uda" utilisée est orientée au début de l'essai vers le Nord géographique (référence zéro degré) et on effectue une rotation de l'antenne du NORD vers l'EST (90). La mesure angulaire obtenue est de 98 degrés.

Au regard des courbes précédentes, on constate que les angles de gisement n'ont pas été obtenus par simple recherche de minima et de maxima. Nous allons expliciter ci-après la démarche suivie.

Dans le cas des antennes dites "cardioïdes", déterminer l'angle de gisement de l'émetteur revient à trouver la direction de l'axe passant par le minimum (axe OB de la figure 3.7) et le maximum du champ reçu (axe OA de la figure 3.7). Les angles correspondant respectivement au maximum et au minimum des amplitudes mesurées doivent se trouver sur un même axe qui correspond à la direction recherchée.

Ayant identifié sur les relevés expérimentaux, l'angle α_{\min} pour lequel on a obtenu le minimum des minima, on recherche ensuite la valeur de α_{\max} pour laquelle on a obtenu le maximum des maxima. Si α_{\min} et α_{\max} ne sont pas diamétralement opposés, on va alors chercher de part et d'autre de cet angle, les deux angles correspondant aux directions des signaux situés entre 6 et 15 dB en dessous de la valeur maximale (axes OC et OD de la figure 3.7). La recherche se poursuit jusqu'à ce que la direction de la bissectrice des deux angles ainsi trouvés (axes OC et OD de la figure 3.7) soit proche (écart inférieur ou égal à 5°) de la direction de l'axe OB correspondant au minimum des minima d'amplitude.

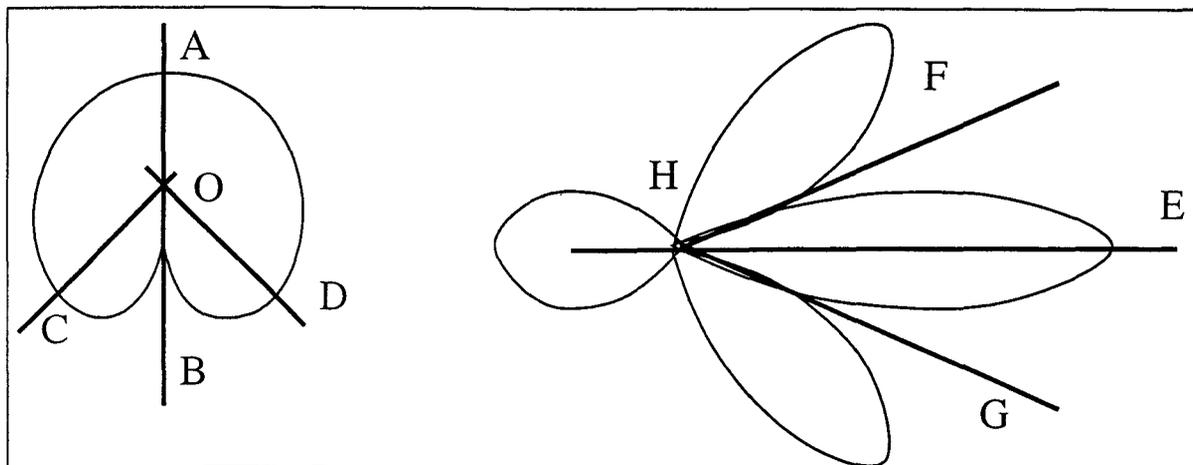


Figure 3.7 : Procédés de mesure d'angle dans le cas du multichemins.

Dans le cas de l'antenne Yagi-Uda, déterminer l'angle de gisement de l'émetteur revient à trouver la direction de l'axe HE du lobe principal (figure 3.7). Pour cela on utilise une caractéristique du diagramme de rayonnement qui présente deux "premiers" minima accentués situés généralement entre 30° et 45° de part et d'autre du lobe principal ou de la direction du champ maximal reçu comme illustré figure 3.7.

Plutôt que de rechercher l'angle correspondant au maximum des maxima, on détermine d'abord les angles correspondant aux deux valeurs minimales situées, entre 25° et 50° , de part et d'autre de ce maximum de champ reçu. Le traitement des signaux n'est validé que lorsque les deux angles correspondant aux minima de champ ainsi trouvés sont les plus symétriques possibles (axes HF et HG de la figure 3.7) par rapport à la direction du lobe principal et que cette dernière est proche (inférieure ou égale à 5°) de la direction de la bissectrice des deux angles ainsi trouvés.

3.2 Développement des antennes dans la bande 100-1000 MHz

Comme indiqué précédemment, nous avons développé une antenne dans chacune des bandes de fréquences HF, VHF et UHF. Le calcul des éléments physiques constituant les antennes (longueur des câbles et des brins, espacement des dipôles) s'est effectué autour des fréquences de 100 MHz, 475 MHz et 940 MHz. Pour construire une antenne dont le diagramme de rayonnement a une forme de "cardioïde", il convient d'associer deux dipôles résonnants en $\lambda/2$, espacés de $\lambda/4$ tels que les signaux recueillis sur les deux brins soient mis en quadrature de phase.

Sur le schéma de la figure 3.8, nous présentons un exemple des caractéristiques physiques et mécaniques du radiogoniomètre réalisé à la fréquence de 100 MHz. Il est constitué de deux dipôles alimentés de manière symétrique. Ces dipôles sont reliés à deux câbles coaxiaux de différence de longueur $\lambda/4$ qui permettent de mettre les signaux des deux brins en quadrature de phase. L'addition des signaux est assurée par un coupleur résistif relié à un dispositif de mesures pour l'acquisition des signaux.

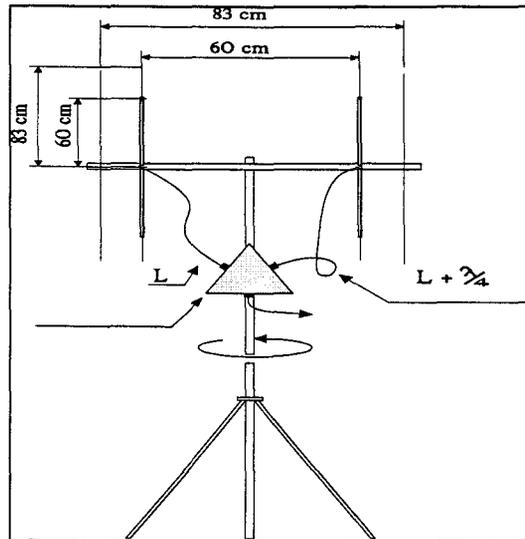


Figure 3.8 : Caractéristiques physiques et mécaniques de l'antenne à 100 MHz.

On constate que ce type d'antenne est très sélectif en fréquence. Les caractéristiques de l'antenne varient avec la longueur des dipôles, l'espacement des dipôles et les déphasages entre les signaux reçus sur les deux dipôles. Il convient donc d'ajuster le capteur à la fréquence de travail. Sur la figure 3.9, nous présentons les diagrammes de rayonnement obtenus pour les antennes développées à 100 MHz, 475 MHz et 900 MHz selon la technologie décrite.

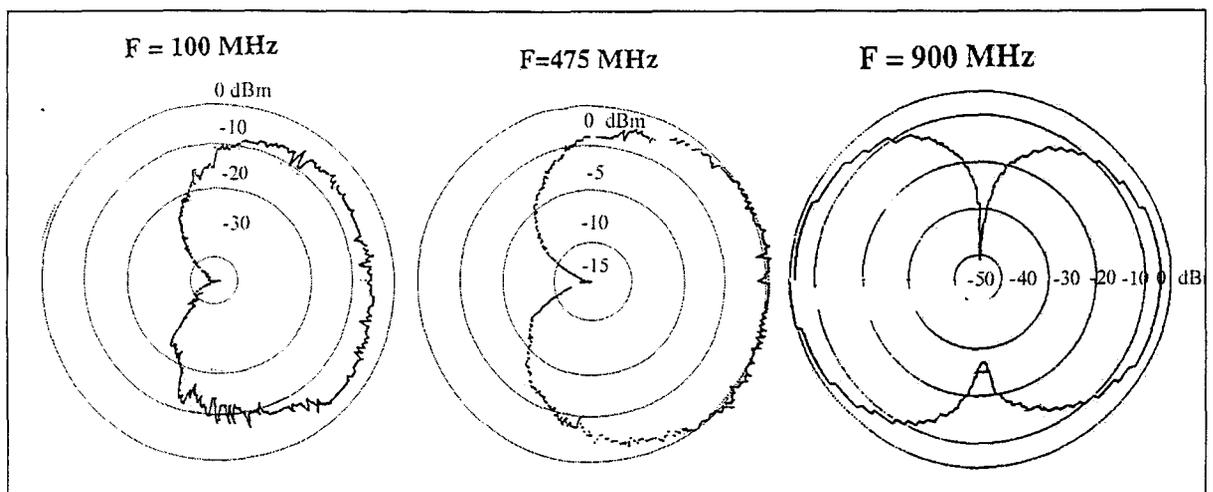


Figure 3.9 : Diagramme de rayonnement des radiogoniomètres cardioides réalisés.

Au vu des différents diagrammes de rayonnement, on note que:

- Le radiogoniomètre fonctionnant autour de 100 MHz présente un diagramme de rayonnement proche de celui désiré. Le rapport max. / min. du signal observé est de 30 dB.
- Le radiogoniomètre fonctionnant autour de 475 MHz présente également un diagramme de rayonnement satisfaisant mais le rapport max./min. du signal observé n'est que de 15 dB. En effet, dans cette gamme de fréquences, les éléments mécaniques deviennent petits et la

contribution des capacités parasites au niveau des connexions est non négligeable. Néanmoins le diagramme de rayonnement permet de déterminer la direction de l'émetteur.

- Le diagramme de rayonnement du radiogoniomètre développé autour de 900 MHz ne correspond pas à celui recherché. Il faut préciser qu'à ces fréquences, le dispositif est très sensible aux capacités parasites introduites par les câbles, les connexions et les constituants des antennes.

Il convient à cette fréquence d'utiliser une autre technologie pour la réalisation du radiogoniomètre par exemple la technologie microstrip. Dans ce cas les dipôles sont fixés aux extrémités d'un coupleur en anneau en technologie microstrip et l'ensemble est placé sur son plan de masse métallique suffisamment large comme illustré sur la figure 3.10.

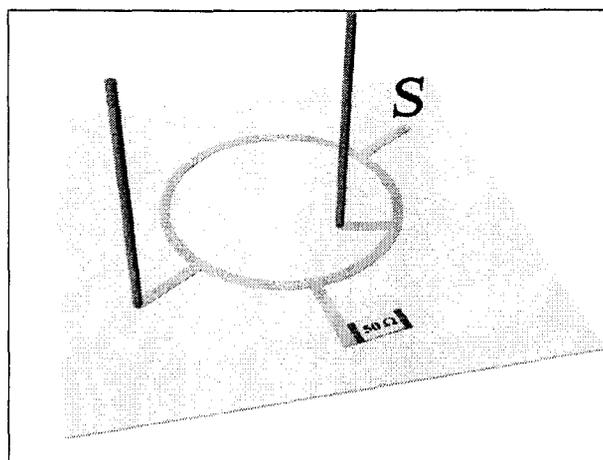


Figure 3.10 : Antenne UHF sur coupleur microstrip.

Sur la figure 3.11 est présenté le diagramme de rayonnement obtenu à 900 MHz avec ce type d'antenne.

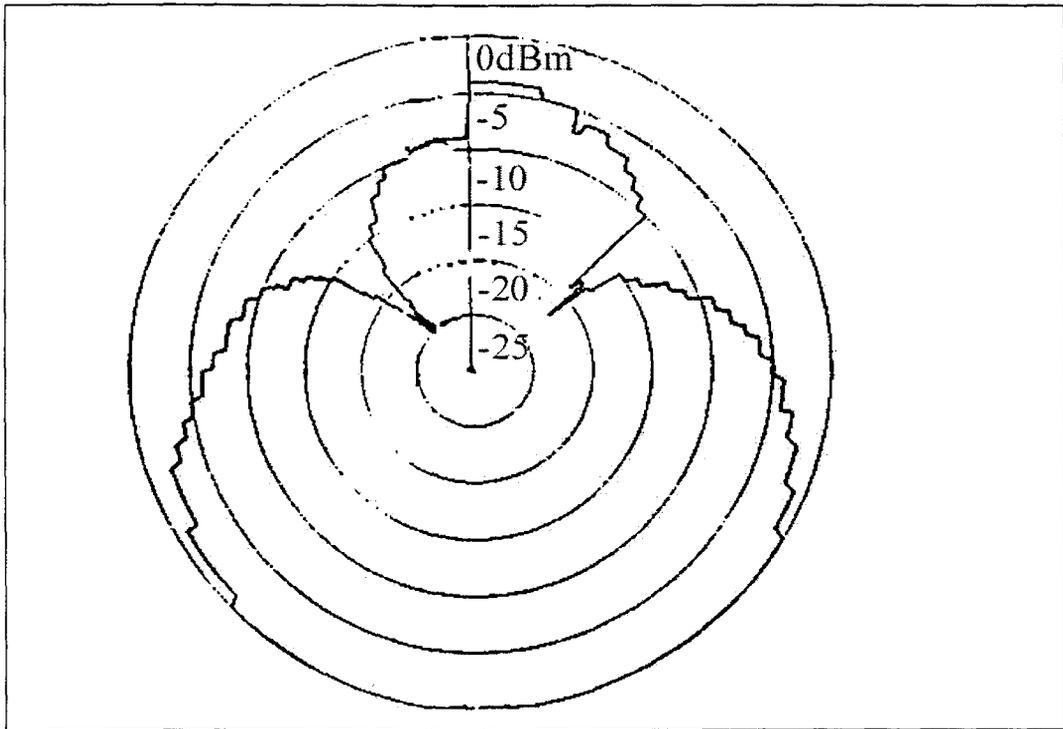


Figure 3.11 : Diagramme de rayonnement de l'antenne UHF sur coupleur microstrip.

Les niveaux de signaux reçus varient entre 0 et -25 dBm. Les résultats montrent qu'il existe un problème de désadaptation d'impédance et que la mauvaise isolation du coupleur et les effets de bords contribuent à la dégradation du diagramme de rayonnement du dispositif.

Pour pallier ces difficultés, les dipôles sont placés sur un plan réflecteur constitué de deux plans sécants comme présenté figure 3.12 de façon à ramener une impédance caractéristique proche de 50 Ohms à la base des antennes, le déphasage est assuré par le câble coaxial et l'addition des signaux se fait à l'aide d'un coupleur résistif.

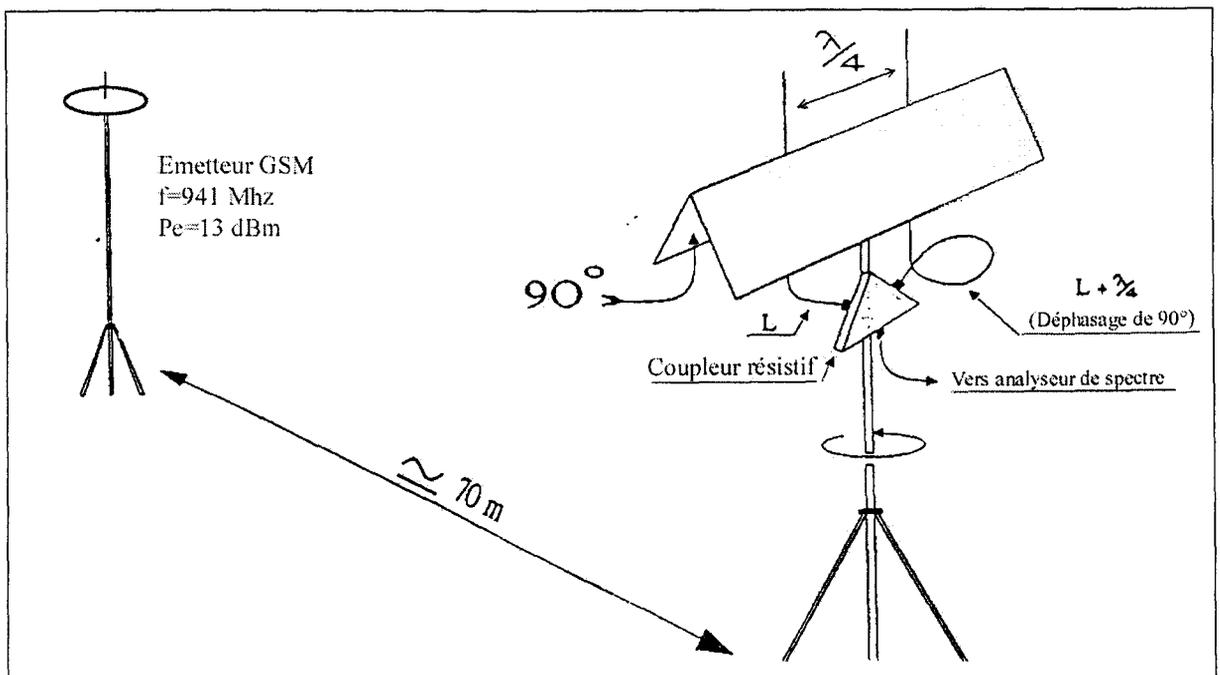


Figure 3.12 : Antennes UHF placées au-dessus de deux plans sécants.

Sur le schéma de la figure 3.13, nous présentons les diagrammes de rayonnement obtenus aux fréquences 941 MHz et 944 MHz.

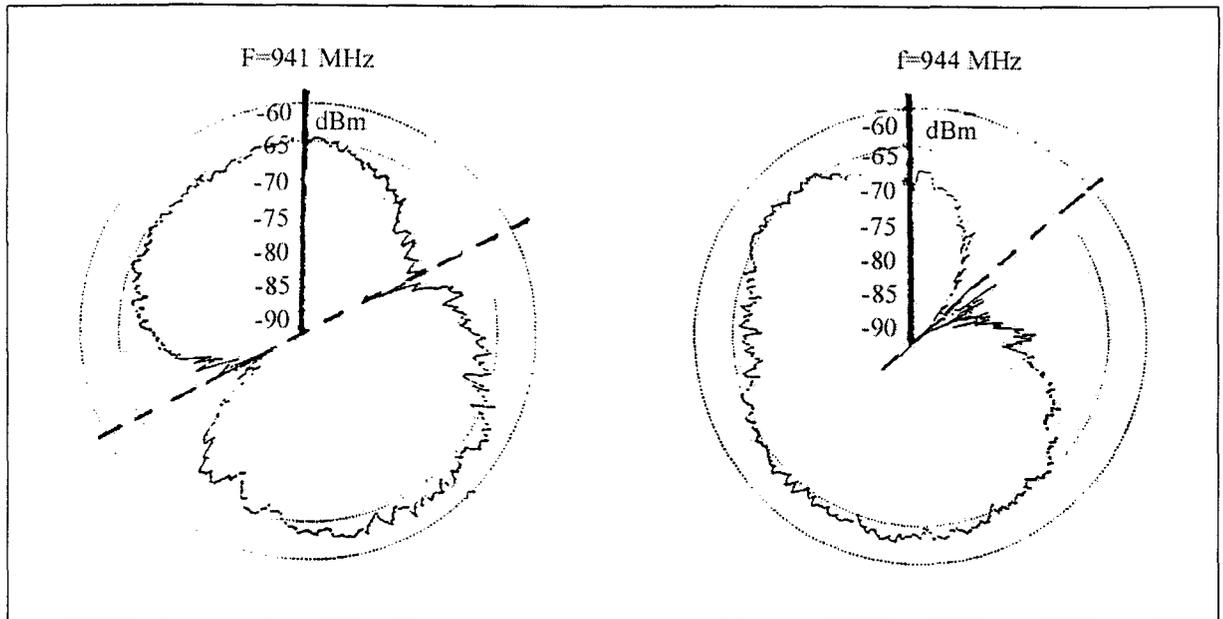


Figure 3.13 : Diagrammes de rayonnement de l'antenne UHF (sur deux plans sécants).

Les niveaux de signaux reçus varient entre -45 et -90 dBm. La forme du diagramme de rayonnement est proche de celle d'une "cardioïde". Cependant, les essais relatifs à la détermination d'un angle de gisement avec cette antenne montrent un décalage de 45° entre la direction effective, réelle de l'émetteur (trait continu de la figure 3.13) et la direction mesurée (en pointillés sur la figure 3.13).

La réalisation d'un radiogoniomètre centré sur les fréquences de 940 MHz et 475 MHz qui présente un diagramme de rayonnement en forme de cardioïde avec un bon rapport max./min. du signal observé n'est pas simple. Nous avons donc orienté nos travaux sur la mise au point d'antennes à grand gain de type Yagi-Uda fonctionnant dans les bandes VHF et UHF. Dans la bande FM, nous utiliserons l'antenne "cardioïde" développée. Les caractéristiques finales des antennes sont présentées dans les pages Annexes III-1.

A l'aide des trois radiogoniomètres développés, nous allons étudier dans chaque bande de fréquences considérée, quelques configurations simples de l'émetteur et du récepteur en milieu suburbain afin d'évaluer les effets de trajets multiples (ondes directes, diffractées et/ou réfléchies une ou plusieurs fois) sur les relevés d'angle de gisement. Cette étude permettra de conclure sur la nécessité ou non d'exploiter simultanément les trois bandes de fréquences.

4. Mesures expérimentales avec les capteurs développés

Dans toute la suite des expérimentations, sauf précisions contraires, le dispositif d'émission ou de réception est situé à 4 mètres au-dessus du sol. L'émetteur est un dipôle rayonnant, accordé à la fréquence de travail désirée et émettant un signal sinusoïdal pur de puissance 30 dBm.

Nous présentons les résultats expérimentaux obtenus avec une antenne "cardioïde" fonctionnant à 100 MHz et deux antennes à grand gain de type "Yagi-Uda" fonctionnant à 475 MHz et 940 MHz. Ces dispositifs sont placés dans diverses configurations

afin d'étudier la précision des relevés angulaires notamment lorsque ces capteurs sont masqués par les bâtiments et les arbres proches.

4.1 Les performances en applications de rase campagne dans la bande de fréquence de 100, 500 et 1000 MHz

Dans la première configuration, les dispositifs d'émission et de réception sont placés en espace libre à des endroits suffisamment éloignés des bâtiments.

Sur le schéma de la figure 3.14, nous présentons les relevés de l'amplitude du signal reçu en fonction de la distance dans les trois bandes de fréquences, effectués en deux endroits distincts avec des antennes de référence demi-onde. Durant toute l'expérimentation, l'angle de gisement de l'émetteur est constant.

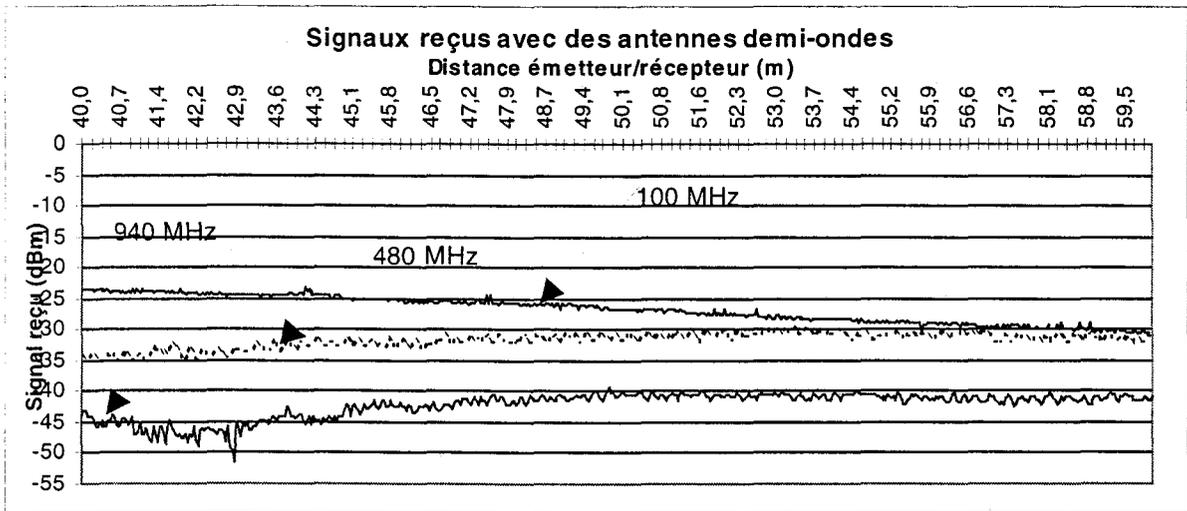


Figure 3.14 : Signaux reçus avec les antennes omnidirectionnelles.

Aux différentes fréquences, au fur et à mesure que le dispositif de réception s'éloigne de l'émetteur, le signal décroît à la fréquence de 100 MHz tandis qu'aux fréquences de 480 MHz et 940 MHz, cette décroissance est plus lente. En effet, hormis les cinq premiers mètres pour lesquels les faibles niveaux ont été obtenus, les niveaux de signaux sont quasi constants sur les quinze derniers mètres. La réflexion du signal sur le sol augmente avec la fréquence; ce qui explique des fluctuations de signaux plus prononcées à 480 et 940 MHz qu'à 100 MHz.

Sur les figures 3.15.1 et 3.15.2, nous présentons des angles mesurés le long de l'axe émetteur/récepteur. L'espace entre deux mesures consécutives étant le mètre. L'angle de gisement réel de l'émetteur est de 0°.

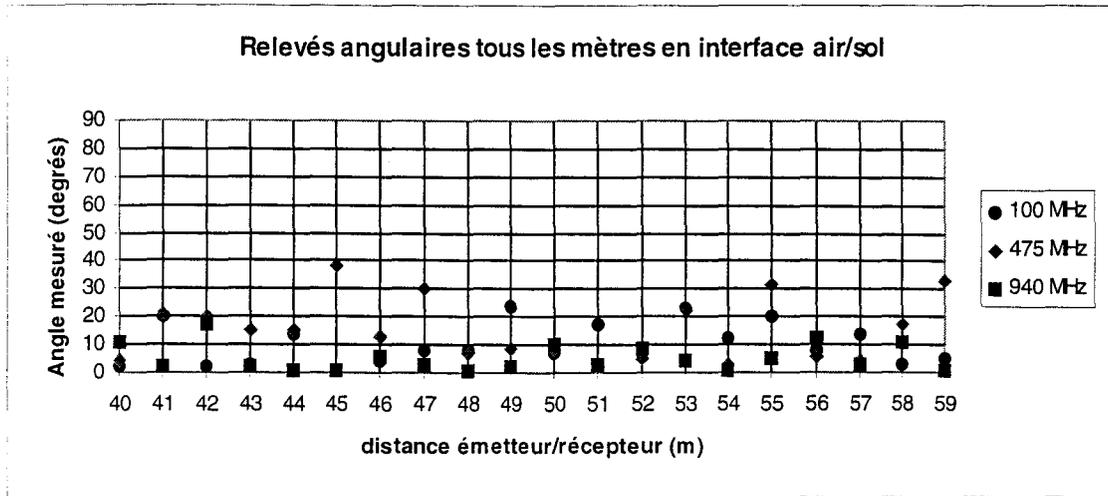


Figure 3.15.1 : Angles mesurés obtenus avec les capteurs (tous les mètres).

On constate qu'en considérant chaque point de mesure séparément, les erreurs angulaires commises à 100 MHz avec l'antenne "cardioïde" peuvent atteindre 20 degrés voire plus; tandis qu'à 475 MHz et 940 MHz, avec les antennes à grand gain de type "Yagi-Uda", l'erreur maximale commise pour des mesures à 940 MHz est de l'ordre de 10 degrés.

Si l'on considère la valeur moyenne des angles mesurés aux différentes fréquences, on obtient :

- à la fréquence de 100 MHz, la valeur moyenne mesurée est de 10 degrés
- à la fréquence de 475 MHz, la valeur moyenne mesurée est de 15 degrés
- et à la fréquence de 940 MHz, la valeur moyenne des relevés est de 5 degrés.

Ces valeurs moyennes permettent de caractériser les erreurs intrinsèques des capteurs munis de leur dispositif de réception (asservissement, moteur tournant et système de mesures).

Lors d'une expérimentation analogue à la précédente en interface air/sol, les résultats suivants ont été obtenus aux fréquences de 100 et 910 MHz. Les angles de gisement à mesurer sont de 180° à 100 MHz et de 0° à 910 MHz.

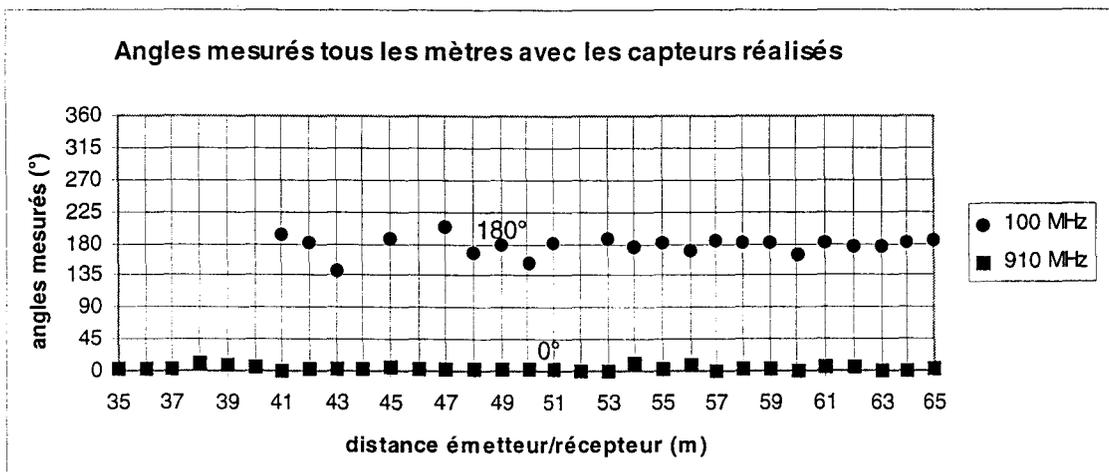


Figure 3.15.2 : Mesures d'angles obtenues avec les capteurs (pas d'un mètre).

A la fréquence de 100 MHz, les écarts obtenus en certains points par rapport à l'angle de gisement vrai sont plus importants. On note par ailleurs qu'il y a certains endroits où l'on n'a pas pu extraire la valeur d'angle ce qui explique la discontinuité des points de mesure. La valeur moyenne des mesures est de 177 degrés, l'erreur moyenne commise est donc de 3 degrés.

A la fréquence de 910 MHz, on obtient en chaque point des résultats satisfaisants car les écarts angulaires obtenus ne dépassent pas 10 degrés. De plus, la valeur moyenne des mesures est de 4 degrés. L'erreur moyenne de mesure commise est de 4°. Elle est du même ordre de grandeur que celle obtenue à 100 MHz.

En absence d'obstacle proche de l'émetteur et du récepteur, l'erreur angulaire sur la mesure de l'angle de gisement de l'émetteur ne dépasse pas 10° à 100 MHz, 910 MHz et 940 MHz. Elle est de 15° à 475 MHz.

Nous allons maintenant mettre en évidence l'influence des signaux réfléchis sur des bâtiments (ou obstacles) sur la mesure de l'angle de gisement.

4.2 Effets des signaux directs et réfléchis sur les mesures angulaires

Ce cas est étudié au travers d'une expérimentation dont la configuration est présentée figure 3.16. Le bâtiment nommé 5 sur la figure a 8 mètres de haut et ses faces latérales sont recouvertes de briques. L'onde émise est réfléchi sur le mur du bâtiment 5 avant d'atteindre le récepteur qui reçoit également le signal direct. L'émetteur et le récepteur se trouvent successivement à 5 m puis à 10 m du bâtiment 5.

Pour toutes les mesures effectuées dans cette configuration, la puissance de l'émetteur est de 13 dBm et le récepteur se déplace sur une distance allant de 16 à 31 mètres par rapport à l'émetteur.

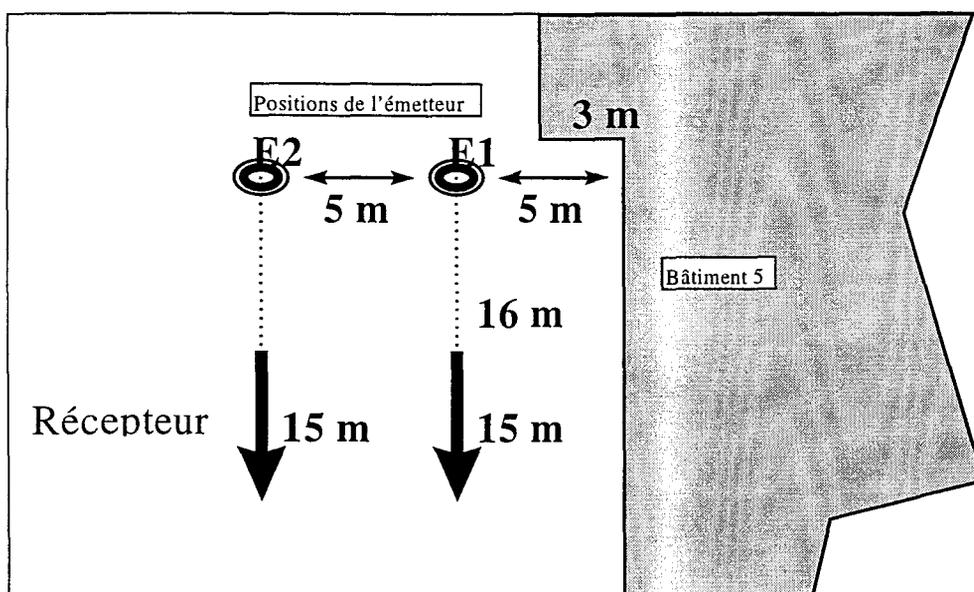


Figure 3.16 : Dispositions de l'émetteur et du récepteur près du bâtiment 5.

Pour chacune des deux configurations (5 m puis 10 m du bâtiment 5), les figures 3.16.1 et 3.16.3 présentent des enregistrements continus de niveaux de signaux reçus, avec des antennes omnidirectionnelles, en fonction du déplacement du récepteur. Ces relevés permettent de visualiser l'évolution du champ total reçu aux trois fréquences étudiées.

Les angles de gisement relevés, dans chacun des deux cas, en fonction du déplacement du récepteur. Les mesures sont effectuées, avec un espacement d'un mètre entre les relevés, à l'aide des antennes développées. Les résultats sont présentés respectivement pour les deux configurations sur les figures 3.16.2 et 3.16.4.

4.2.1 Emetteur et récepteur à 5 mètres du mur du bâtiment 5

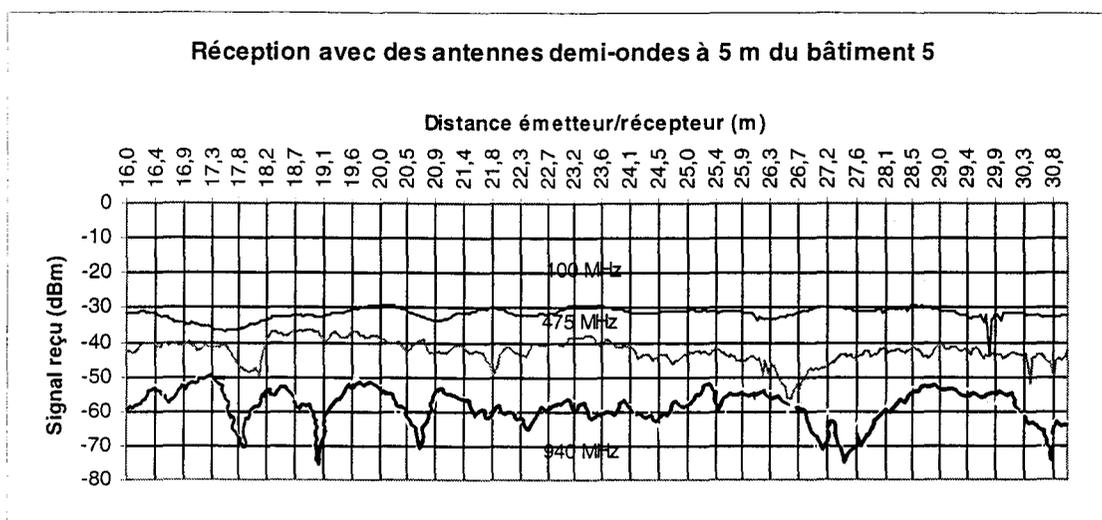


Figure.3.16.1 : Niveaux des signaux reçus avec les antennes demi-ondes à 5 m du mur.

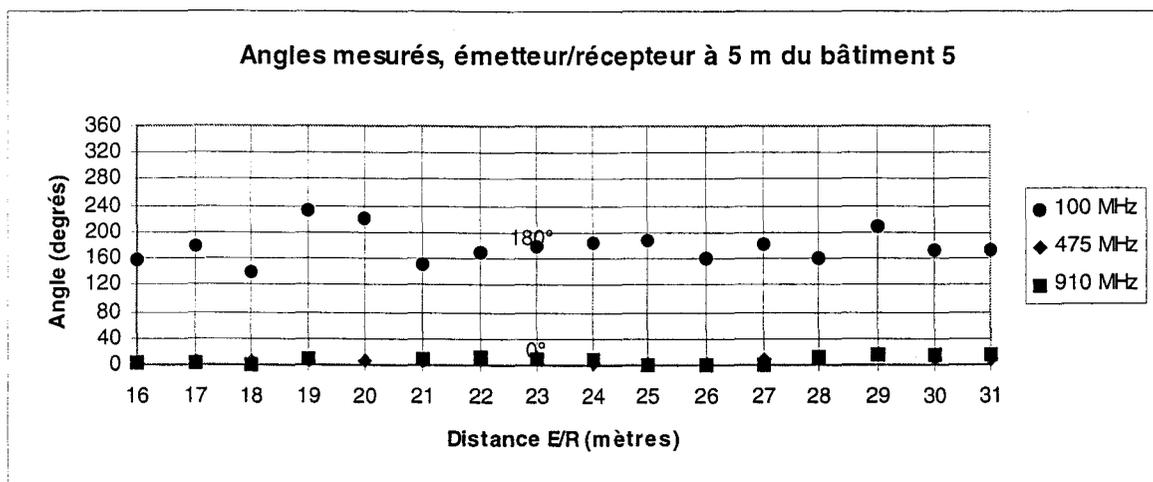


Figure 3.16.2 : Angles mesurés avec les capteurs (E/R situés à 5 m du bâtiment 5).

A la fréquence de 100 MHz, les écarts angulaires peuvent atteindre 40 degrés par rapport à l'angle du faisceau direct (180 degrés au départ). En considérant chaque point de mesure, on observe une fluctuation importante de l'angle mesuré autour de l'angle réel.

En effet, le minimum de signal reçu n'est pas très accentué et dans certains cas nous en décelons plus d'une valeur de minima à cause des multichemins. Cependant, si nous effectuons une moyenne des valeurs mesurées, l'angle de gisement obtenu est égal à 178 degrés au lieu de 180°, ce qui est satisfaisant.

Aux fréquences de 475 MHz et 940 MHz, la valeur moyenne des mesures de l'angle de gisement est de 7 degrés alors que l'angle vrai est égal à 0°. Cet écart est du même ordre de grandeur que l'écart observé en espace libre.

4.2.2 Emetteur et récepteur à 10 mètres du mur du bâtiment 5

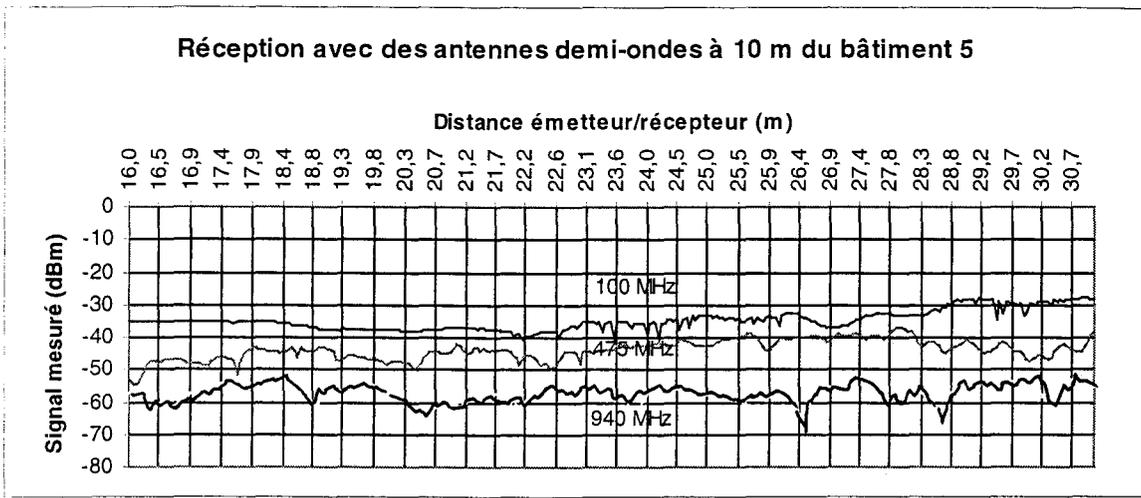


Figure 3.16.3 : Niveaux des signaux reçus avec les antennes demi-ondes à 10 m du mur.

Lorsque l'on éloigne le dispositif d'émission et de réception du mur, on observe les mêmes phénomènes que précédemment. Les évanouissements rapides sont moins accentués. Ceci est dû au fait que le niveau de signal réfléchi sur le mur est plus faible car le trajet parcouru par l'onde est plus important.

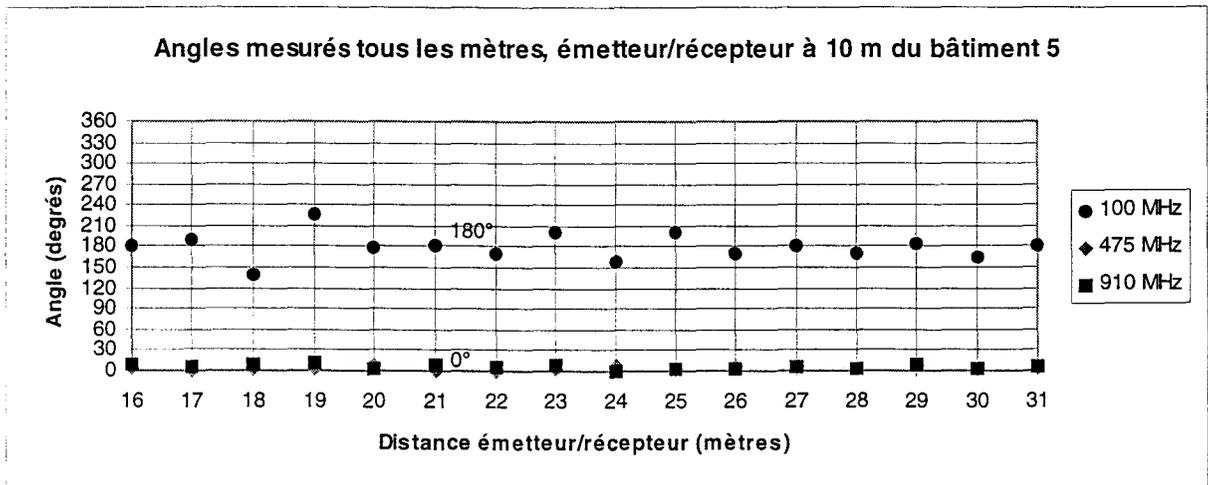


Figure 3.16.4 : Angles mesurés avec les capteurs à 10 m du bâtiment 5.

A la fréquence de 100 MHz, hormis deux cas pour lesquels nous avons mesuré des écarts de 40 degrés, les fluctuations autour de l'angle vrai (180 degrés) ne dépassent pas 20 degrés. Ceci s'explique par le fait que la contribution de l'onde réfléchi sur le mur est plus faible lorsque les deux dispositifs d'émission et de réception sont éloignés du mur bien que l'angle d'arrivée du signal correspondant soit plus grand. La valeur moyenne des mesures est de 180 degrés. Ce qui correspond à l'angle vrai de l'émetteur.

Aux fréquences de 475 MHz et 910 MHz, les écarts angulaires par rapport au trajet direct ne dépassent pas 10 degrés. Les valeurs moyennes mesurées sont de 4 degrés à 475 MHz et de 6 degrés à 910 MHz.

A présent, considérons les cas de figures pour lesquels l'émetteur est masqué pour le récepteur. Dans ces conditions, le champ total reçu par le récepteur est une combinaison des signaux diffractés sur les arêtes des bâtiments et/ou des signaux réfléchis sur les obstacles.

4.3 Effets d'absence de signal direct entre émetteur et récepteur sur les relevés d'angle de gisement

Cette étude s'appuie sur trois configurations.

4.3.1 Diffraction sur l'arête verticale d'un bâtiment

Comme indiqué sur la figure 3.17, les expérimentations s'effectuent près d'un bâtiment nommé 4 qui a une hauteur d'environ 10 mètres et des faces latérales recouvertes de tôles en aluminium. On souhaite analyser les différents relevés obtenus avec les antennes aux positions 1 à 10 de la figure 3.17.

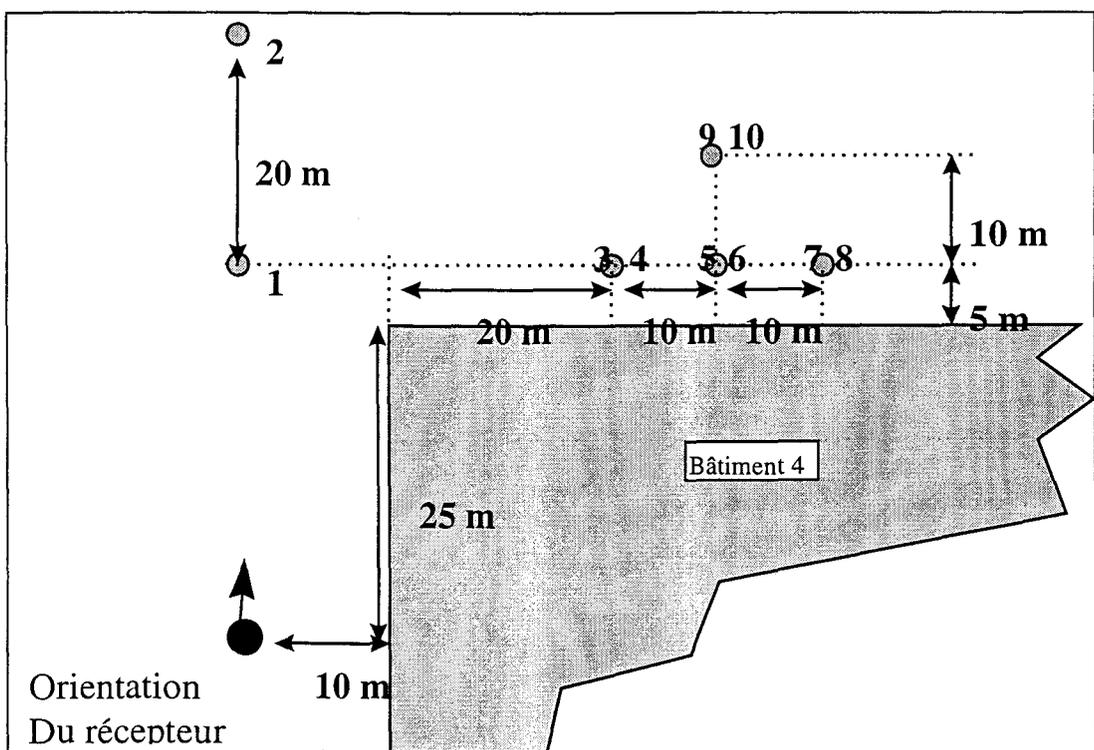


Figure 3.17 : Positions 1 à 10 de l'émetteur par rapport au bâtiment 4.

Aux positions 1 et 2, le récepteur est en vue directe de l'émetteur. En plus du signal direct, le récepteur reçoit le champ réfléchi sur le mur du bâtiment 4.

Les positions nommées 3 et 4, 5 et 6, 7 et 8 ; 9 et 10 sont distantes de 75 cm. A ces positions, le récepteur est masqué pour l'émetteur. On veut vérifier que l'angle du signal reçu par le récepteur est proche (sinon égal) à l'angle du signal diffracté sur l'arête du bâtiment.

Les mesures angulaires obtenues aux positions décrites figure 3.17 sont présentées figure 3.17.1.

Lorsque le récepteur est dans la zone d'ombre de l'émetteur, on constate que les niveaux de signaux reçus sont faibles et fluctuants. Il est donc difficile d'extraire, à partir des mesures effectuées avec l'antenne " cardioïde ", l'angle de gisement avec une grande précision.

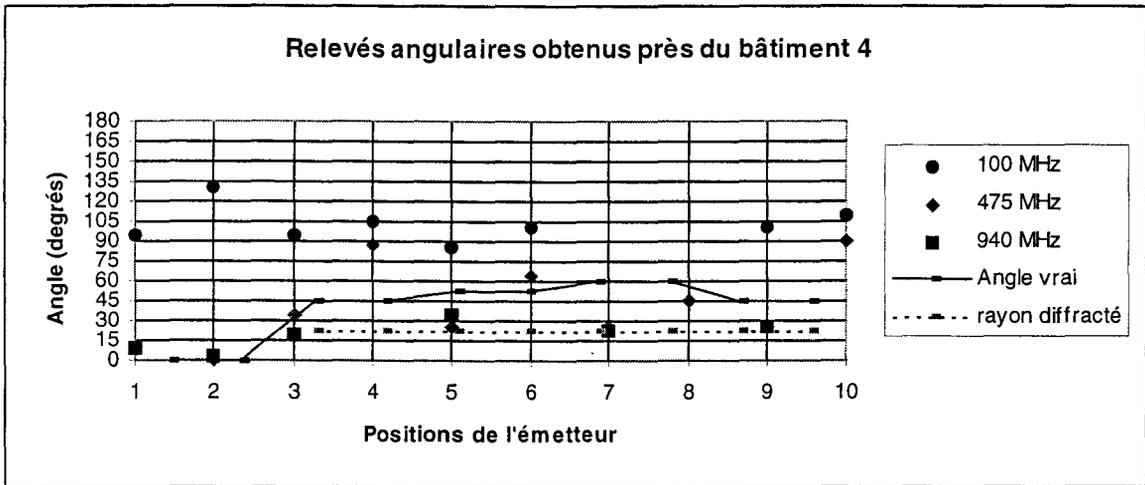


Figure 3.17.1 : Angles mesurés obtenus aux positions 1 à 10 près du bâtiment 4.

Sur la figure 3.17.1, l'angle vrai existant entre l'émetteur et le récepteur est en trait continu et l'angle correspondant au faisceau diffracté sur l'arête du mur du bâtiment est en pointillés.

A la fréquence de 100 MHz, aucune des valeurs obtenues n'est proche ni de la valeur du faisceau diffracté, ni de l'angle vrai. Tout se passe comme si les signaux réfléchis sur le bâtiment situé à une soixantaine de mètres du récepteur sont prépondérants par rapport au faisceau diffracté sur l'arête verticale du bâtiment 4.

Aux fréquences de 475 MHz et 940 MHz, pour des points proches et distants de 75 cm, les angles mesurés aux positions 3,5,7 (8) et 9 sont proches des angles du signal diffracté ; tandis que les valeurs mesurées aux positions 4,6,8 et 10 sont peu fiables à la fréquence de 475 MHz et ne sont pas exploitables à 940 MHz.

On remarque que les relevés angulaires ne sont pas rigoureusement identiques pour peu que les dispositions des émetteur et récepteur ne soient pas les mêmes. Il y a un problème de reproductibilité des relevés angulaires.

Pour s'affranchir des fluctuations du signal qui engendrent une dispersion des valeurs d'angles, on va mesurer l'angle de gisement en plusieurs points autour de la position initiale, ces points étant séparés de $\lambda/4$. Après avoir éliminé les valeurs éloignées de l'ensemble des mesures, on calcule la valeur moyenne des mesures sur une certaine distance. Cette valeur moyenne représente la mesure d'angle de gisement considérée.

Nous allons maintenant mettre en évidence la diffraction des signaux sur l'arête verticale d'un bâtiment en présence d'autres obstacles.

4.3.2 Mise en évidence de la diffraction des signaux sur l'arête verticale d'un bâtiment et les réflexions sur des obstacles

Les configurations géométriques des mesures sont présentées figures 3.18 et 3.19 ci-après. Deux essais ont été effectués à deux endroits distincts près des bâtiments nommés 1 et 2.

4.3.2.1 Mesures en présence du bâtiment 1

Dans la première série d'expériences, l'émetteur et le récepteur sont placés près du bâtiment 1. Le bâtiment 1 possède 6 m de haut et possède des faces latérales en béton de dimensions 15 m*15 m ; dans son voisinage proche, une butte de terre de 2 m50 de haut est située à une quinzaine de mètres de l'une des faces du bâtiment 1.

La diffraction du signal émis s'effectue sur l'arête verticale du mur et la butte de terre (de 2 mètres 50 de haut) réfléchit les signaux en provenance de l'émetteur. On souhaite ici mettre en évidence l'influence du signal réfléchi sur la précision des relevés avec les deux types d'antennes (cardioïde à 100 MHz et Yagi-Uda à 475 MHz).

Le dispositif de réception est en position fixe et son orientation au début de chaque expérimentation est indiquée figure 3.18. L'émetteur prend successivement les positions 1 à 11 indiquées figure 3.18.

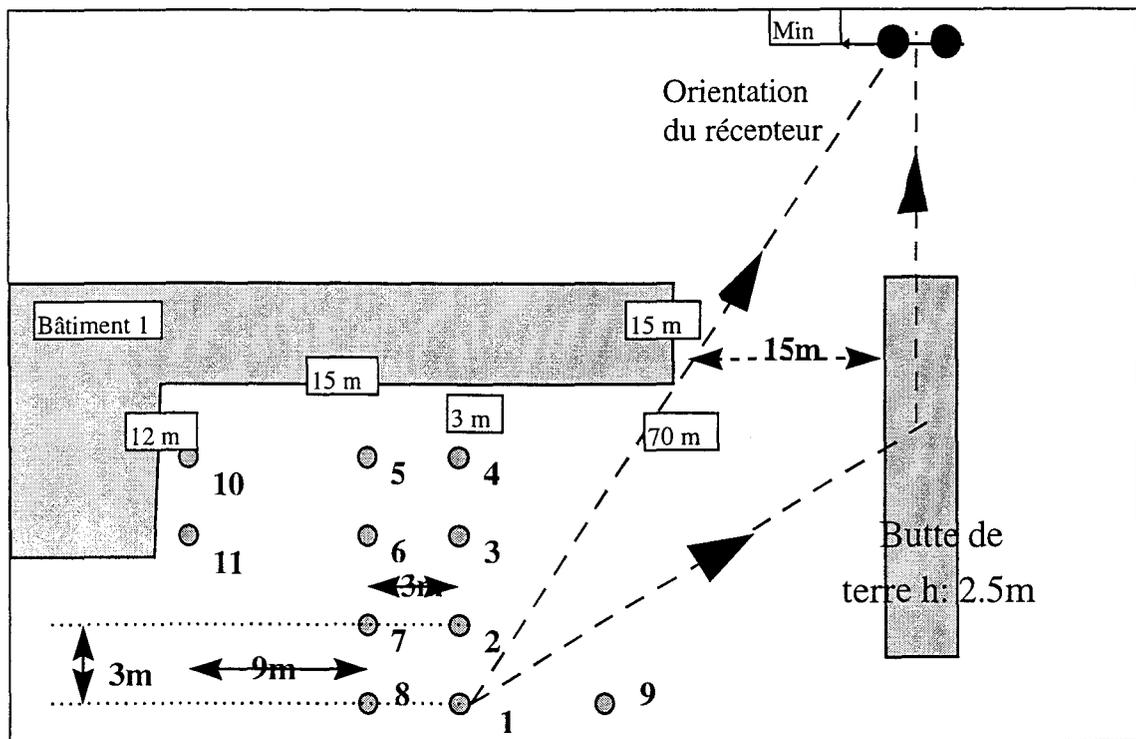


Figure 3.18 : Positions 1 à 11 de l'émetteur et du récepteur par rapport au bâtiment 1.

Lorsque l'émetteur est en position 1 ou 9, il est en vue directe du récepteur. La distance entre l'émetteur et le récepteur est de 70 mètres environ.

Les résultats des mesures angulaires obtenus aux positions considérées sont présentés figures 3.18.1.

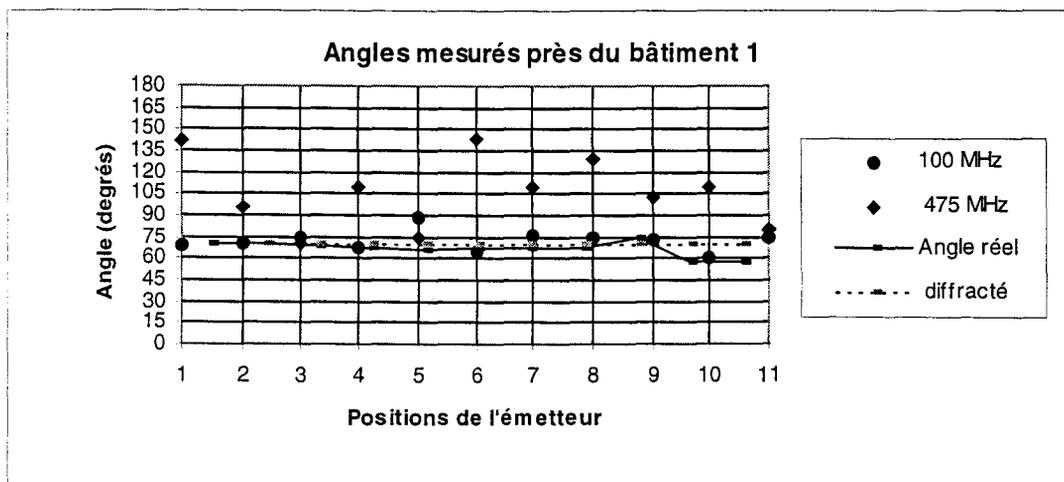


Figure 3.18.1 : Angles relevés aux positions 1 à 11 près du bâtiment 1.

Sur la figure 3.18.1, l'angle vrai existant entre l'émetteur et le récepteur est représenté en trait continu fort et l'angle correspondant aux rayons diffractés sur l'arête du mur est en pointillés.

A la fréquence de 100 MHz, lorsque l'émetteur est masqué, l'angle mesuré est celui en provenance de l'arête verticale du bâtiment (onde diffractée sur le bord du bâtiment). La valeur moyenne des mesures est de 72 degrés, angle proche à 2° près du faisceau diffracté. La butte de terre dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde à cette fréquence a peu d'influence sur les relevés angulaires. La contribution du signal doublement diffracté par le toit du bâtiment apparaît négligeable.

A la fréquence de 475 MHz, on note des écarts importants entre l'angle mesuré et l'angle diffracté. A cette fréquence, la contribution de l'onde réfléchi sur la butte de terre est non négligeable. L'angle mesuré provient d'une direction générale plus proche de celle induite par le signal réfléchi que de celle induite par l'onde diffractée. La valeur moyenne des angles mesurés est de 106 degrés, angle proche du rayon réfléchi sur la butte de terre. L'erreur est de 30° par rapport à l'angle vrai à cause du faisceau réfléchi. La contribution du signal doublement diffracté sur le toit du bâtiment est négligeable par rapport à celui réfléchi sur la butte de terre ou celui diffracté une fois sur l'arête verticale du mur du bâtiment 1.

4.3.2.2 Mesures en présence du bâtiment 2

L'émetteur et le récepteur sont maintenant rapprochés du bâtiment 2 (cf. figure 3.19).

Le bâtiment 2 a 6 m de haut et possède des faces latérales de dimensions 15m*18m. Il est bordé d'un grillage de 1 m 50 de haut sur une des faces et d'une rangée d'arbres espacés de quelques mètres et située à une trentaine de mètres d'un des murs du bâtiment 2.

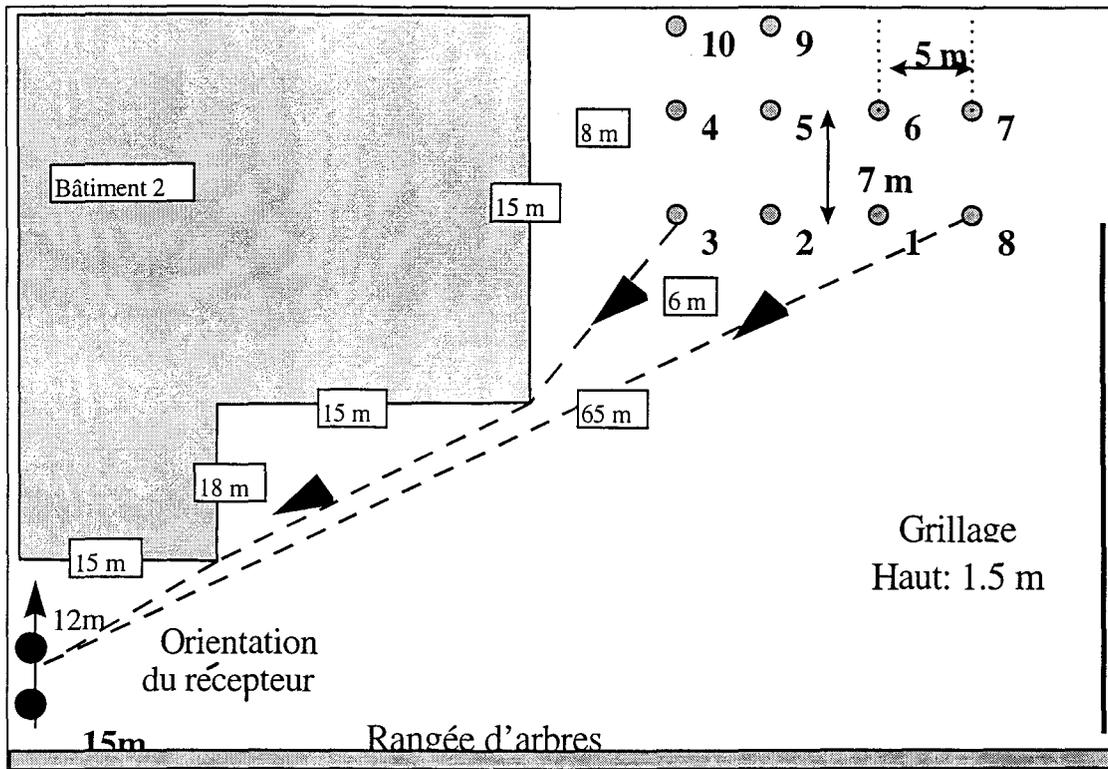


Figure 3.19 : Positions 1 à 10 de l'émetteur et du récepteur par rapport au bâtiment 2.

Les différents angles mesurés lorsque l'émetteur prend successivement les positions de 1 à 10 près du bâtiment 2, sont présentés figure 3.19.1.

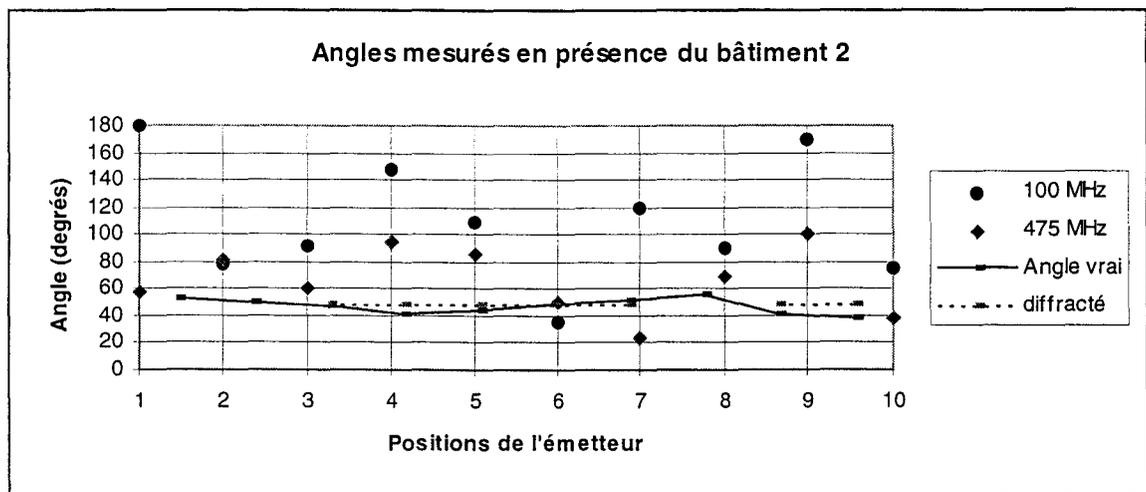


Figure 3.19.1 : Angles mesurés aux positions 1 à 10 du bâtiment 2.

Dans les deux gammes de fréquence 100 et 475 MHz, on note de nombreuses fluctuations dues à des réflexions multiples qui engendrent des erreurs importantes sur les relevés angulaires. Il existe un écart entre l'angle mesuré par le dispositif de réception et l'angle diffracté sur l'arête verticale du bâtiment à cause de la présence de nombreux arbres dans

l'environnement du récepteur. Le signal prépondérant vu du récepteur semble être, dans la plupart des cas, celui en provenance de la réflexion sur les arbres. Le signal doublement diffracté sur les arêtes verticales et horizontales du mur est de faible amplitude.

Ce cas de figure (émetteur masqué) est critique pour la localisation par radiogoniométrie car l'erreur angulaire commise peut alors être grande si l'écart entre l'angle du signal direct et l'angle du signal réfléchi est important. Toutefois, nous avons vu précédemment qu'il faut relativiser les résultats obtenus lorsque le récepteur se trouve à quelques dizaines de mètres de l'émetteur.

Ayant analysé, sur des cas de figures simples, le comportement des antennes développées, nous allons réaliser des mesures d'angle de gisement avec des sources de radiodiffusion existantes dans la bande FM (émetteurs radios conventionnels) ou dans la bande des 900 MHz (stations de base d'un réseau GSM) pour quelques positions du récepteur en milieu suburbain.

4.4 Mesures d'angle de gisement des émetteurs conventionnels

Dans cette partie, nous cherchons à évaluer les écarts angulaires entre l'angle réel que fait l'émetteur par rapport à une direction de référence et l'angle mesuré avec une des antennes développées.

Pour évaluer cet écart angulaire, il convient de disposer d'une base de données contenant le plan de fréquences et les positions géographiques des émetteurs conventionnels. De telles bases de données sont en général confidentielles. Néanmoins, la position de certaines stations de base GSM de l'agglomération Lilloise (Nord de la France), des stations de radiodiffusion FM et de quelques stations de TV locales nous ont été communiquées.

Avec la connaissance des coordonnées géographiques des émetteurs dont on veut mesurer l'angle de gisement et de la position géographique du lieu d'expérimentation, identifiable sur une carte de type IGN (Institut Géographique National), on peut calculer l'angle théorique de gisement de l'émetteur, du lieu d'expérimentation par rapport à une direction de référence, par exemple le Nord géographique.

Quelques expérimentations ont été effectuées en milieu suburbain de l'agglomération Lilloise. Une synthèse des principaux résultats obtenus est présentée dans le tableau 1. Dans ce tableau, sont reportés les angles de gisement théoriques et mesurés sur des émetteurs dans les bandes de 100 MHz et 900 MHz, ainsi que les écarts angulaires déduits de ces essais.

Des expérimentations effectuées, les signaux reçus étaient inexploitable pour une évaluation d'angles de gisement mesuré dans certains cas, et dans d'autres cas, les écarts angulaires étaient très importants. Nous n'avons présenté dans le tableau 1 que quelques valeurs d'angles mesurées qui sont intéressantes à analyser d'un point de vue fiabilité des relevés.

Bande FM	Théorique	Mesuré	Déviaton
106.6 MHz	115°	122°	7 degrés
95.3 MHz	335°	320°	15 degrés
92.5 MHz	9°	20°	11 degrés
96 MHz	9°	17°	8° degrés
94.3 MHz	15°	10°	5 degrés

Bande UHF	Théorique	Mesuré	Deviation
945.4 MHz	105°	98°	7 degrés
937.6 MHz	79°	68°	11 degrés
940 MHz	79°	101°	21 degrés
937.2 MHz	290°	298°	8 degrés
940.2 MHz	188°	195°	7 degrés

Tableau 1 : Angles mesurés en milieu suburbain avec les capteurs développés

On note qu'en milieu suburbain, les écarts angulaires varient entre 5 et 15 degrés voire plus. En moyenne, les erreurs angulaires sont voisines de 10 degrés dans les cas favorables. Ce résultat corrobore les conclusions de l'étude théorique présentée au paragraphe 2 de cette partie.

La plupart des stations de base GSM dans le bande UHF portent une, deux ou trois fréquences de diffusion (exemple 937.6 et 940 MHz du tableau 1) tandis que certains pylônes, situés géographiquement au même endroit, portent une, deux ou plusieurs fréquences différentes (exemple tiré du tableau précédent 92.5 MHz et 96 MHz). Ces cas de figures sont intéressants pour les mesures car les relevés à ces fréquences permettent d'avoir des éléments de comparaison pour l'évaluation de la précision des mesures.

Par exemple, dans le cas des mesures présentées dans le tableau 1, au lieu de mesurer des angles similaires sur les fréquences portées par un même pylône (92.5 MHz et 96 MHz, 937.6 MHz et 940 MHz), des angles de gisement différents ont été relevés. Dans ces conditions il est difficile d'extraire l'angle correspondant à l'angle vrai notamment lorsque l'angle théorique n'est pas connu. Pour pallier ce problème nous proposons la méthode de mesures ci-après présentée.

4.4.1 Une Solution proposée pour la validation des relevés d'angles de gisement

Le problème constaté précédemment est dû aux fluctuations rapides du signal reçu en milieu urbain et suburbain du fait de la propagation par trajets multiples. Si la mesure d'angle est faite en un seul point, il est possible qu'à cet endroit, le récepteur se trouve dans un " trou " de signal, ce qui ne serait pas le cas, quelques fractions de longueur d'onde autour de cette position initiale ou quelques MHz autour de la fréquence initiale.

La solution proposée consiste donc à réaliser [24] les mesures d'angle de gisement en scrutant plusieurs fréquences dans une bande de fréquences donnée pendant que le récepteur prend successivement différentes positions espacées de quelques mètres sur un même axe longitudinal. Sur cet axe, on devra mesurer théoriquement le même angle de gisement pour chaque fréquence d'un même émetteur. En effectuant les relevés en plusieurs points, on peut s'affranchir des éventuels trous de propagation et des trajets multiples. On peut ensuite extraire l'angle de gisement le plus probable sur chaque émetteur. Cette solution sera mise en œuvre dans plusieurs cas d'expérimentations en seconde partie de ce chapitre.

5. Conclusion de la première partie

La localisation des mobiles terrestres par radiogoniométrie s'effectue par la mesure d'angles de gisement des émetteurs. Ces mesures d'angles de gisement s'effectuent à l'aide de radiogoniomètres ou antennes qui présentent des diagrammes de rayonnement particuliers. Nous avons développé à cet effet des antennes radioélectriques qui permettent de couvrir quelques points dans chacune des sous bandes HF, VHF et UHF.

Trois antennes ont été calibrées et optimisées pour un fonctionnement autour des fréquences de 100 MHz, 475 MHz et 900 MHz. Dans la bande FM nous utilisons une antenne dite " cardioïde ", du fait de la forme de son diagramme de rayonnement. Dans les bandes de fréquences VHF et UHF nous utilisons des antennes à grand gain de type Yagi-Uda.

En vue d'étudier les influences possibles des phénomènes de trajets multiples ou de conditions différentes de propagation sur la précision des mesures angulaires dans les trois gammes de fréquences, plusieurs cas de figures simples ont été envisagés.

On constate qu'en l'absence de signal direct entre l'émetteur et le récepteur, les signaux réfléchis sur les arbres ou bâtiments sont prépondérants par rapport aux signaux diffractés sur les arêtes des bâtiments. Par conséquent, les écarts angulaires peuvent être grands et dépendent surtout de la disposition du récepteur par rapport à l'émetteur et à l'obstacle.

Les essais réalisés dans des configurations simples ont montré l'influence des trajets multiples. Ce qui explique la dispersion des résultats angulaires. Nous avons proposé une méthode de mesure qui consiste à faire la mesure de l'angle de gisement en continu sur un axe longitudinal et cela sur chacune des fréquences portées par l'émetteur considéré. Des mesures réalisées avec cette méthode sur les émetteurs conventionnels très éloignés du récepteur montrent que les écarts angulaires en milieu suburbain ne dépassent pas 10 degrés.

Les essais réalisés dans les trois bandes de fréquences centrées autour de 100 MHz, 475 MHz et 900 MHz ont montré que les performances obtenues en terme de mesure d'angle de gisement sont identiques dans les trois bandes de fréquence.

Il n'y a donc pas lieu d'exploiter simultanément les trois bandes de fréquences. Le choix d'une bande de fréquences sera imposée par la facilité de mise en œuvre et l'encombrement du dispositif de mesures.

Un autre critère important pour le choix de la bande de fréquence est la présence des émetteurs en nombre suffisant en milieu urbain et suburbain ainsi que la facilité avec laquelle leur position géographique est connue.

Compte tenu des contraintes évoquées, nous avons opté pour l'utilisation de la bande FM (88-108 MHz) étant données la disponibilité de ces sources d'émission en milieu urbain et la connaissance de leurs coordonnées géographiques. Cependant les antennes développées pour cette bande de fréquences sont très encombrantes pour la réalisation d'un dispositif de localisation. Nous leur avons donc préféré un radiogoniomètre Doppler du commerce. Dans la seconde partie de ce chapitre, nous présenterons les résultats obtenus avec ce dispositif dans la bande 88-108 MHz pour la mise en œuvre de la localisation des mobiles en milieu urbain et suburbain.

Seconde Partie: Validation de la méthode de mesures et mise en œuvre de la localisation des mobiles à l'aide d'un radiogoniomètre Doppler

1. Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, trois antennes fonctionnant autour de 100 MHz, 475 MHz et 900 MHz ont été développées. L'étude de fonctionnement des antennes dans chacune des trois bandes a permis de conclure qu'il n'était pas nécessaire d'effectuer les mesures d'angles de gisement dans toute la bande de fréquences allant de 100 à 1000 MHz. Un compromis à trouver entre l'encombrement des antennes utilisées, la facilité de calibrage du dispositif de réception et la présence de nombreuses sources d'émission en milieu urbain ou suburbain, dans la bande FM (88 - 108 MHz) a permis de choisir cette bande de fréquences pour la suite des mesures. Cependant, les antennes développées sont peu pratiques pour la réalisation d'une maquette ou lorsqu'il s'agit d'effectuer plusieurs relevés sur plusieurs émetteurs en un temps raisonnable.

Dans cette partie, nous envisageons l'utilisation d'un radiogoniomètre Doppler du commerce, standard grand public, présentant les mêmes performances que les antennes utilisées, pour le développement d'un prototype de localisation des mobiles.

Les caractéristiques mécaniques et physiques du radiogoniomètre seront présentées ainsi que son comportement dans des configurations typiques permettant d'évaluer ensuite ses performances sur des émetteurs conventionnels en milieu urbain et suburbain. Nous terminerons par quelques cas d'essais de localisation des mobiles à partir des relevés d'angles de gisement obtenus en milieu urbain ou suburbain.

2. Caractéristiques et performances du radiogoniomètre DOPPLER

2.1 Caractéristiques physiques et mécaniques

Le radiogoniomètre Doppler considéré qui sera intégré dans le dispositif final de localisation des mobiles par GSM et par radiogoniométrie est constitué :

- de quatre antennes monopoles quart d'onde disposées au dessus d'un plan de masse métallique,
- d'un circuit de commutation à diodes PIN qui permet de recueillir successivement à la fréquence de commutation les signaux reçus sur les brins d'antennes,
- d'un récepteur radio large bande (cf. Figure 4.1) qui permet de commander la fréquence désirée ainsi que les paramètres de mesures. En interrogeant le récepteur au travers d'une liaison série, on peut aussi récupérer les caractéristiques ou paramètres de mesures tels que le niveau de signal reçu, la fréquence de réception effective, le mode de réception (large bande WFM ou bande étroite NFM ou AM), l'état du "squelch" (seuil de déclenchement des mesures), ajout ou non de l'atténuateur programmable, etc...
- et d'un afficheur appelé "Doppler Syst" (cf. Figure 4.1) qui donne l'angle de gisement de l'émetteur mesuré. Cette valeur d'angle obtenue peut être aussi rapatriée sur un ordinateur de type PC au travers d'une liaison série RS 232. Les données du radiogoniomètre Doppler sont transmises à la vitesse de 300 Bauds. Les 5 caractères ASCII nécessaires à la mesure de l'angle de gisement de l'émetteur sont envoyés sur la liaison série RS232 du PC durant 235 ms environ et le rafraîchissement a lieu toutes les 533 ms à peu près.

2.1.1 Les données constructeurs du radiogoniomètre Doppler utilisé:

Le radiogoniomètre utilisé pour les expérimentations présente les caractéristiques suivantes:

- trois modes de réception: une réception large bande passante WFM (Wide FM), une réception bande étroite NFM (Narrow FM) et une réception faible bande AM. Dans chacun de ces modes de réception, la bande passante du filtre d'entrée de réception est:
 - en mode **WFM** de: **180 kHz à - 6 dB** 800 kHz à -50 dB,
 - en mode **NFM** ou **AM** de: **12 kHz à - 6 dB** et 15 kHz à -70 dB,
- la fréquence de commutation du circuit à diodes PIN est de **300 Hz**.
- la puissance reçue aux bornes des antennes ne devra pas dépasser **100 mW** soit **2 dBm**.
- le seuil de sensibilité:
 - en mode **NFM**, est de **0.35 µV** soit **-117 dBm**,
 - en mode **WFM** ou **AM**, il est de **1 µV** soit **-107 dBm**,



- les signaux reçus sont classés par ordre croissant de niveaux et représentés par les lettres A à P. Dans le paragraphe suivant, une tentative de mise en correspondance avec des niveaux de signaux en dBm est proposée.

A l'étage d'entrée du récepteur "scanner", une option d'ajout d'un **atténuateur** programmable de **10** ou **20 dB** peut être utilisée notamment lorsque la puissance du signal reçu est très importante.

- enfin, le constructeur garantit une **précision** de l'ordre de la **dizaine de degrés**.

Sur le schéma de la figure 4.1, nous présentons le banc développé pour les mesures d'angles de gisement des émetteurs à l'aide du radiogoniomètre Doppler.

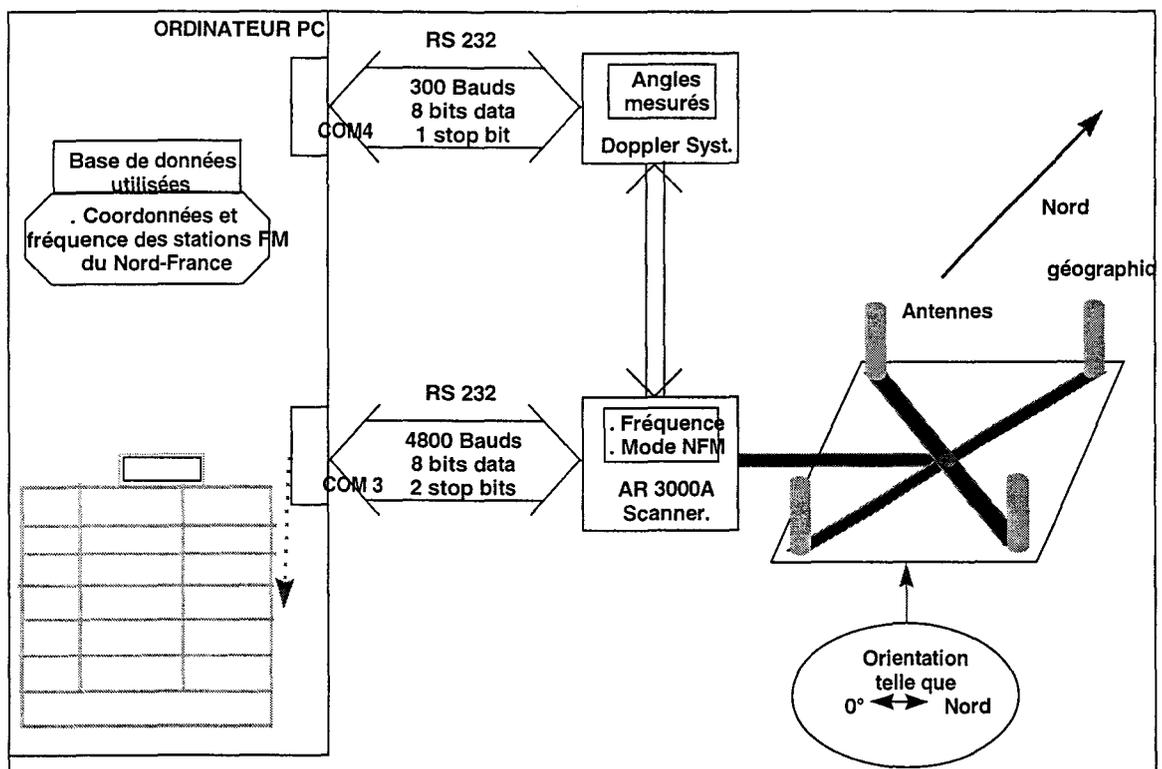


Figure 4.1 : Banc de mesures d'angle à l'aide d'un radiogoniomètre Doppler

Avant d'effectuer les mesures d'angle de gisement des émetteurs, il convient au préalable d'étalonner et de calibrer le radiogoniomètre Doppler, de caractériser ses performances intrinsèques et d'évaluer ses performances en présence de bâtiments et d'obstacles.

2.2 Caractérisation des paramètres du radiogoniomètre Doppler

Il s'agit de caractériser les paramètres du radiogoniomètre Doppler dans la bande de fréquences choisie allant de 88 à 108 MHz.

En effet, chacun des quatre monopoles fournis par le constructeur a une longueur de 83 cm et chacun des quatre câbles de connexion qui relie les antennes au circuit de commutation a une longueur de 1 m 75. La fréquence de commutation des antennes est de 300 Hz.

Les quatre antennes sont placées sur un plan de masse métallique suffisamment large pour que les effets de bords soient négligeables. L'écartement entre les antennes devra être compris entre le huitième et le quart de la longueur d'onde à la fréquence de travail. Pour que cette condition soit respectée dans toute la bande FM allant de 88 à 108 MHz, les antennes sont placées aux sommets d'un carré de 70 cm de côté.

Ces paramètres des antennes étant à présent précisés, nous allons caractériser les paramètres intrinsèques du radiogoniomètre Doppler.

2.2.1 Le circuit de commutation à diodes PIN

La fréquence de commutation sur les quatre antennes est égale à 300 Hz. Le dispositif a donc un temps de balayage de 3333 μ s environ pour recueillir successivement les signaux sur les quatre antennes. Ce temps correspond à la durée nécessaire pour effectuer un cycle complet, c'est à dire une mesure sur les quatre monopoles. Le temps moyen mis sur une antenne est défini encore comme le rapport cyclique. Il est donc en principe de 833 μ s dans ce cas.

Au cours de la commutation, lorsqu'une antenne est " sélectionnée ", le dispositif reçoit une puissance dite " maximale " et lorsqu'elle ne l'est pas, le dispositif reçoit une puissance dite " minimale " sur cette antenne. La différence entre ces deux puissances reçues (" maximale " et " minimale ") est appelée " profondeur de commutation ". Ce paramètre devra être identique aux bornes des quatre antennes du radiogoniomètre Doppler.

Dans le but de s'assurer que les conditions évoquées sont vérifiées, nous avons procédé à l'expérimentation suivante : un signal sinusoïdal de puissance - 20 dBm à la fréquence de 100 MHz est injecté successivement sur chacune des quatre voies A, B, C, et D des antennes ; à la sortie du circuit de commutation, on mesure la profondeur de modulation et le rapport cyclique lorsqu'une seule voie d'antenne est utilisée.

Dans le tableau 1, nous résumons les relevés correspondant à la profondeur de modulation et aux rapports cycliques obtenus à l'oscilloscope et à l'analyseur de spectre, sur chacune des quatre voies A, B, C, et D des antennes ainsi qu'à la sortie commune du commutateur.

Pe= -20 dBm	Puissance maximale	Puissance minimale	Profondeur de commutation	Rapport cyclique
Ref. Antenne	(dBm)	(dBm)	(dB)	(μ s)
A	-19,6	-55,6	36	865
D	-18,8	-56,0	37,2	900
C	-19,2	-54,4	35,2	937,5
B	-19,6	-48,8	29,2	930

Tableau 1 : Niveaux de signaux et temps cyclique du circuit de commutation du radiogoniomètre Doppler.

Dans le tableau 1, on note que les rapports cycliques ou encore les durées de commutation sur chaque antenne ne sont pas rigoureusement identiques. La durée de commutation mesurée à l'oscilloscope est de **865 μ s** sur la voie A, **930 μ s** sur la voie B, **937 μ s** sur la voie C et **900 μ s** sur la voie D. Ce qui veut dire que le balayage n'est pas continûment homogène.

De même, la profondeur de modulation n'est pas identique sur les quatre voies. Elle est, à la fréquence considérée, de **36 dB** sur la voie A, **29 dB** sur la B, **35 dB** sur la C et **37 dB** sur la voie D.

Rappelons que le radiogoniomètre Doppler utilisé est un équipement bas de gamme. Par conséquent, la précision intrinsèque est "moyenne".

2.2.2 Correspondance entre les niveaux de signaux affichés par le récepteur radio et la puissance reçue

Dans la plupart des cas, la précision des mesures d'angle de gisement à l'aide du radiogoniomètre Doppler est reliée à la puissance du signal reçu sur l'émetteur sur lequel la mesure est effectuée. En effet, le constructeur met en garde quant à une fluctuation importante des valeurs d'angles de gisement si la puissance reçue sur les antennes, lors des relevés, est soit trop faible, soit trop élevée.

Il s'agit dans ce paragraphe de tenter de mettre en correspondance les niveaux de signaux reçus par le récepteur radio représentés par les lettres A à P et la puissance reçue en unités dBm. Cette expérimentation permettra de déterminer, à partir du seuil de sensibilité du récepteur, la dynamique des mesures et la tranche de niveaux de signaux pour laquelle les mesures sont "correctes". Une telle expérimentation a pour avantage d'associer un degré de confiance élevé aux valeurs mesurées.

Les dispositifs d'émission et de réception étant placés à une quarantaine de mètres l'un de l'autre, en faisant varier la puissance émise de **-60 dBm à + 40 dBm** à la fréquence de 85 MHz, les angles obtenus et la puissance reçue sont mesurés. L'angle de gisement théorique est de **80°**. En partant d'un niveau de puissance relativement faible, on détermine dans quel intervalle de niveaux (A à P) du récepteur "scanner", les angles mesurés sont proches de **80°**.

Sur la figure 4.2 sont représentés les angles de gisement ainsi que les puissances émise et reçue en fonction des niveaux de signaux donnés par le récepteur "scanner" (niveaux représentés par les lettres A à P).

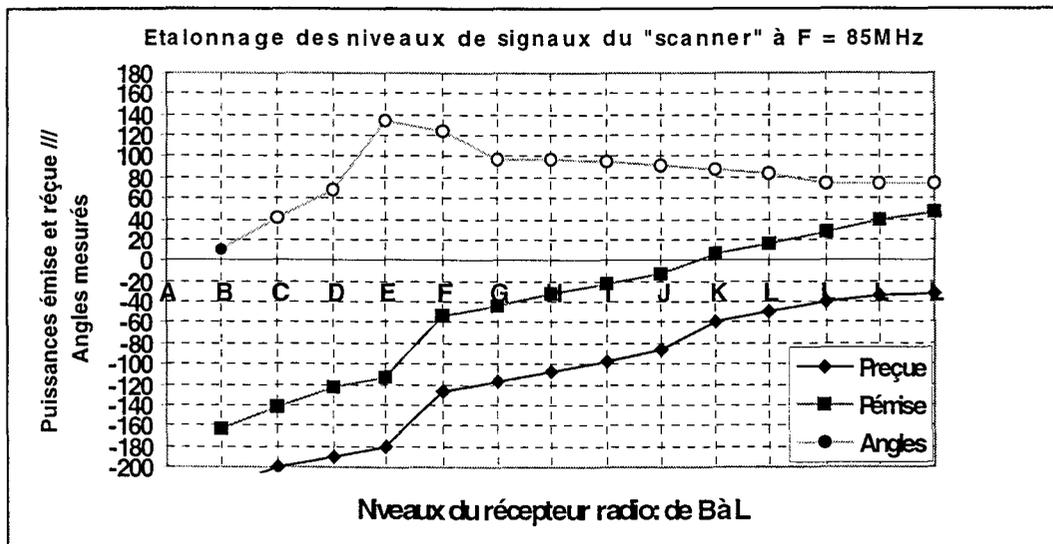


Figure 4.2 : Angle mesuré en fonction du niveau de signal du récepteur

Sur ces courbes, nous notons d'une part qu'il n'y a pas de correspondances stables entre les niveaux de signaux du récepteur " scanner " et les puissances reçues en unités dBm.

D'autre part qu'en dessous du niveau G du récepteur "scanner", les valeurs d'angle mesurées fluctuent beaucoup et qu'au-dessus de G, les valeurs d'angle sont beaucoup plus stables et sont proches de 80°. En effet, selon la courbe figure 4.2, les angles de gisement mesurés commencent à être constants à partir du moment où le niveau de signal du "scanner" est au moins égal à "G". De même, au-dessus de la valeur "L", les valeurs d'angles obtenues sont instables. Lorsque le niveau du signal atteint les valeurs de M et au dessus, un atténuateur programmable de 10 ou 20 dB selon le cas, a été introduit sur l'étage de réception du " scanner " de manière à le ramener à la valeur "L" afin que la mesure soit considérée "correcte". La condition nécessaire pour que les mesures d'angle de gisement soient considérées "correctes" et donc validées si le niveau de signal fourni par le récepteur "scanner" se situe entre les niveaux "G" et "L".

Précisons que les deux modes de réception recommandés par le constructeur pour les mesures d'angle de gisement sont NFM et AM. Nous constatons que pour les relevés effectués en mode NFM pour lequel le seuil de sensibilité est de -117 dBm, la dynamique des mesures est de 65 dB, et en mode AM, il n'est que de 55 dB car le seuil de sensibilité est de -107 dBm.

2.3 Caractérisation du fonctionnement du radiogoniomètre Doppler

2.3.1 Influence de la taille du plan de masse

Dans ce paragraphe, nous présenterons d'abord le calibrage du radiogoniomètre Doppler qu'il convient de faire avant toute mesure. Ensuite, nous évaluerons ses performances en fonction de la fréquence d'émission et de l'indice de modulation en émission (signal BF et excursion).

Le calibrage du dispositif de réception s'effectue sur un émetteur conventionnel de position géographique connue ou sur un émetteur, en visibilité directe du récepteur, placé à un endroit suffisamment éloigné des bâtiments et obstacles. Pour faciliter la lecture ou l'interprétation des relevés d'angle de gisement par rapport au Nord géographique, le récepteur peut être orienté de façon à ce que le zéro degré mesuré coïncide avec le Nord géographique; on a de cette manière un axe de référence pour les mesures en ce point. L'évaluation de l'erreur consiste à comparer l'angle théorique et l'angle mesuré lorsque le récepteur subit une rotation autour de son axe de révolution dans le plan azimutal de 0 à 360°.

Les expérimentations ont été effectuées avec le camion laboratoire sur le toit duquel sont installées des antennes quart d'onde disposées sur une tôle en aluminium de dimensions 1m*1m30 reliée à la structure métallique du camion.

Une autre série d'expérimentations a été réalisée lorsque les antennes précédentes sont disposées sur une plaque en aluminium de dimensions 2m*2m placée à 1m50 au-dessus du sol sur un chariot muni de roues.

Dans les deux cas, les mesures d'angle de gisement s'effectuent en mode de réception NFM ou AM comme l'a recommandé le constructeur.

Sur les schémas des figures 4.3 et 4.4, sont présentés des exemples de relevés d'angle de gisement obtenus sur des émetteurs existants aux fréquences de 88,2 93,3 et 105,2 MHz en

fonction de la position, dans les deux configurations. Sur ces courbes, l'angle théorique est représenté par une droite en trait plein. Les angles mesurés sont représentés par des points ronds.

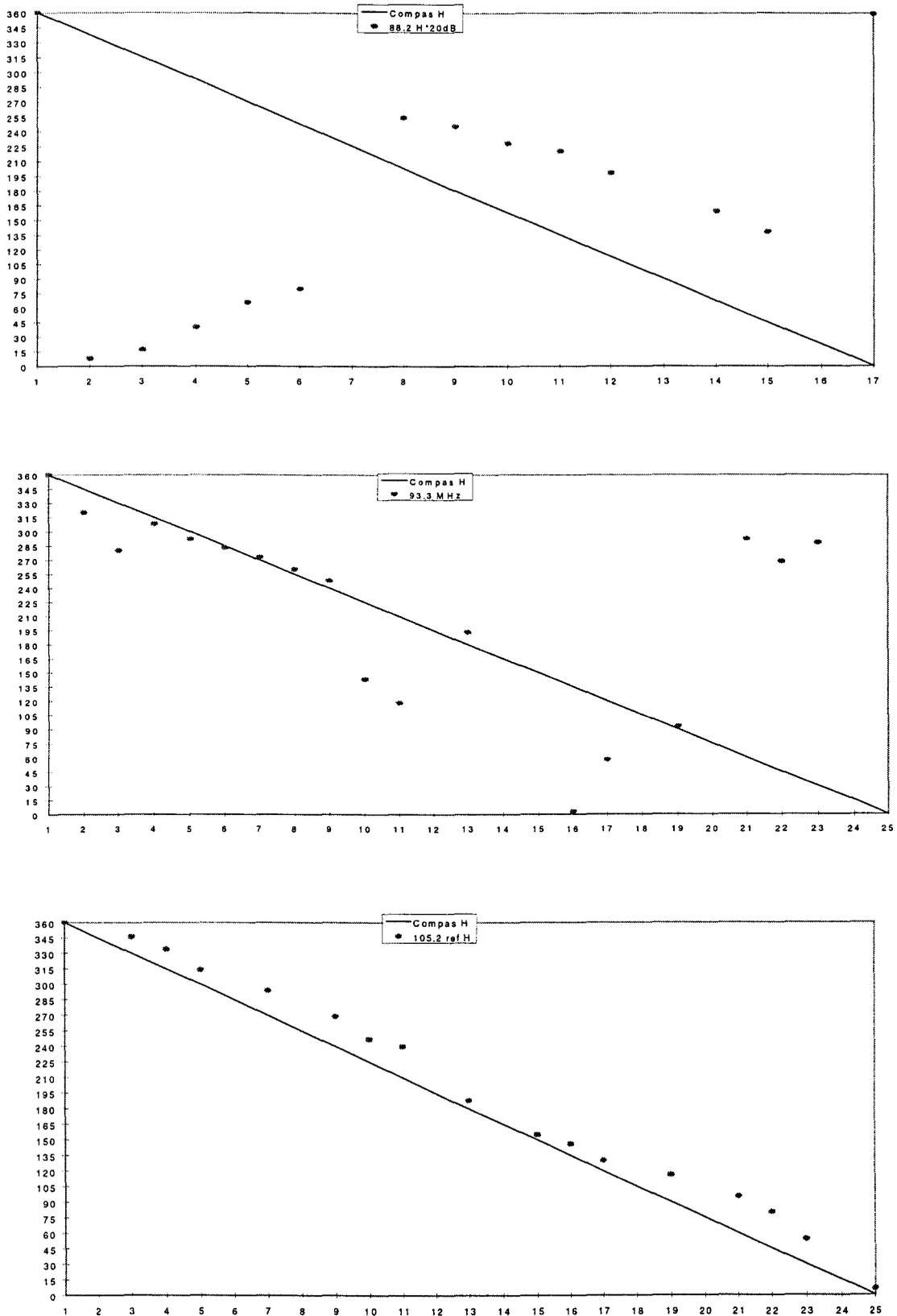


Figure 4.3 : Antennes sur la tôle métallique du toit du Camion Laboratoire.

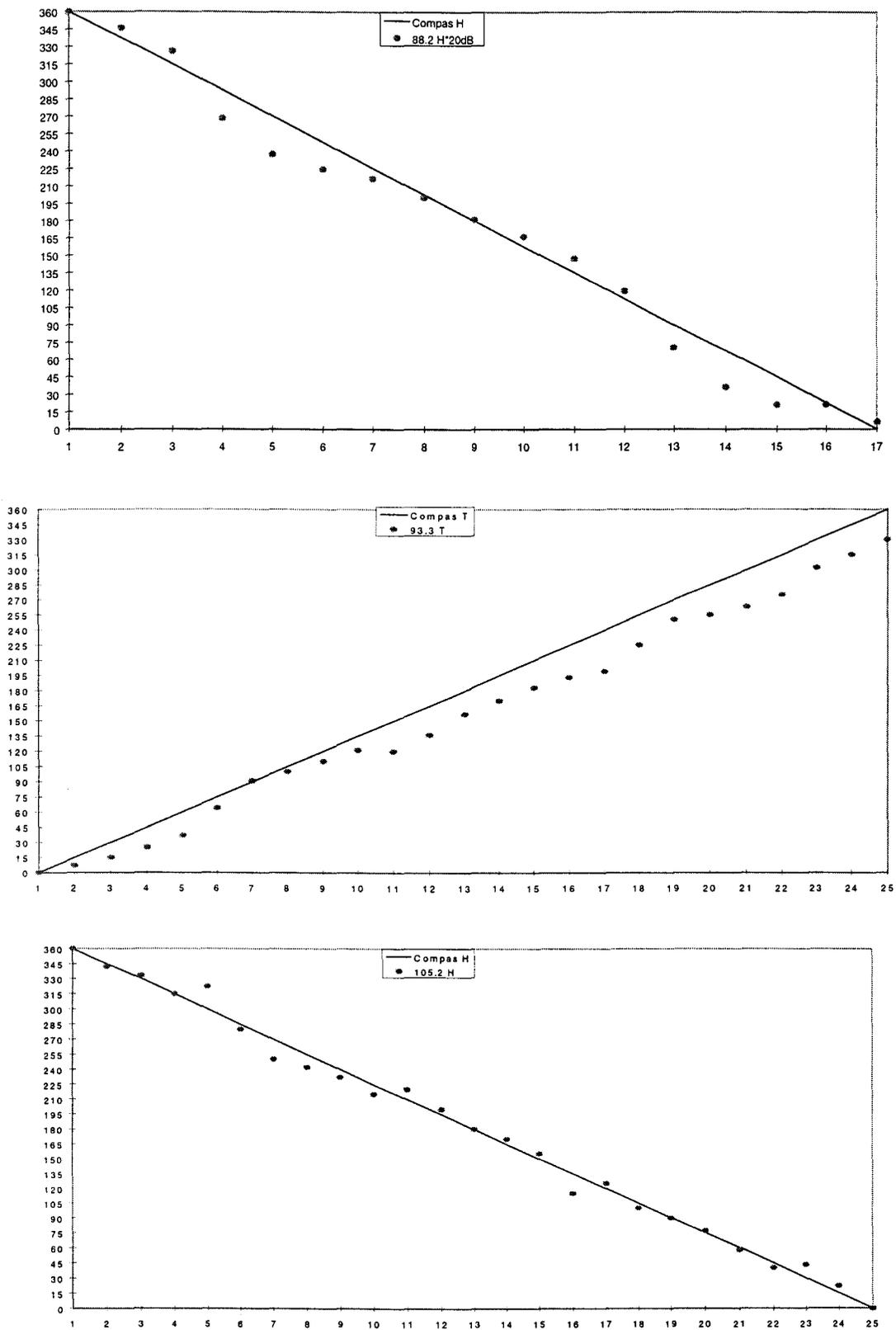


Figure 4.4 : Antennes sur un plan de masse métallique de 2m sur 2m.

Sur la figure 4.3, lorsque les antennes sont placées sur le toit du camion laboratoire, hormis à la fréquence de 105,2 MHz pour laquelle les angles théoriques et mesurés semblent correspondre, aux autres fréquences, il y a une grande disparité entre les angles mesurés et les angles théoriques. Ceci est dû notamment au fait que le plan de masse du camion n'est pas suffisamment large pour que les mesures puissent être effectuées dans les conditions optimales dans toute la bande de fréquences allant de 88 à 108 MHz.

Sur la figure 4.4, nous notons que l'évolution de l'angle mesuré, lorsque les antennes sont placées sur la plaque métallique de 2m*2m, suit bien l'évolution théorique même si quelques erreurs de mesures dues à l'imprécision des relevés du système subsistent.

2.3.2 Comportement en fonction des caractéristiques du signal modulant

Nous allons maintenant présenter les performances du radiogoniomètre en fonction de la fréquence du signal modulant et de l'excursion de la modulation pour des variations allant de 20 à 75 kHz de la fréquence porteuse située autour de 100 MHz.

Le récepteur est placé à une trentaine de mètres de l'émetteur. La fréquence porteuse de l'émetteur prend plusieurs valeurs autour de 100 MHz. L'angle de gisement est mesuré dans les trois cas suivants: il n'y a pas de modulation, la fréquence du signal modulant est égale à 400 Hz puis à 1 kHz.

Sur la figure 4.5, sont représentés les angles de gisement mesurés dans chacun des trois cas en fonction de la fréquence pour des excursions de modulation de 20 et 75 kHz. Le trait plein continu représente l'angle de gisement obtenu lorsque le signal émis est une sinusoïde pure, les marques " en carré " représentent les angles mesurés lorsque le signal émis est modulé par un signal Basse Fréquence de 400 Hz et les marques " en triangle " représentent les angles mesurés lorsque le signal émis est modulé par un signal Basse Fréquence (BF) de 1 kHz.

Sur la figure 4.6, sont représentés les angles de gisement mesurés en fonction de l'excursion de la modulation aux fréquences de 85 et 110 MHz. La légende est la même que celle de la figure 4.5 précédente.

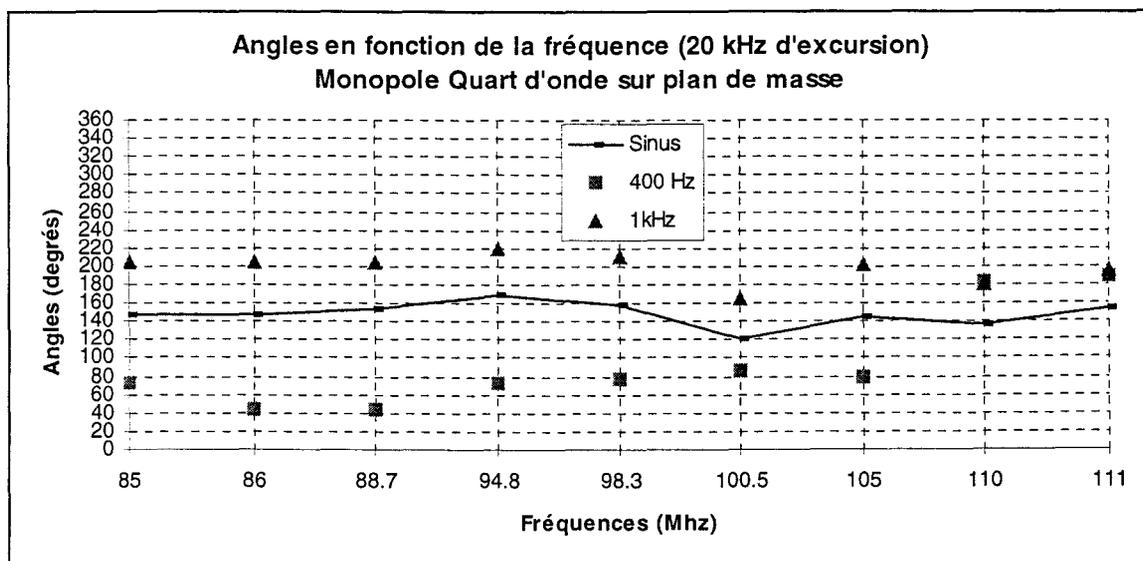


Figure 4.5-a: Angle en fonction de la fréquence pour une excursion de 20 kHz.

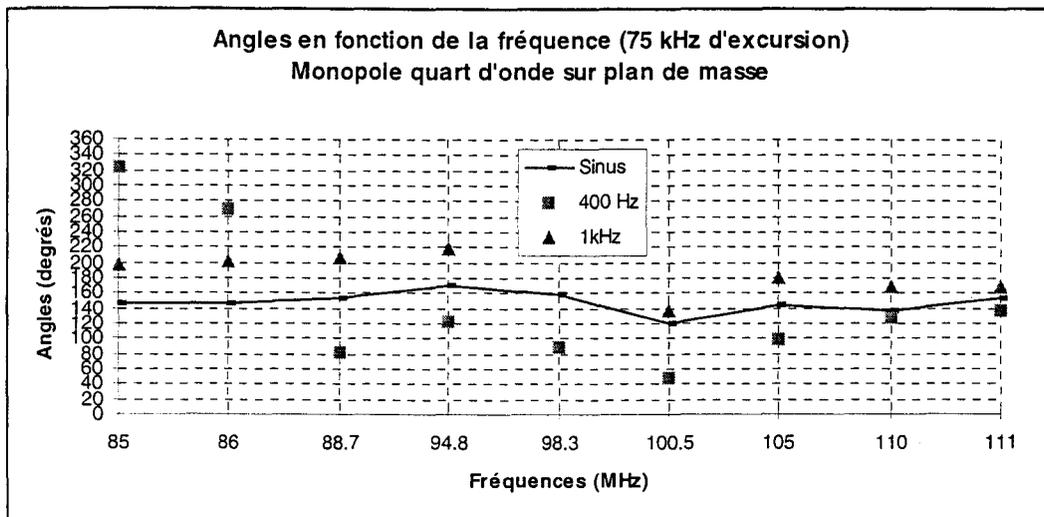


Figure 4.5-b: Angle en fonction de la fréquence pour une excursion de 75 kHz.

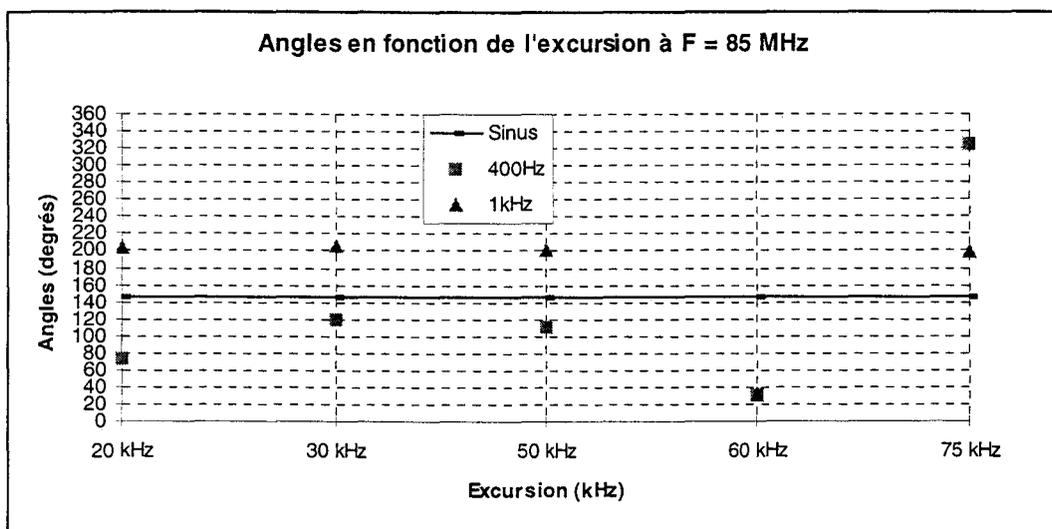


Figure 4.6-a : Angle en fonction de l'excursion de modulation à la fréquence de 85 MHz.

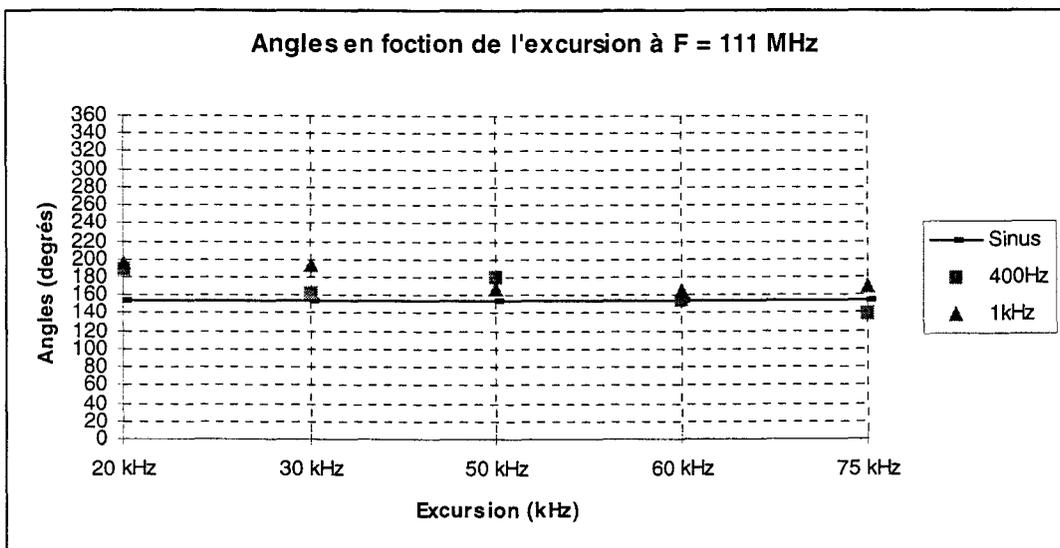


Figure 4.6-b : Angle en fonction de l'excursion de modulation à la fréquence de 111 MHz.

Sur la courbe de la figure 4.5, on note un décalage de l'angle de gisement de l'émetteur en fonction de la fréquence du signal modulant.

Sur la figure 4.6, on note que l'angle de gisement mesuré varie très peu en fonction de l'excursion choisie.

Le décalage est voisin de 40° à la fréquence de 85 MHz lorsque le signal modulant BF est de 400 Hz et il est entre 20° et 60° lorsque la BF est de 1 kHz.

Le décalage est entre 10° et 20° à la fréquence de 111 MHz pour des signaux modulants BF de 400 Hz et 1 kHz.

Il n'y a pas de décalage constant en fonction de la fréquence de la porteuse ou de la fréquence du signal modulant. Néanmoins, dans une configuration de modulation donnée, l'erreur commise sur les angles mesurés reste de l'ordre de grandeur de la précision du radiogoniomètre Doppler soit 10° .

Le comportement du radiogoniomètre Doppler étant à présent caractérisé, nous allons effectuer les mesures d'angles de gisement sur des émetteurs conventionnels.

3. Expérimentations en milieu urbain ou suburbain

Dans une première approche, les mesures en espace dégagé seront effectuées sur des émetteurs placés à quelques dizaines ou centaines de mètres du récepteur afin d'évaluer les performances intrinsèques du radiogoniomètre. Puis les émetteurs vont être placés près d'un bâtiment. Enfin des relevés seront effectués sur des émetteurs conventionnels existants en milieu urbain ou suburbain.

3.1 Performances du radiogoniomètre Doppler en présence ou non d'obstacles

3.1.1 Mesures en espace dégagé

Deux types de mesures en espace dégagé de tout obstacle seront effectuées. Pour le premier, les mesures s'effectuent de manière continue à angle de gisement constant sur une distance de quelques dizaines de mètres avec des acquisitions tous les 10 cm (à l'aide d'une roue codeuse qui envoie des impulsions qui permettent de cadencer les mesures). Pour le second, les mesures sont réalisées sur une distance beaucoup plus grande sur un aérodrome désaffecté (quelques centaines de mètres).

Sur les schémas des figures 4.7 et 4.8 sont représentés respectivement les angles mesurés à l'aide d'un radiogoniomètre Doppler aux fréquences de 98 et 100 MHz. Le récepteur se déplace de 35 à 65 mètres de l'émetteur. L'angle à mesurer est constant et le signal est émis avec une puissance de 30dBm.

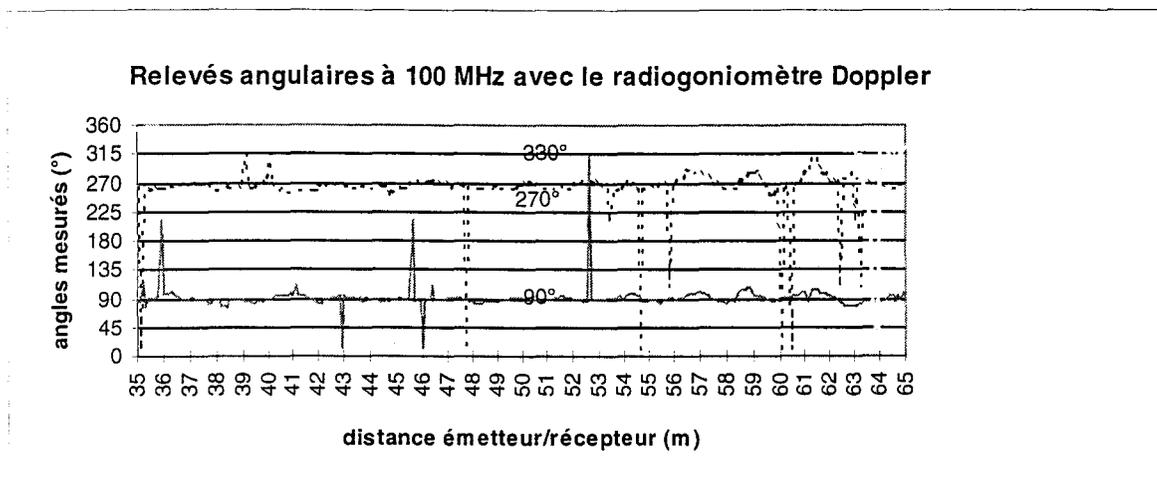


Figure 4.7 : Mesure en espace dégagé sur quelques dizaines de mètres

A la fréquence de 100 MHz, nous avons volontairement orienté le radiogoniomètre pour que les angles vrais soient successivement de 90°, 270° et 330 degrés.

Les valeurs d'angle de gisement mesurées fluctuent légèrement autour de la valeur vraie. Il convient de supprimer ces défauts de mesures pour obtenir l'angle de gisement de l'émetteur avec une plus grande précision. Les valeurs moyennes obtenues après filtrage et traitement des signaux sont respectivement de 90, 270 et 335 degrés par rapport à la direction de référence. Les erreurs obtenues varient autour de 5 degrés.

La campagne de mesures a été poursuivie en considérant cette fois un enregistrement continu sur quelques centaines de mètres.

Les expérimentations ont été réalisées sur une piste désaffectée d'un aérodrome. Le dispositif de réception Doppler est placé sur le toit du camion laboratoire. Le toit joue le rôle de plan de masse et est situé à 2 m 50 environ au-dessus du sol. Il se déplace suivant l'axe émetteur/récepteur sur une distance d'un kilomètre. La puissance du signal émis est de 30 dBm à la fréquence de 88 MHz. La vitesse de déplacement du camion est de 3 km/h environ (ce qui correspond à une acquisition tous les 80 centimètres environ).

Le dispositif de réception est orienté de façon à ce que les angles de gisement par rapport au Nord géographique soient invariables et prennent successivement les valeurs 160°, 220° et 340°.

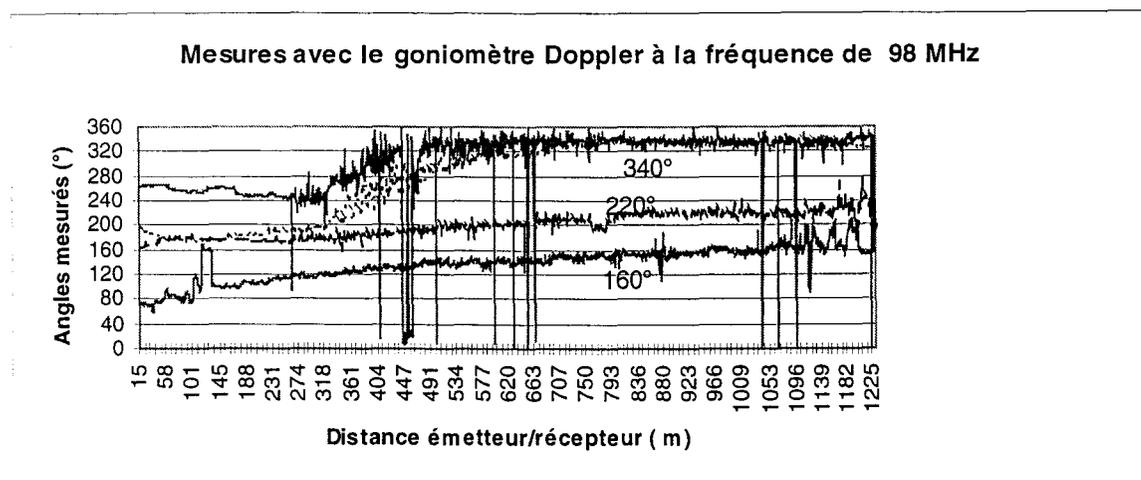


Figure 4.8 : Angles mesurés à 98 MHz en espace dégagé sur 1km200.

A partir de 500 mètres environ, l'angle mesuré est quasiment constant sur toute la distance même si quelques pics d'erreur apparaissent à certains endroits. Après filtrage et traitement statistique des données, l'erreur mesurée est de 8 degrés. Les écarts angulaires obtenus par rapport à l'angle théorique varient de 0 à 10 degrés. Les précisions de mesures sont du même ordre de grandeur (moins de 10 degrés).

3.1.2 Mesures près d'un bâtiment en vue directe de l'émetteur

Dans cette partie, on cherche à évaluer les effets de la réflexion du signal sur la mesure angulaire.

La configuration des mesures est présentée figure 4.9. Les expérimentations ont été effectuées près d'un bâtiment en briques nommé bâtiment 6, d'une dizaine de mètres de hauteur. Les dispositifs d'émission et de réception sont situés à 4 mètres environ du sol. La puissance du signal émis est de 30 dBm à la fréquence de 100 MHz et le récepteur se déplace de 20 à 40 mètres de l'émetteur.

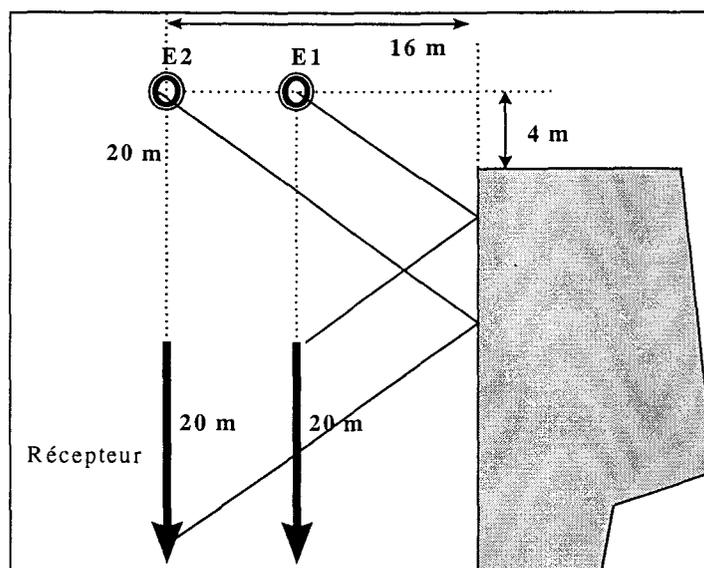


Figure 4.9 : Dispositions géométriques de l'émetteur et du récepteur près du bâtiment 6.

Deux cas ont été envisagés à la fréquence de 100 MHz : l'un pour lequel l'émetteur et le récepteur sont situés à 8 mètres du mur et l'autre pour lequel l'émetteur et le récepteur sont situés à 16 mètres du mur du bâtiment 6. Le dispositif de réception est placé à un mètre au-dessus du sol et est orienté de telle sorte que les angles théoriques soient successivement de 0°, 135° et 315°. L'acquisition de l'angle mesuré est effectuée de manière continue. Les résultats obtenus dans chacun des deux cas sont présentés sur les figures 4.9.1 et 4.9.2.

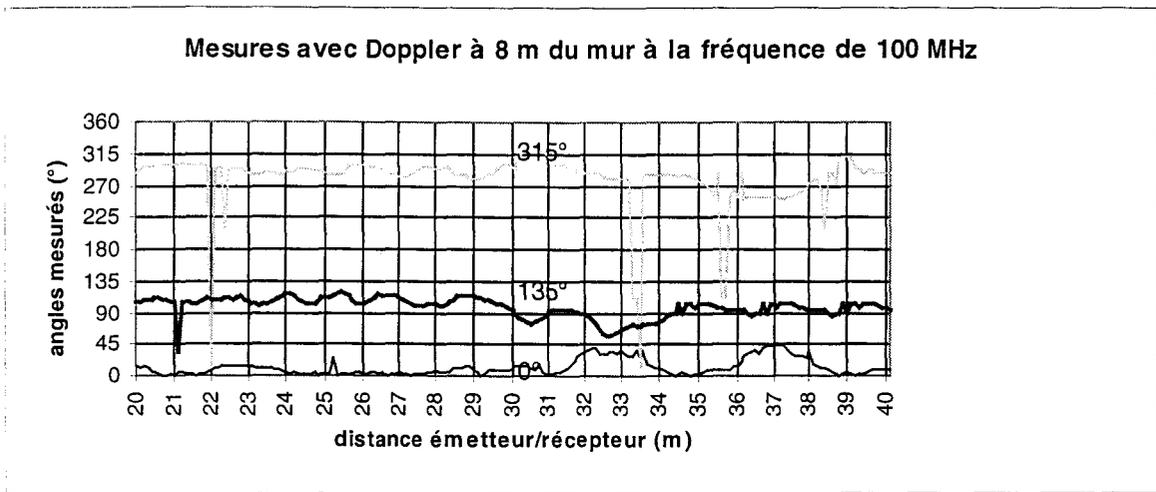


Figure 4.9.1 : Angles mesurés à 8 m du mur du bâtiment 6.

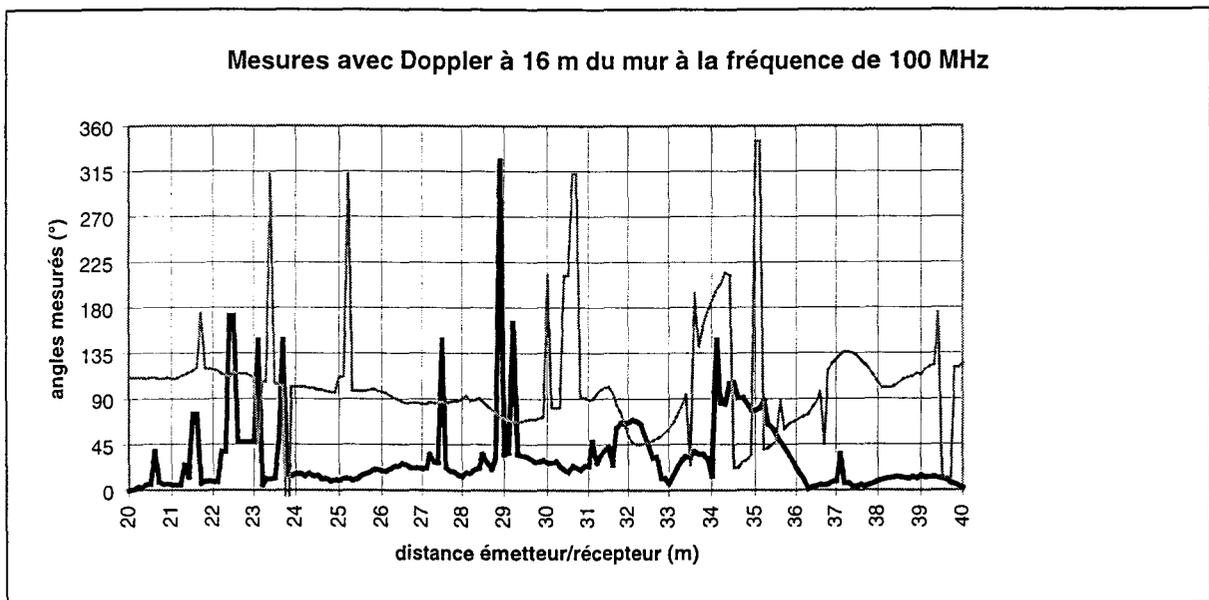


Figure 4.9.2 : Angles mesurés à 16 m du mur du bâtiment 6.

Les mesures fluctuent autour des valeurs moyennes voisines des valeurs théoriques. Après filtrage et traitement des données, ces angles sont évalués respectivement à 15°, 110° et 300° avec des écarts types avoisinant 8 degrés. Les erreurs angulaires obtenues varient donc entre 15 et 25 degrés. Malgré la prédominance du signal direct, la présence du bâtiment qui engendre des signaux réfléchis est à l'origine de l'écart observé entre la moyenne obtenue et l'angle théorique. La réflexion sur le mur, en présence du signal direct, n'est pas tout à fait négligeable.

Sur la figure 4.9.2, nous notons l'apparition plus fréquente des pics ou fluctuations rapides d'angles mesurés car l'angle d'arrivée du signal réfléchi sur le mur est plus important lorsque les deux dispositifs sont plus éloignés du mur. Le calcul de la valeur moyenne après suppression des défauts ou pics ne donne pas des résultats satisfaisants. Il faut donc faire appel à d'autres méthodes de traitement des données.

Plusieurs méthodes de traitement des données, en vue d'extraire l'angle mesuré, existent. Dans l'annexe III-2, nous présentons quelques-unes d'entre elles. Il s'agit de la méthode morphologique, de la méthode de la moyenne glissante et du traitement statistique des données. Cette dernière méthode consiste à subdiviser les angles de 0 à 360° en classes. A partir des mesures obtenues, on cherche la classe dont l'effectif est le plus grand. L'angle de gisement ainsi trouvé est proche de la classe la plus représentée.

En appliquant l'une des trois méthodes de mesures présentées, notamment la moyenne glissante, les écarts angulaires obtenus sont du même ordre de grandeur que dans les cas précédents soit moins de 10 degrés.

Les premières expérimentations, en espace dégagé ou en présence d'un bâtiment et du signal direct permettent de dire que le radiogoniomètre Doppler et les antennes développées donnent des performances similaires à savoir : l'erreur maximale commise sur les mesures d'angle de gisement est de 5 à 10 degrés lorsque l'émetteur et le récepteur sont en visibilité directe au voisinage ou non de bâtiments et d'obstacles de toute sorte. Cet écart angulaire peut atteindre 15 degrés voire 25 degrés ou plus dans le cas de trajets multiples.

Les relevés angulaires vont être à présent effectués sur les sources d'émission radioélectriques existantes en milieu urbain ou suburbain.

3.2 Mesures d'angles de gisement des émetteurs conventionnels en milieu suburbain

Il est à noter que le radiogoniomètre ne fournit pas toujours une valeur d'angle de gisement fixe et stable en un point de mesures donné. Compte tenu de la précision intrinsèque qui est de l'ordre d'une dizaine de degrés, les valeurs mesurées fluctuent autour de la valeur moyenne théorique et de ce fait, des écarts angulaires importants sont parfois obtenus.

C'est pour cette raison, qu'avant de valider un angle de gisement en un point donné, il convient d'effectuer plusieurs enregistrements des valeurs d'angle de gisement durant un certain temps fixé par l'algorithme. De ces valeurs ainsi enregistrées, plusieurs calculs statistiques peuvent être effectués afin d'extraire l'angle de gisement de l'émetteur. L'une des façons de procéder consiste à regrouper les angles mesurés en classes d'angles de 0 à 360° (la subdivision en classes dépend de la précision désirée). Puis à déterminer les effectifs de chaque classe pour enfin extraire la classe la plus représentée ou encore le mode de la série. Une autre méthode consiste à rechercher l'angle le plus souvent obtenu ou aussi la valeur médiane c'est à dire la valeur d'angle de gisement qui partage les angles mesurés en deux parties "égales" (50% des valeurs de part et d'autre de la médiane). Il n'est pas inutile de calculer l'écart type moyen des valeurs pour rendre compte du degré de dispersion des données.

3.2.1 Quelques exemples de mesures effectuées en milieu urbain et suburbain en un point

Un exemple d'enregistrement effectué en un point en milieu urbain sur les fréquences 89,7 et 99,4 MHz, portées par un même émetteur, est présenté par l'histogramme de la figure 4.10. Les données relevées sur chaque fréquence sont réparties en classes de 10 degrés et les effectifs ou nombres de valeurs obtenues dans chaque classe sont évaluées.

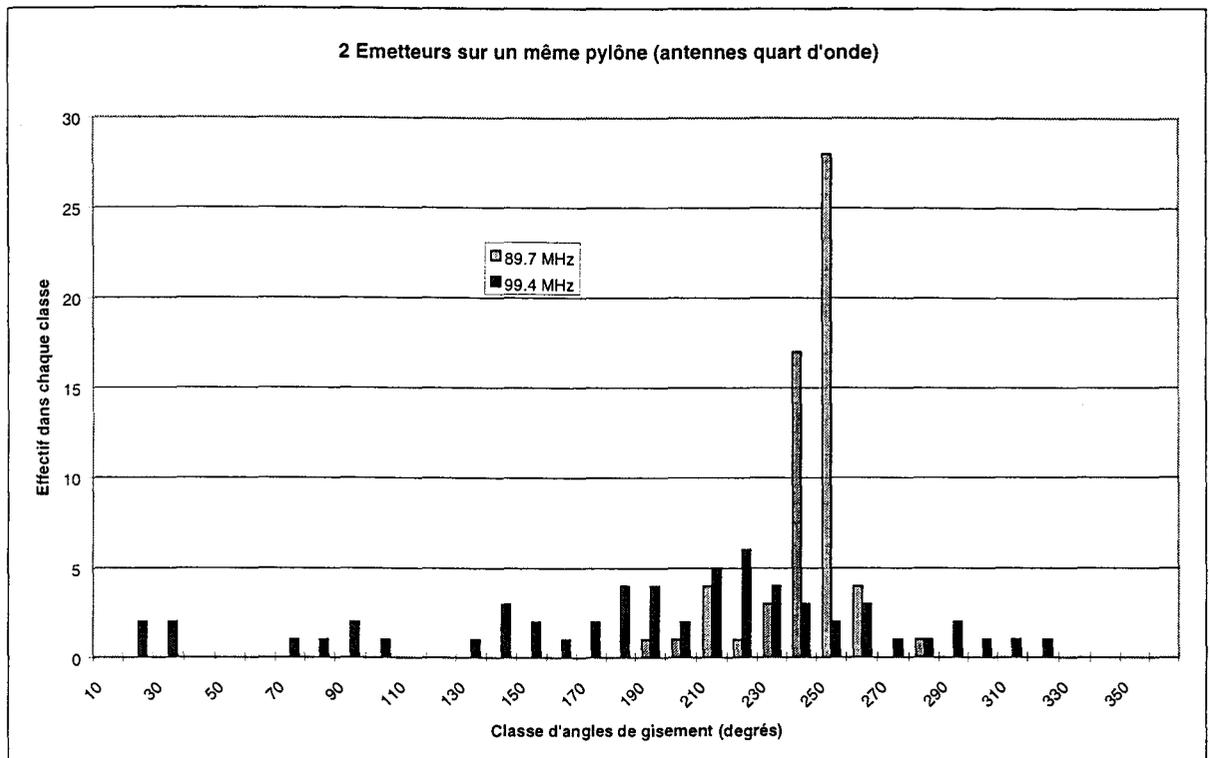


Figure 4.10 : Répartition des angles de gisement pour un même émetteur portant deux fréquences : 89,7 MHz et 99,4 MHz.

Le mode ou classe d'angle la plus représentée est 250° à la fréquence de 89,7 MHz. Avec un effectif de 28 il est très dominant par rapport aux autres classes notamment la seconde qui est à 240° avec un effectif de 17, d'où un écart de 10°.

Le mode est de 230° à la fréquence de 99,4 MHz. Avec un effectif de 6, ce mode n'est pas très dominant par rapport aux autres classes notamment la seconde, avec un effectif de 5 et les deux suivantes, d'effectif de 4 chacune.

La médiane des valeurs obtenues à la fréquence de 89,7 MHz est de 241°. Elle est de 205° à la fréquence de 99,4 MHz pour laquelle les valeurs d'angles sont beaucoup plus dispersées qu'à 89,7 MHz. L'écart type moyen des valeurs mesurées à 89,7 MHz est de 15 degrés alors que celui des valeurs mesurées à 99,4 MHz est de 72 degrés.

Deux autres expérimentations effectuées en milieu suburbain sur des émetteurs portés par un même pylône sont présentées figures 4.11 et 4.12. Dans le second cas les enregistrements ont été effectués suivant la même direction mais en sens inverse. C'est pour cela que nous avons précisé que les émetteurs sont opposés (en réalité, les mesures à relever devront être opposées de 180 degrés).

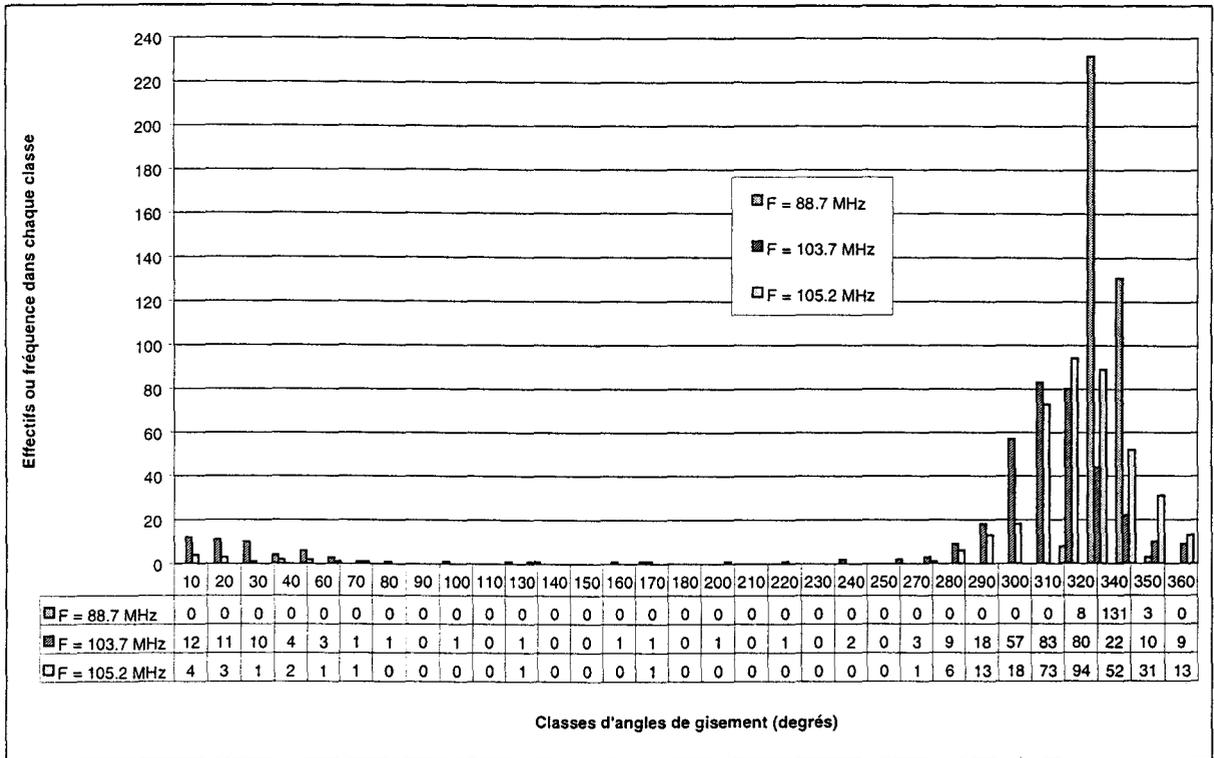


Figure 4.11 : Mesures en milieu suburbain sur les émetteurs 88,7, 103,7 et 105,2 MHz

Le mode le plus représenté est beaucoup plus dominant à la fréquence de 88,7 MHz qu’aux fréquences de 103,7 et 105,2 MHz. L’angle mesuré d’après ce traitement est de 340° à 88,7 MHz. Il est situé de 310 à la fréquence de 103,7 MHz. Il est de 320° à 105,2 MHz. Les écarts angulaires sont relativement faibles et varient autour de 20 degrés.

Les médianes aux fréquences de 88,7, 103,7, et 105,2 MHz sont respectivement de 329°, 307° et 319°. Ces valeurs sont assez proches des modes.

Les valeurs d’angle de gisement fluctuent autour de la valeur moyenne et leur répartition en classe est peu dispersée. L’écart type moyen des valeurs obtenues à la fréquence de 88,7 MHz est de 5°. Il est de 28° à la fréquence de 105,2 MHz et de 56° à la fréquence de 103,7 MHz.

Sur la figure 4.12, nous avons représenté l’effectif des données obtenues aux fréquences de 88,7 et 105,2 MHz en milieu urbain. Le récepteur se déplace successivement dans les deux sens d’un grand boulevard en milieu urbain dense de l’agglomération lilloise.

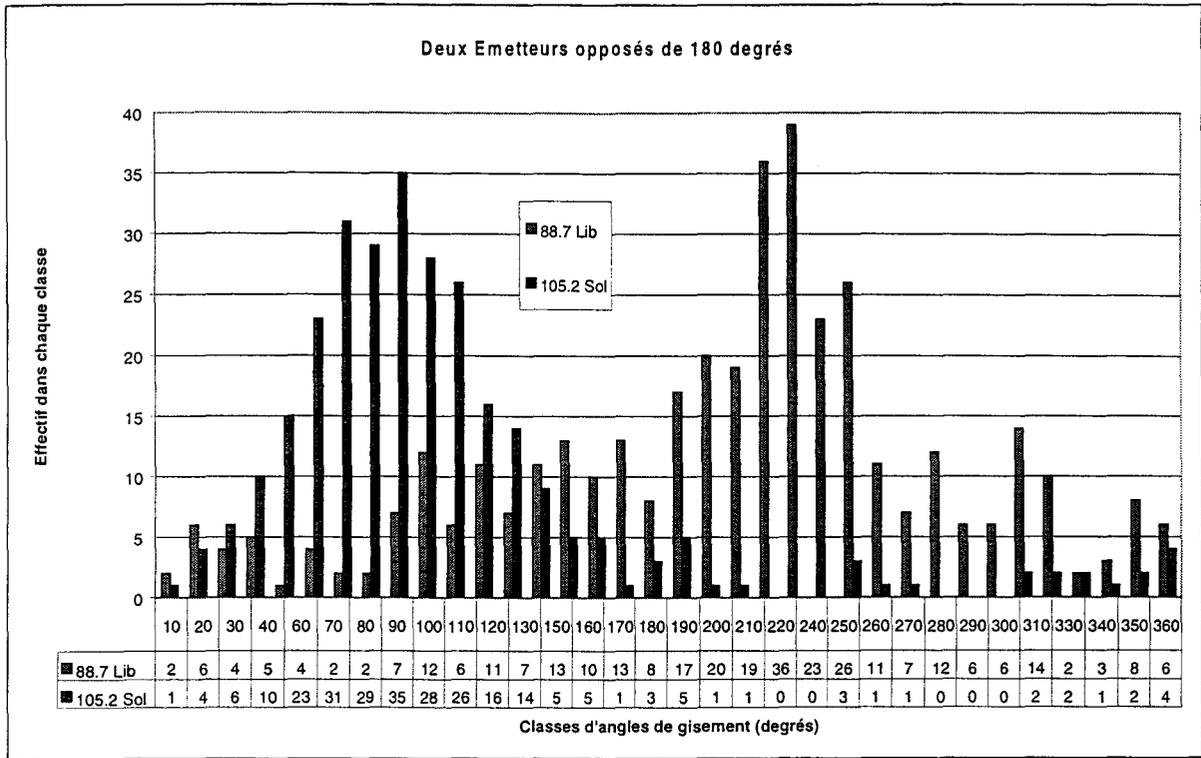


Figure 4.12 : Mesures en milieu urbain dense sur les fréquences 88,7 et 105,2 MHz

L'écart type moyen obtenu est de 76° à la fréquence de 88,7 MHz et de 65° à la fréquence de 105,2 MHz. Nous notons que la dispersion des valeurs mesurées est plus grande en milieu urbain qu'en milieu suburbain à cause des phénomènes de trajets multiples. Les modes dominants sont respectivement de 220° à 88,7 MHz et 90° à 105,2 MHz, soit un décalage ou écart angulaire de 50° entre ces deux valeurs.

La médiane des valeurs mesurées à la fréquence de 88,7 MHz est de 213° et celle obtenue à la fréquence de 105,2 MHz est de 87°. Ces valeurs sont assez proches des modes, malgré la valeur importante des écarts types moyens calculés.

Trois autres expérimentations représentatives, effectuées en milieu suburbain sont présentées figures 4.13, 4.14 et 4.15.

Dans chacun des cas de figure, nous avons regroupé les fréquences ou émetteurs dont les angles théoriques sont identiques car les émetteurs sont situés géographiquement au même endroit.

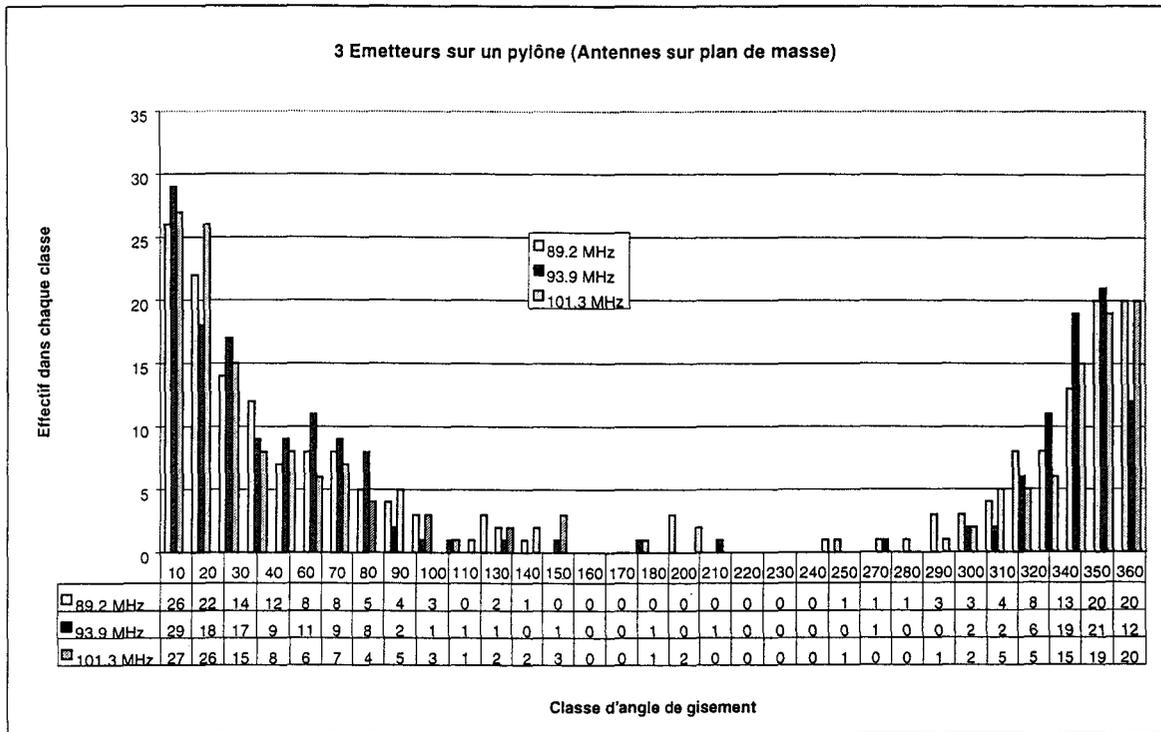


Figure 4.13 : Mesures en milieu suburbain sur les fréquences 89,2, 93,9 et 101,3 MHz

Le mode dominant est de 10° sur chacune des fréquences. Il n’y a pas d’écarts angulaires par rapport à la fréquence et les écarts types moyens obtenus aux trois fréquences sont du même ordre de grandeur. Les angles mesurés sont dispersés. Les écarts types moyens sont respectivement de 148, 147 et 144 aux fréquences de 89,2, 93,9 et 101,3 MHz.

Cependant les médianes ont été déterminées respectivement à 75°, 63° et 83° aux fréquences de 89,2, 93,9 et 101,3 MHz. Ces valeurs, bien qu’étant proches sont assez éloignées des modes trouvés.

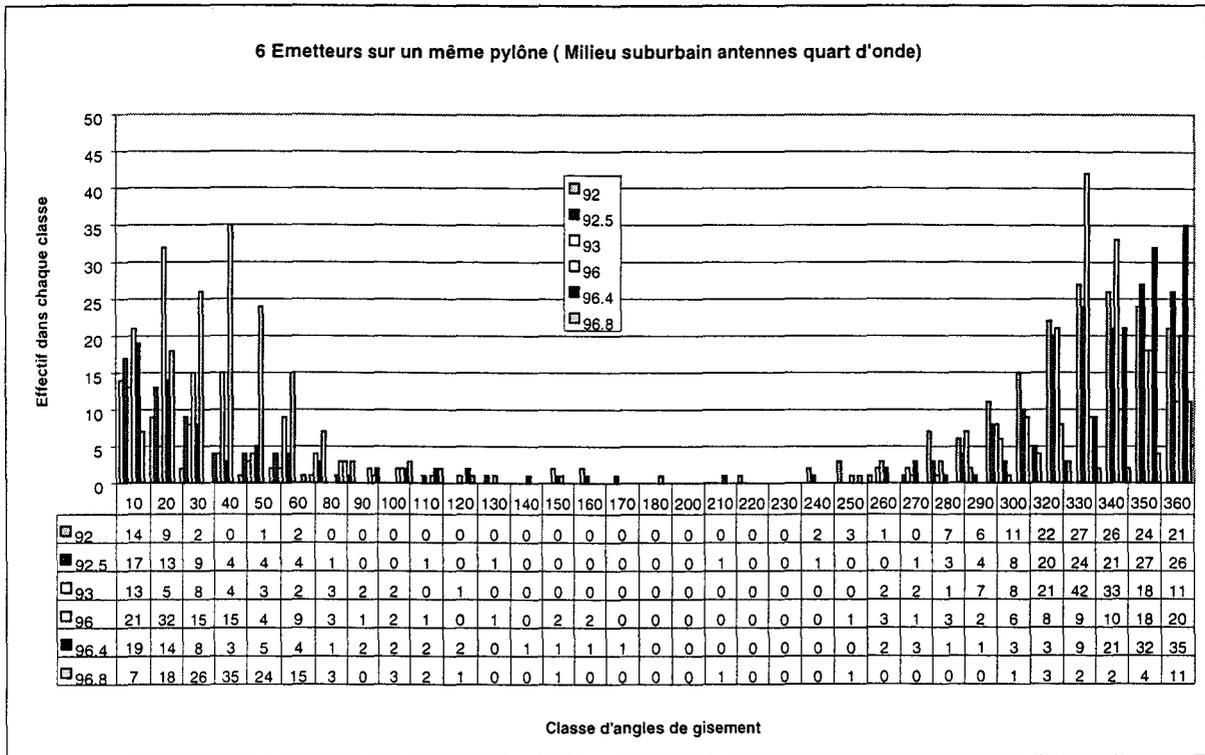


Figure 4.14 : Mesures en milieu suburbain sur 92, 92.5, 93, 96, 96.4 et 96.8 MHz

Les modes dominants sont respectivement de 330° à 92 MHz et 93 MHz, 350° à 92.5 MHz, 360° à 96.4 MHz, 20° à 96 MHz, et 40° à 96.8 MHz. A part cette dernière valeur d'angle de gisement, les écarts angulaires varient de 10 à 50°.

Hormis la fréquence de 96 MHz pour laquelle la médiane est éloignée du mode, les médianes sont proches des modes aux autres fréquences. Elles sont de 322 aux fréquences de 92 et 93 MHz, 319 à la fréquence de 92,5 MHz, 330° à la fréquence de 96,4 MHz, 67° à la fréquence de 96 MHz et 41° à la fréquence de 96,8 MHz.

Les écarts types moyens obtenus sont du même ordre de grandeur aux six fréquences. Ils sont respectivement de 112°, 136°, 122°, 148°, 146°, et 144° aux fréquences de 92, 92,5, 93, 96, 96,4 et 96,8 MHz.

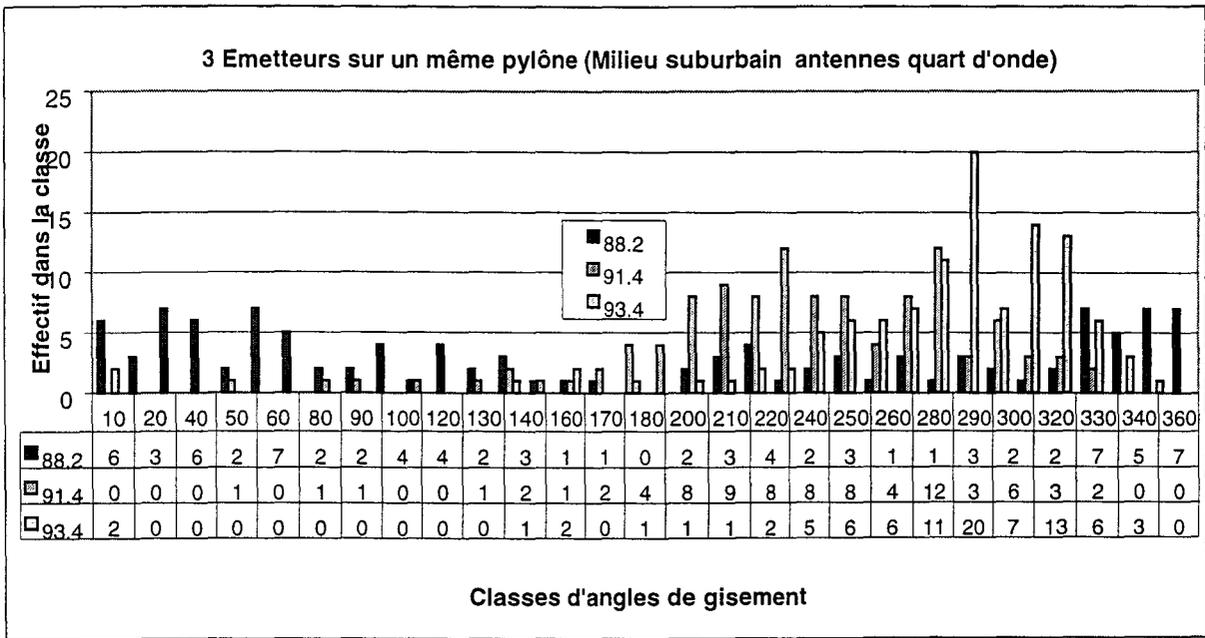


Figure 4.15 : Mesures en milieu suburbain sur 88,2, 91,4 et 93,4 MHz

Les écarts types moyens obtenus sont : 125°, 52° et 52° respectivement aux fréquences de 88,2, 91,4 et 93,4 MHz. Les valeurs mesurées à la fréquence de 88,2 MHz sont trop dispersées si bien qu’il n’y a pas à cette fréquence un mode dominant mais plusieurs classes d’angles de gisement avec des effectifs égaux. A la fréquence de 91,4 MHz le mode est de 280° et 290° à la fréquence de 93,4 MHz. Les médianes sont respectivement de 156°, 232° et 284° aux fréquences de 88,2, 91,4 et 93,4 MHz.

Le traitement de données effectué sur des relevés d’angles de gisement, des groupes de fréquences “ portées ” par un même émetteur en milieu urbain et suburbain, ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- nous parvenons à extraire l’angle de gisement le plus probable de l’émetteur par la recherche de la médiane ou du mode (classe d’angle la plus représentative).
- Nous notons que dans la plupart des cas, les modes ou médianes sont proches et convergent vers l’angle théorique. C’est le cas, notamment lorsque les données sont peu dispersées c’est à dire que les écarts types moyens sur les relevés varient de 5 à 50° et que le mode ou classe la plus représentative est très dominant par rapport aux effectifs des autres classes.
- Pour quelques cas nous notons des écarts angulaires importants sur les angles de gisement obtenus sur les fréquences “ portées ” par un même émetteur. Il est probable que les effets de bords dus à l’utilisation d’un plan de masse sur lequel sont disposées les antennes contribuent à la dégradation des performances du radiogoniomètre.

Pour s’affranchir totalement des effets de bords dus à l’utilisation d’un plan de masse, nous avons envisagé de supprimer le plan de masse et de substituer les monopoles quart d’onde par des dipôles demi-ondes. Les quatre dipôles ainsi constitués sont fixés sur un mât d’antennes et sont placés à 3 mètres environ au dessus du sol. Ils sont reliés au circuit de commutation pour la mesure des angles de gisement.

La caractérisation du radiogoniomètre Doppler muni des quatre dipôles demi-ondes a été effectuée en espace dégagé ainsi que quelques expérimentations en milieu suburbain et urbain. Les principaux résultats obtenus sont présentés dans l'Annexe III-2. Nous notons qu'avec ce nouveau dispositif et malgré quelques erreurs de mesures, les relevés d'angles de gisement obtenus en milieu urbain et suburbain sur des émetteurs conventionnels sont moins dispersés que ne l'étaient les relevés avec les monopoles quart d'onde. Les écarts types des mesures sont petits ainsi que les écarts angulaires par rapport à l'angle vrai. La précision des mesures est meilleure avec les antennes dipôles qu'avec les monopoles sur un plan de masse.

Muni de ce traitement de données sur les valeurs enregistrées en un point sur une fréquence, on a des outils qui permettent d'extraire et de valider à présent l'angle de gisement obtenu ou mesuré avec le radiogoniomètre Doppler.

Les constats et problèmes évoqués dans les conclusions précédentes sont corroborés à l'aide d'un exemple présenté tableau 2. Dans le tableau 2, sont résumés les résultats de mesures d'angles de gisement réalisées à l'aide du radiogoniomètre Doppler en milieu suburbain sur les stations de radiodiffusion dans la communauté urbaine de Lille.

Les résultats sont obtenus en effectuant sur chaque fréquence, plusieurs relevés d'angles de gisement en un point et en déterminant la médiane des valeurs. Pour les fréquences présentées, la valeur médiane est très proche du mode ou classe la plus représentée.

FM band	Théorique	Mesuré	Erreur angulaire
91 MHz	55°	72°	22 degrés
91,4 MHz	29°	63°	34 degrés
93,4 MHz	29°	23°	6 degrés
97,1 MHz	356°	358°	2 degrés
89,7 MHz	329°	320°	9 degrés
99,4 MHz	329°	345°	16 degrés

Tableau 2 : Angles mesurés en milieu suburbain sur les émetteurs conventionnels

A partir de ces relevés, nous notons que les écarts angulaires varient de 2 à 34 degrés. Dans la moitié des cas, ces écarts angulaires obtenus sont inférieurs à 10 degrés.

Lorsque deux fréquences différentes sont émises à partir de la même position géographique (dans le tableau 2, les fréquences de 91,4 et 93,4 MHz d'une part et les fréquences de 89,7 et 99,4 MHz d'autre part), au lieu de mesurer des angles similaires à ces fréquences, nous avons mesuré des angles de gisement différents. Dans ces conditions il est difficile d'extraire l'angle correspondant à l'angle vrai. Nous avons déjà observé ce phénomène dans la première partie de ce chapitre. Il est dû en partie aux phénomènes de multichemins. Nous proposons la solution suivante qui s'appuie sur un exemple concret de mesure effectué en milieu suburbain.

3.2.2 Un exemple de mesures effectuées, en milieu suburbain, en six points proches

La solution suggérée en vue de s'affranchir des trajets multiples, consiste à effectuer les mesures d'angle de gisement, un grand nombre de fois, sur plusieurs fréquences portées par le même émetteur, en plusieurs positions espacées de quelques mètres, sur un même axe longitudinal passant par l'émetteur et le récepteur comme illustré figure 4.16.

Sur le schéma de la figure 4.16, le récepteur prend successivement les six positions D1 à D6. En chaque position (D1 à D6), plusieurs relevés sont effectués sur chaque fréquence et la valeur d'angle extraite suivant le traitement envisagé est donné dans le tableau 3.

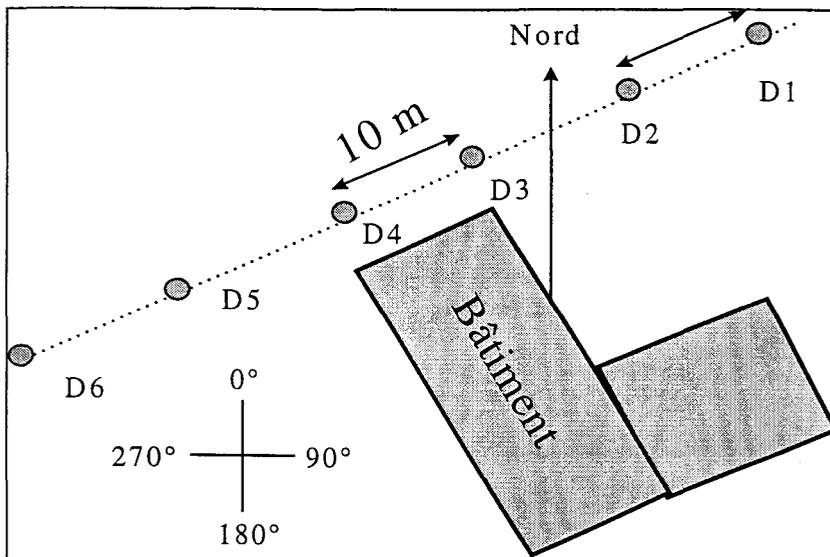


Figure 4.16 : Une configuration des mesures pour pallier les multichemins

Les stations de radiodiffusion sont au moins à 1 kilomètre du lieu d'essai. La distance entre la position D1 (début) et D6 (fin) est de 55 mètres et par conséquent les angles théoriques sont identiques au degré près de D1 à D6.

Les résultats obtenus sur 4 fréquences sont présentés dans le tableau 3 ci-après où “ * ” indique que lors du relevé, la valeur fluctuait et “ ~ ” indique que l'angle n'a pas pu être mesuré ou extrait.

Bande	Fréquence	Angle théorique	D1 0 m	D2 10 m	D3 20 m	D4 30 m	D5 40 m	D6 55 m	Déviations (erreur)
FM	97,3 MHz	82°	90°	112°	120°	104°	127°	102°	8° à 45°
	99,8 MHz	302°	290°	315°	310°	~	320°	310°	8° à 13°
	89,7 MHz	21°	26°	50°	19°	60°*	35°	20°	1 à 39°*
	99,4 MHz	21°	24°	14°	20°	22°	75°*	29°	1 à 54°*

Tableau 3 : Mesures d'angles obtenues sur 4 fréquences et en 6 positions différentes

Les erreurs de mesures sur les relevés obtenus varient de 1 à 54 degrés. Dans la plupart des cas les écarts angulaires sont inférieurs à 10 degrés. Pour calculer ou extraire l'angle de gisement de l'émetteur avec la plus grande précision dans le maximum de cas possibles, il convient d'effectuer le calcul de la moyenne des mesures à chaque fréquence ou alors d'appliquer par exemple une méthode de traitement sur ces données. Nous présentons cette méthode dans le paragraphe ci-après.

a) Traitement des données appliqué aux valeurs mesurées en plusieurs points :

Rappelons que le but de ce traitement des données est de déterminer les angles de gisement sur chaque fréquence (ou émetteur) à partir des mesures obtenues aux N positions prises par le récepteur en un lieu d'expérimentation donné.

La méthode de traitement retenue consiste à calculer pour chaque fréquence (ou émetteur), la valeur moyenne des angles mesurés aux N positions et l'écart type des mesures.

Dans une première phase d'approche, on privilégie les fréquences pour lesquelles l'écart type calculé sur les mesures sur cette fréquence est parmi le plus petit.

Dans une seconde phase d'approche, on procède à l'élimination des valeurs situées en dehors de l'intervalle [valeur moyenne - écart type, valeur moyenne + écart type]. On calcule les valeurs moyennes et écarts types des données restantes. Le processus est ainsi réitéré jusqu'à ce que l'écart type soit inférieur au seuil de précision de mesures fixé (soit 5 ou 10 degrés). Dans ce cas, les données convergent de façon générale vers la valeur probable de l'angle de gisement de l'émetteur.

En définitive, le type de données obtenu à la fin du processus est un tableau composé de fréquences (information sur la position de l'émetteur) et des angles calculés correspondants (la valeur moyenne et écart type des mesures).

Par le procédé de mesures mis en place qui consiste à effectuer plusieurs relevés en plusieurs points sur plusieurs fréquences, on parvient à extraire le mode le plus représentatif qui est proche de manière générale à l'angle de gisement de l'émetteur. Par la même occasion, on réduit de manière significative les erreurs de mesures angulaires et on améliore la précision de localisation. Dans certains cas, l'écart entre le mode le plus représentatif et l'angle vrai est important à cause des multichemins. C'est pour cela qu'il convient de multiplier les mesures en des points proches et de calculer la moyenne glissante sur toutes les fréquences. Les valeurs ainsi obtenues sur plusieurs émetteurs permettent d'effectuer la localisation du mobile.

Le paragraphe suivant présente les précisions de localisation obtenues à partir de mesures effectuées en milieu urbain et suburbain sur des émetteurs existants dans l'agglomération Lilloise.

3.3 Application à la localisation des mobiles par radiogoniométrie

La localisation des mobiles par radiogoniométrie s'effectue à partir de la mesure d'angles de gisement sur deux ou plusieurs émetteurs de positions géographiques distinctes. En multipliant les relevés d'angles de gisement suivant le procédé décrit c'est à dire en plusieurs points de mesures et sur des fréquences rattachées aux émetteurs ayant la même position géographique, statistiquement, il est probable d'obtenir au moins une mesure "correcte" proche de l'angle de gisement de l'émetteur en cette position. De plus l'on se dote d'éléments ou valeurs de comparaison qui permettent de déterminer des défauts ou erreurs angulaires importants. Ce qui permet de n'utiliser, pour la localisation, que des angles mesurés avec la plus grande précision. Néanmoins l'angle de gisement obtenu sur l'émetteur à l'issue du traitement des données ne permet pas à lui tout seul de localiser le mobile.

C'est pour cela qu'au lieu des enregistrements continus sur un ou deux émetteurs, on peut multiplier le nombre de mesures sur un nombre important d'émetteurs distincts. On obtient alors une série de droites dont les intersections deux à deux donnent une série de points susceptibles de correspondre à la position courante du mobile. En effectuant un maillage un

plan de la zone géographique entourant le mobile, on peut, par exemple, comme illustré figure 4.17, estimer la position courante du mobile comme étant le centre de la maille au sein de laquelle se trouve le plus grand nombre de points d'intersection.

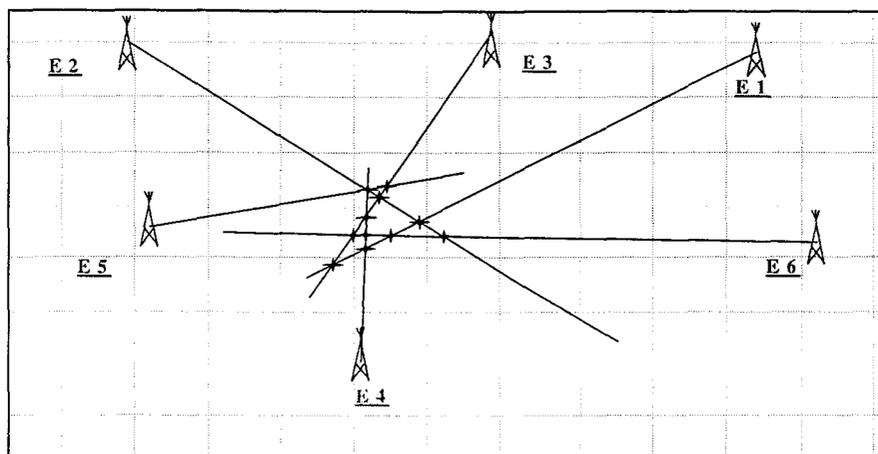


Figure 4.17 : Maillage du plan de la zone de localisation par radiogoniométrie

Les tableaux 3 et 4 donnent deux exemples de précision de localisation à partir des mesures angulaires réalisées avec le radiogoniomètre Doppler (enregistrement continu en un point de mesure donné) à deux endroits en milieu suburbain.

Pour chaque tableau, la 1^{ère} colonne représente les fréquences sur lesquelles les mesures sont effectuées ; la 2^{ème} colonne donne l'angle de gisement mesuré par rapport au nord. La 3^{ème} colonne donne l'erreur angulaire ou écart par rapport à l'angle théorique, la 4^{ème} colonne donne la distance approximative entre l'émetteur et le récepteur, et la 5^{ème} colonne donne l'erreur de localisation obtenue entre la position estimée d'après les mesures et la position repérée sur une carte IGN au 1 : 25 000 ème. Les calculs sont effectués à l'aide du logiciel de calcul développé à cet effet.

Fréquence (MHz)	Angle / Nord	Erreur angulaire / IGN	Distance Emetteur / récepteur	Erreur de localisation / IGN
87,8	305°	2°	7,5 km	72 m
88,2	330°	1°	4 km	
95,3	29°	1°	11,5 km	

Tableau 3 : Localisation en milieu suburbain - Villeneuve d'Ascq

Fréquence (MHz)	Angle / Nord	Erreur angulaire / IGN	Distance Emetteur / récepteur	Erreur de localisation / IGN
88,2	334°	4°	9,5 km	350 m
96,0	342°	2°	10 km	
97,1	5°	5°	22 km	

Tableau 4 : Localisation en milieu suburbain - Sainghin

Dans le tableau 3, malgré la bonne précision de mesures sur les trois émetteurs, la précision de localisation est de 72 mètres à cause notamment de l'éloignement des émetteurs et surtout de la disposition relative des émetteurs aux fréquences de 87,8 et 88,2 MHz par rapport au mobile ou lieu d'expérimentation (notion de GDOP ou dilution de précision d'origine géométrique développée au chapitre 1). En effet, la disposition de ces deux émetteurs est défavorable pour la localisation du mobile car l'angle formé par le récepteur et ces deux émetteurs n'est que de 25 degrés tandis que pour une disposition idéale, cet angle devrait avoisiner 90 degrés.

Dans le tableau 4, bien que les erreurs angulaires soient de moins de 5 degrés, la précision de localisation obtenue est de 350 mètres à cause de l'éloignement des émetteurs et de la disposition relative des émetteurs aux fréquences de 88,2 et 96,2 MHz par rapport au récepteur. En effet, l'angle formé par le récepteur et ces deux émetteurs n'est que de 8 degrés. L'erreur de localisation est plus grande dans le cas du tableau 4 par rapport au cas précédent du tableau 3 pour les mêmes raisons à savoir : l'erreur de mesure d'angle est plus grande, les émetteurs sont plus éloignés et deux émetteurs sont disposés de manière défavorable pour la localisation, par rapport au récepteur.

Dans le tableau 5, nous donnons un exemple de résultats obtenus sur plusieurs émetteurs selon le méthode de mesure décrite précédemment à savoir : pour un émetteur donné, nous effectuons de nombreux relevés en plusieurs points avant de valider l'angle de gisement obtenu après avoir calculé la valeur moyenne pondérée des relevés d'angle obtenus.

Fréquence MHz	Angle théorique	Moyenne pondérée	Distance E/R	Erreur / IGN
97,3	82°	90°	3 km	225 m
99,8	302°	310°	4 km	
89,7 et 99,4	21°	25°	7 km	

Tableau 5 : Localisation en milieu suburbain (relevés en plusieurs points)

Dans le tableau 5, nous notons que la disposition des trois émetteurs par rapport au récepteur est meilleure que celle observée dans les deux cas précédents des tableaux 3 et 4. Les émetteurs sont beaucoup plus proches du dispositif de réception que dans les deux cas précédents. La précision de localisation n'est pas sensiblement améliorée à cause surtout de l'erreur de mesures d'angle de gisement des émetteurs qui est plus importante (respectivement 4°, 8° et 8°) que dans les cas précédents. D'où la précision de localisation obtenue est de 225 mètres.

Les résultats présentés montrent que la précision de localisation des mobiles par radiogoniométrie dépend de plusieurs paramètres :

- la disposition relative des émetteurs autour du mobile ou récepteur (notion de GDOP développée au chapitre I, encore appelée dilution de la précision due à la géométrie du système ou encore de la disposition relative des émetteurs par rapport au lieu d'expérimentation),
- les erreurs de mesures ou écarts angulaires entre l'angle vrai et l'angle mesuré et la distance existant entre l'émetteur et le récepteur. En effet, ces deux paramètres sont corrélés : à erreur de mesure angulaire identique, l'erreur de localisation sera d'autant plus grande que l'émetteur est éloigné du dispositif de réception.

Pour améliorer la précision de localisation des mobiles par radiogoniométrie, il convient de choisir les paramètres de manière optimale, l'un ne pouvant se faire au détriment de l'autre. En effet, il est nécessaire que les erreurs de mesures d'angle de gisement des émetteurs choisis soient les plus faibles possibles ou du moins qu'elles soient dans la fourchette de précision demandée c'est à dire moins de 10 degrés. Le choix des émetteurs disposés de manière favorable par rapport au récepteur ne peut s'effectuer que parmi ces derniers. D'où l'idée d'effectuer plusieurs mesures en plusieurs points sur de nombreux émetteurs et d'effectuer les différents traitements proposés afin de valider l'angle mesuré.

Jusqu'à présent, les erreurs angulaires ont été évaluées grâce à la connaissance d'une part de la position du mobile et d'autre part grâce à la position géographique des émetteurs conventionnels. Ces éléments d'information ont permis de définir l'angle théorique et d'évaluer l'erreur angulaire obtenue par comparaison de l'angle théorique avec l'angle mesuré.

Dans une application pratique de localisation, l'angle théorique n'est pas connu en début d'essai et il est alors difficile d'évaluer avec exactitude les erreurs angulaires et de déceler les valeurs erronées. Le système de mesures d'angle de gisement est donc compris ici comme un système complémentaire du dispositif de localisation des mobiles terrestres par radiotéléphone cellulaire GSM présenté dans le chapitre II de cette thèse. Le principe d'association des deux systèmes sera présenté dans le chapitre IV.

Conclusion du chapitre III

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons conclu qu'il n'était pas nécessaire d'exploiter simultanément les trois bandes de fréquences 100, 475 et 900 MHz car les performances sont similaires dans chacune des bandes. Nous avons choisi d'intensifier les mesures dans les bandes de 100 MHz, car il existe en milieu urbain et suburbain de nombreuses sources d'émission à ces fréquences.

Dans la seconde partie de ce chapitre, une série d'expérimentations en espace dégagé a permis de comparer les performances du radiogoniomètre Doppler à celles des capteurs réalisés. Dans cette configuration de mesures, les écarts angulaires moyens obtenus, en effectuant des mesures tous les mètres à l'aide des capteurs, sont de 4 degrés. Ceux obtenus à l'aide du radiogoniomètre Doppler dans les trois gammes de fréquences sont de 5 degrés avec une précision de 8 degrés (le constructeur garantit 10 degrés de précision sur les mesures). De plus, hormis quelques cas de mesures pour lesquels on a obtenu de nombreuses fluctuations des données angulaires, les résultats obtenus en effectuant le même type d'essai sur une distance d'un kilomètre, donnent également des écarts de 5 degrés après filtrage et traitement des données enregistrées.

La présence des signaux directs et réfléchis sur le mur d'un bâtiment engendre des écarts supplémentaires, car le dispositif est très sensible aux multichemins. Ces écarts peuvent atteindre 15 voire 25 degrés à 100 MHz.

Le radiogoniomètre est sensible à la propagation des signaux par multichemins et exige une bonne calibration au début de chaque expérimentation dans la bande de fréquences allant de 88 à 108 MHz. Il permet d'effectuer des relevés en quasi temps réel, et donne des précisions de l'ordre de grandeur des capteurs réalisés à savoir : les écarts angulaires peuvent être de 5 degrés dans le meilleur des cas et la précision de mesure est de moins de 10 degrés.

Dans le souci d'améliorer la précision de localisation des mobiles par radiogoniométrie, nous avons proposé d'effectuer diverses mesures en plusieurs points proches sur de nombreux émetteurs avant toute validation d'un angle de gisement d'un émetteur à une position donnée, en milieu urbain ou suburbain. Ce qui permet, en appliquant le traitement de données qui consiste à déceler et à filtrer les défauts après avoir calculé la valeur moyenne des données et l'écart type, de s'affranchir des multichemins et de minimiser les écarts angulaires obtenus. Une autre méthode de traitement de données consiste à ranger les mesures en classes allant de 0 à 360°, à calculer l'effectif dans chaque classe et à déterminer le mode ou la classe la plus représentée.

Avec la connaissance du lieu d'expérimentation, repérable sur une carte IGN, et des positions géographiques des émetteurs conventionnels, nous avons évalué les erreurs de mesures et la précision de localisation sur quelques mesures effectuées en milieu urbain ou suburbain. En choisissant les émetteurs sur lesquels la mesure d'angle de gisement est obtenue avec une précision de moins de 10 degrés, nous avons obtenu des précisions de localisation variant entre 72 et 350 mètres. Ces précisions dépendent de trois paramètres principaux : la distance entre le récepteur et chacun des émetteurs utilisés, la disposition relative de ces émetteurs par rapport au récepteur et de l'écart angulaire obtenu par rapport à l'angle vrai.

Le système de localisation par radiogoniométrie à lui tout seul, ne suffit pas à effectuer une localisation des mobiles terrestres avec une bonne précision. En effet, sans la connaissance de la position géographique du lieu de mesures, il est difficile de déceler les valeurs d'angles erronées. Il est donc nécessaire d'adjoindre à ce dispositif, un autre système de localisation qui permet d'avoir une estimation de la position du mobile. Ce système n'est autre que le système de localisation des mobiles par radiotéléphonie GSM présenté au chapitre II. Il s'agit donc maintenant d'utiliser de façon complémentaire les données issues de ces deux sources d'information. Cela fera l'objet du chapitre 4.

Chapitre IV :

Perspectives: Introduction à la fusion des données des deux systèmes de localisation

Chapitre IV : Perspectives et introduction à la fusion des données des deux systèmes de localisation

1. Introduction

Les deuxième et troisième chapitres de ce mémoire ont été consacrés à la mise en œuvre expérimentale, d'un système de localisation des mobiles en milieu urbain fondé sur l'utilisation d'une part, d'un réseau de radiotéléphonie GSM et d'autre part, d'un réseau d'émetteurs de radiodiffusion dans la bande FM. Les performances de chacun des systèmes pris séparément ne peuvent pas atteindre les exigences que nous avons fixées, c'est pourquoi, dans le but d'améliorer la disponibilité et la précision de localisation du mobile, nous avons envisagé de coupler les deux systèmes de localisation développés.

Dans ce chapitre, nous proposons quelques pistes envisageables pour la mise en œuvre d'une procédure, qui permette d'exploiter la complémentarité des techniques de mesures afin d'estimer la position du mobile, avec la plus grande précision possible et en augmentant la disponibilité globale du système. Nous présentons également les différents algorithmes d'acquisition et de traitement des données qu'il convient de développer.

Un début d'implémentation a été effectué et testé en considérant d'une part, des mesures expérimentales obtenues en milieu urbain ou suburbain dans le cadre de la localisation par GSM et d'autre part, des valeurs probables d'angle de gisement d'émetteurs de radiodiffusion de la zone de mesures, valeurs "générées" à partir de la valeur théorique de l'angle et de la variation attendue des erreurs angulaires.

L'évaluation de l'erreur de localisation du système utilisant les deux sources d'information évaluées consiste, à déterminer la distance entre la position obtenue avec le système global et les positions obtenues à l'aide de chacun des deux systèmes pris séparément. Ces positions sont comparées à la position du mobile repérée sur une carte IGN.

2. Concept et algorithmes de fusion des données: exploitation de la complémentarité des deux techniques de mesures

Le concept de fusion des données issues des deux systèmes peut être découpé en plusieurs fonctions ou étapes:

- une première étape au cours de laquelle on effectue l'acquisition des données de chacun des deux systèmes, suivant les méthodes de traitement et de validation élaborées. C'est

également à cette étape que les données de chaque capteur sont classifiées par ordre d'erreurs de mesure décroissant,

- une deuxième étape au cours de laquelle on met en correspondance les données des deux capteurs. Cette mise en correspondance, permet d'effectuer un filtrage des données d'un capteur à partir de celles de l'autre capteur, suivant des critères que nous définirons,
- une dernière étape au cours de laquelle la prise de décision est effectuée sur les données restantes (données estimées fiables après filtrage). C'est à cette étape que sont évaluées la position estimée du mobile et la précision de localisation obtenue.

Le diagramme général de fusion que nous mettons en œuvre est présenté figure 5.1 où:

- le capteur 1 représente le dispositif de localisation des mobiles par GSM et
- le capteur 2 représente le dispositif de localisation par radiogoniomètre Doppler.

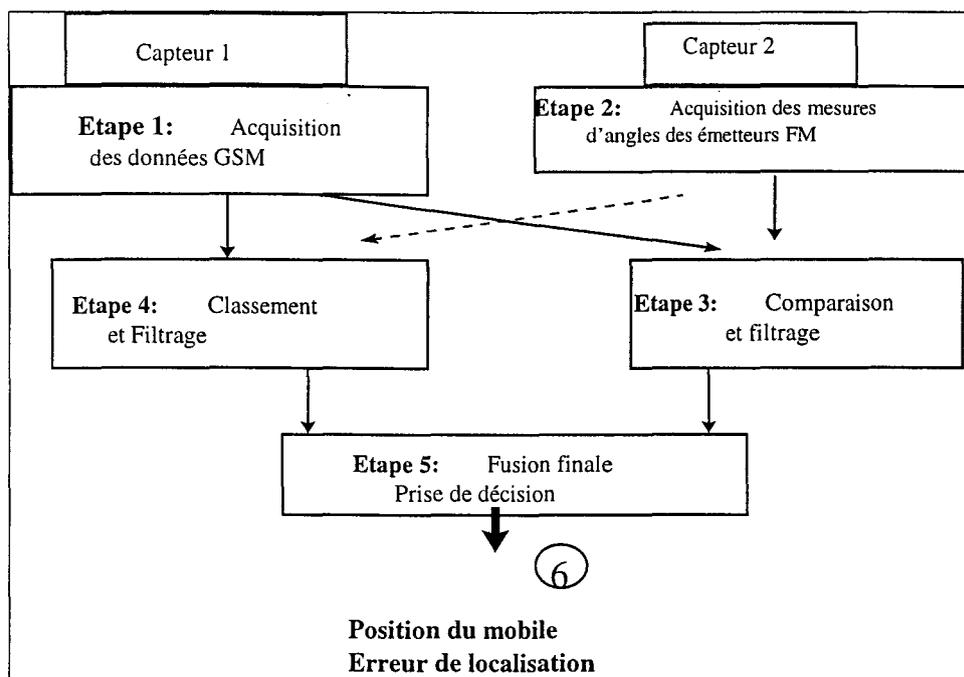


Figure 5.1 : Diagramme général de fusion des deux informations de localisation par GSM/Doppler.

Les étapes 1 à 5 de la figure 5.1 sont explicitées ci-après en s'appuyant sur les traitements concrets effectués sur les deux systèmes de localisation développés pour l'application.

- **A l'étape 1**, les données recueillies sont les valeurs de TA (Timing Advance) obtenues sur les cellules courantes à l'aide de la solution technique développée pour forcer les Handovers inter-BTS du réseau cellulaire GSM (cf. chapitre II).

Sur l'exemple concret de l'application de localisation des mobiles, les différentes procédures d'acquisition et de traitement des données s'effectuent de la manière suivante:

Avec la connaissance des coordonnées géographiques des stations de base GSM, l'acquisition des données GSM est effectuée à l'aide du banc développé au chapitre II. De ces

mesures, est généré un tableau de données GSM du type présenté dans le tableau 1 ci après. Ce tableau est nommé **Cell-data** dans lequel:

- $Cell_n$ représente la n-ième cellule courante obtenue au cours de la communication
- et les TA_n représentent les valeurs de Timing Advance (TA) reçues sur la cellule n.

Cell-data	
Cellules	TA obtenus
Cell1	TA 11
Cell2	TA 21/TA 22
⋮	⋮
Celli	TA i
⋮	⋮
Celln	TA n1

Type de données stockées

Tableau 1: Données de mesures obtenues avec le capteur 1 (système de localisation par GSM)

Ces données sont exploitées pour effectuer la fusion des données et la localisation des mobiles à l'étape suivante.

■ **A l'étape 2**, les données recueillies sont les angles de gisements des stations de radiodiffusion mesurés avec un radiogoniomètre Doppler.

Sur le cas concret de l'application, cette étape s'effectue de la façon suivante:

- A partir de la connaissance des coordonnées géographiques des stations de radiodiffusion FM de l'agglomération Lilloise, les angles de gisement sont mesurés sur plusieurs fréquences de la bande FM, en plusieurs points proches (cf. chapitre III 2^{ème} partie).

Ces mesures sont rangées dans un tableau nommé **Freq-data** dans lequel:

- les F_i représentent les fréquences des émetteurs scrutés,
- les A_{ij} représentent les angles mesurés à la fréquence F_i et à la j-ième position,
- les α_i représentent la valeur moyenne des A_{ij} et les ϵ_i sont les écarts types calculés à la fréquence F_i .

Fréq - data		
Fréq	Angles mesurés	Val moy écart type
F1	A11 A1n	$\alpha_1 \pm \epsilon_1$
		\pm
Fj	Aj1 Ajn	$\alpha_j \pm \epsilon_j$
Type de données stockées		

Tableau 2: Données de mesures obtenues avec un radiogoniomètre Doppler.

NB: Le Tableau **Freq-data** est utilisé à la première étape de filtrage.

Avant de passer aux étapes 3 et 4 de mise en correspondance et de filtrage des données erronées, il convient d'effectuer quelques calculs statistiques sur les valeurs issues de chacun des deux systèmes. Il s'agit d'effectuer des traitements sur ces données, en vue de les classer par ordre décroissant des erreurs de mesures, de la manière suivante:

Pour une cellule donnée, on calcule la valeur moyenne géométrique de toutes les valeurs de TA reçues sur cette cellule.

Pour une fréquence donnée, on calcule la moyenne arithmétique des valeurs d'angles de gisement obtenues, ainsi que l'écart type des données. On classe ces fréquences par ordre croissant d'écart type du plus petit au plus grand.

Du fait qu'à une position géographique d'émetteur donnée, sont associées une, deux ou plusieurs fréquences et qu'à une station de base du réseau GSM peut être associée une, deux ou trois cellules, les cellules sont regroupées en stations de base et les fréquences sont regroupées en émetteurs comme indiqué figure 5.2. Des tableaux **Cell-data** et **Fréq-data**, on obtient deux nouveaux tableaux nommés respectivement **BTS-data** et **E-data**. Sur le schéma de la figure 5.2, nous présentons l'étape de calculs et de classement des données issues de chacun des deux systèmes de localisation à partir des deux tableaux décrits.

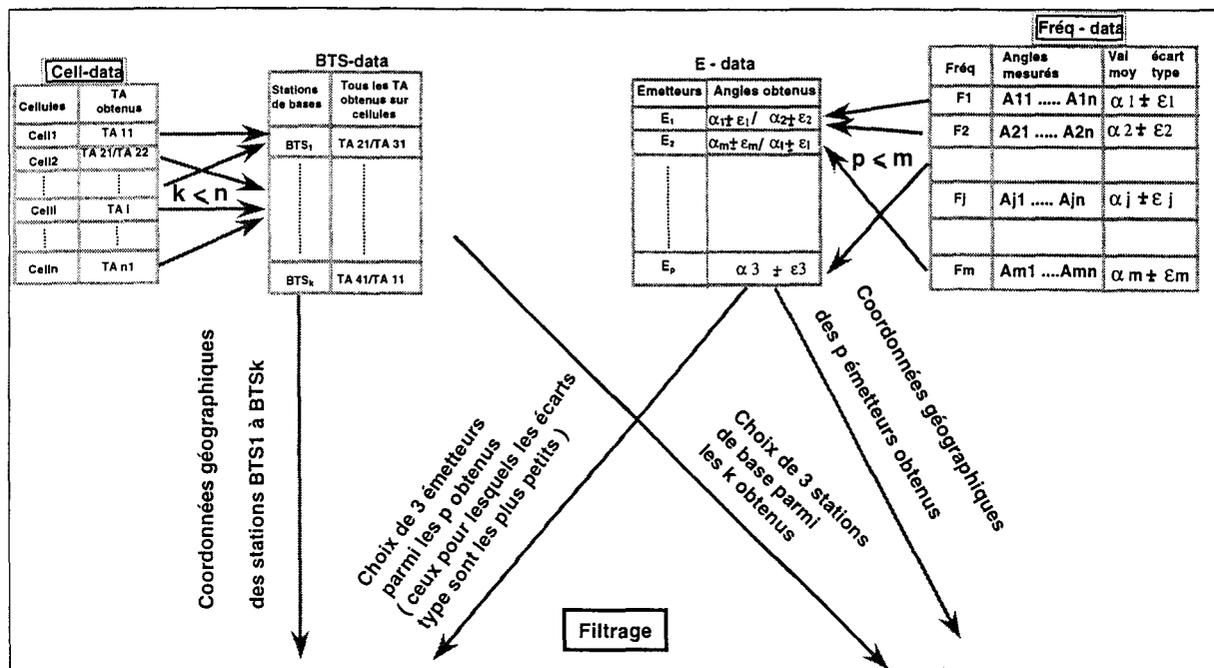


Figure 5.2 : Traitement statiques et classement des données des deux capteurs

Chaque élément du tableau **BTS-data** de la figure 5.3 est composé de la coordonnée géographique de la station de base courante et d'une, deux ou trois valeurs de **TA** obtenue(s) sur la(les) cellule(s) courante(s) correspondantes.

Chaque élément du tableau **E-data** de la figure 5.2 est composé de la coordonnée géographique de l'émetteur, de toutes les valeurs moyennes et des écarts types obtenus sur les fréquences qui lui sont rattachées.

A présent on peut passer à l'étape suivante de filtrage des données.

- **Les étapes 3 et 4** sont les premières étapes de fusion des deux données recueillies. Il est question à cette étape d'effectuer le filtrage des défauts ou valeurs erronées.

On utilise la disponibilité ou une estimation de la position du mobile obtenue à partir d'un capteur, pour éliminer les valeurs ambiguës de l'autre capteur et on définit les intervalles de prédiction dans chacun des cas. Précisons que l'on privilégie les données obtenues par GSM. Le filtrage de ces valeurs s'effectue en comparant les valeurs mesurées aux valeurs estimées à partir des données de l'autre capteur. Nous allons expliciter les étapes 3 et 4 à l'aide du schéma de la figure 5.3 ci-après.

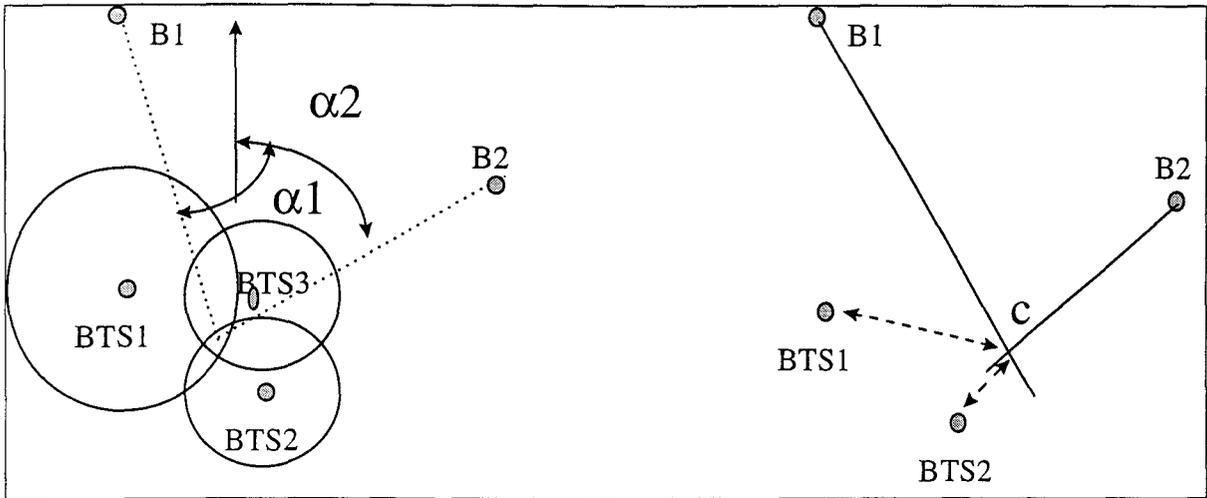


Figure 5.3 : Définition des intervalles de prédiction de chacun des deux capteurs

- **A l'étape 3**, l'estimation des angles de gisement (α_1 et α_2) des émetteurs (B1 et B2) à partir des données GSM s'effectue de la manière suivante : on considère trois stations de base (BTS1, BTS2 et BTS3) avec les trois valeurs de TA obtenues qui permettent de donner une première estimation de la position du mobile. Avec la connaissance de cette position du mobile et des coordonnées géométriques des émetteurs de radiodiffusion, on calcule les angles (α_1 et α_2) que font cette position du mobile déterminée par GSM et chacun de ces émetteurs de radiodiffusion, par rapport au Nord. Ces valeurs d'angles estimées à l'aide de la donnée GSM sont comparées à celles mesurées à l'aide du radiogoniomètre Doppler. Par comparaison, les valeurs d'angles qui sont en dehors de l'intervalle de prédiction (Angle estimé +/- précision du capteur 2) sont éliminées.

- **A l'étape 4**, De la même manière, l'estimation des distances (d_1 et d_2) des stations de base (BTS1 et BTS2) à partir des mesures du radiogoniomètre s'effectue de la manière suivante : on considère trois émetteurs de radiodiffusion (B1, B2 et B3) avec les trois valeurs d'angles mesurées, qui permettent de donner une estimation de la position du mobile. Avec la connaissance de cette position du mobile par radiogoniométrie et des coordonnées géographiques des stations de base du réseau cellulaire GSM, on calcule les distances (d_1 et d_2) existantes entre cette position du mobile déterminée par radiogoniométrie et chacune de ces stations de base. Ces valeurs de distance estimées à l'aide de la donnée radiogoniométrie sont comparées à celles obtenues initialement sur les cellules courantes, à l'aide du GSM. Ainsi les valeurs de TA qui sont en dehors de l'intervalle de prédiction (TA +/- précision du capteur 1) sont éliminées.

Les étapes 3 et 4 sont illustrées à l'aide du cas concret de l'application:

A partir des tableaux **BTS-data** et **E-data**, nous passons à l'étape de filtrage des données. D'un côté, à partir des coordonnées géographiques des stations de base du réseau GSM et du choix de trois émetteurs FM (ceux pour lesquels les écarts types sont les plus petits parmi tous les émetteurs utilisés) on va éliminer les éventuelles données erronées du GSM ; de l'autre côté, à partir des coordonnées géographiques des émetteurs FM et du choix de trois stations de base quelconques parmi celles obtenues, nous allons filtrer les données d'angle de gisement suivant le procédé décrit sur le schéma de la figure 5.4 ci-après.

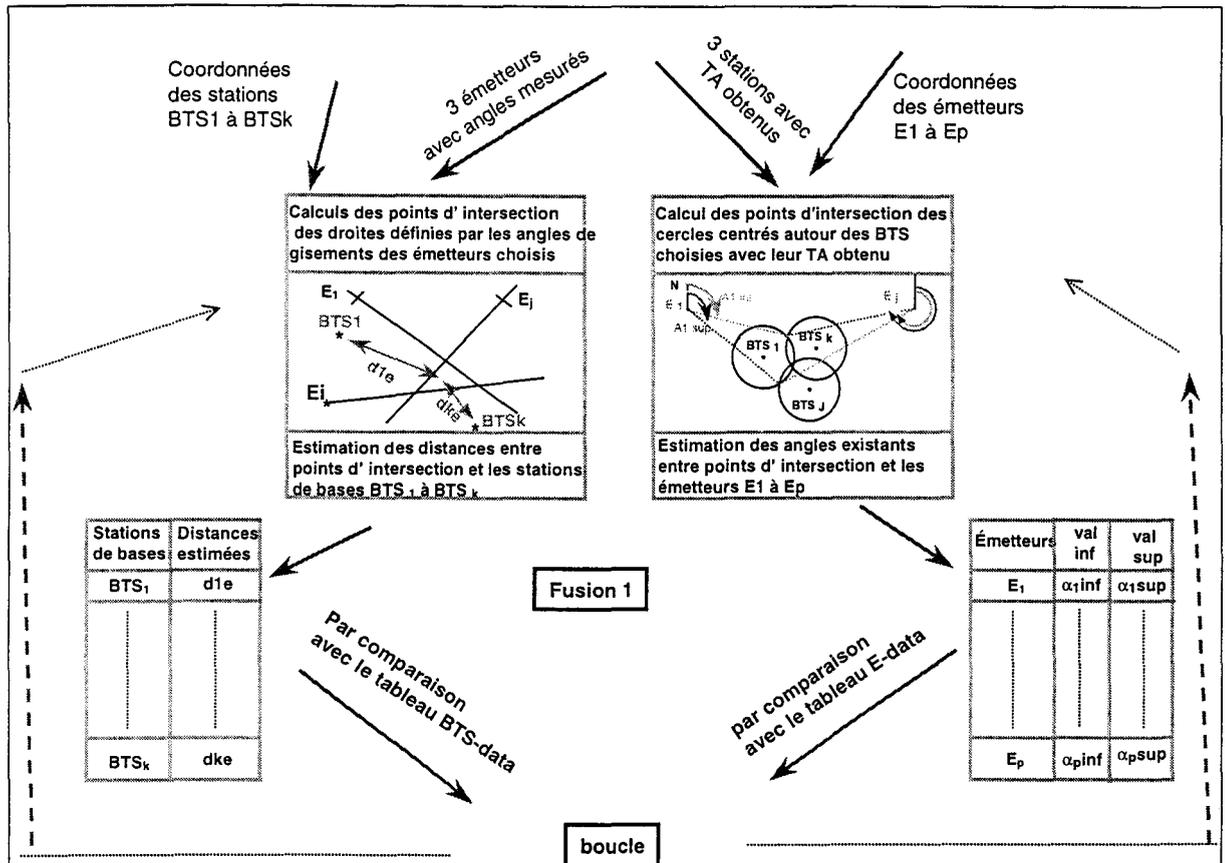


Figure 5.4 : Filtrage des données d'un capteur à partir des données de l'autre capteur

A partir de trois stations de base choisies avec leurs valeurs de TA correspondante, nous allons estimer une position du mobile par GSM. A partir de cette dernière et des positions géographiques des émetteurs FM, on calcule les valeurs d'angles de gisement existant entre cette position estimée et chacun des émetteurs. On définit également des intervalles autour desquelles, les mesures à retenir par radiogoniométrie devront se situer. Il s'agit des valeurs inférieures et supérieures au sein desquelles devra se situer l'angle vrai (α_{jinf} et α_{jsup} , $j=1,2,\dots,p$).

De la même manière, à partir des trois émetteurs choisis avec leurs valeurs moyennes d'angles correspondantes (émetteurs sur lesquels les mesures d'angles de gisement ont été obtenues avec des écarts types les plus petits), une estimation de la position du mobile par radiogoniométrie est effectuée. A partir de cette estimation et des positions géographiques des stations de base du réseau GSM, on calcule les distances entre cette position estimée et chacune des stations de base (" D_{ie} ", $i=1,2,\dots,k$).

Par confrontation des tableaux des figures 5.3 et 5.4, nous éliminons les valeurs d'angles ou de distances qui sont en dehors de l'intervalle défini. Et en fonction du nombre de valeurs restant, nous pouvons envisager différentes méthodes de traitement en vue de localiser le mobile avec la plus grande précision possible.

Les données restantes après filtrage aux étapes 3 et 4 sont combinées en vue de donner la position finale du mobile avec la plus grande précision possible. Il y a la possibilité de revenir en arrière ou de refaire une boucle de traitement si les données restantes sont insuffisantes ou pas fiables pour effectuer la localisation.

A ce stade ou étape 5 dite de fusion finale, plusieurs cas de figure sont à distinguer en fonction du nombre de données GSM et de radiogoniométrie restant ou considéré comme viable pour la localisation (cf. figure 5.5).

■ **A l'étape 5**, il y a une prise de décision à effectuer en fonction des divers cas présentés. Nous avons envisagé de distinguer 16 cas possibles illustrés sur le tableau 3 à partir des données retenues pour la localisation (cf. figure 5.5).

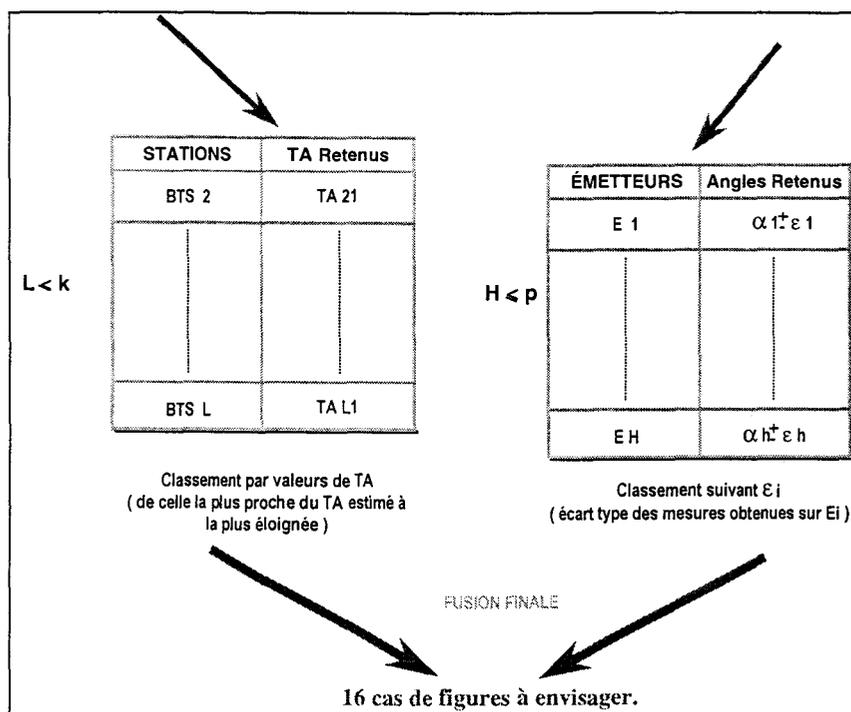


Figure 5.5: Tableau des données retenues après les étapes 3 et 4 de filtrage

A partir des deux tableaux de données retenues après filtrage, on peut distinguer 16 cas possibles pour estimer la position du mobile.

capteur 2: Radiogoniomètre Doppler capteur 1 Radiotéléphone GSM	1 Seul Émetteur retenu (un angle : une droite)	2 Émetteurs retenus (2 angles : 2 droites)	3 Émetteurs retenus (3 angles: 3droites)	plus de 3 Émetteurs retenus +de 3 angles: + de 3 droites
une seule BTS retenue (un TA: un cercle)	1 Localisation très imprécise du mobile	2 1 position estimée par Doppler Erreur: "grande"	3 1 position trouvée: barycentre des 3 points d'intersection des 3 droites Erreur: distance entre la position trouvée et le "cercle"	4 idem (7)
2 BTS retenues (2 TA: 2 cercles)	5 Localisation très imprécise du mobile	6 1 position estimée par "Doppler" Erreur: "grande"	7 1 position calculée idem que 3 erreur : distance entre position trouvée et points des deux cercles	8 idem (7)
3 BTS retenues (3 TA: 3 cercles)	9 1 position trouvée: barycentre des 3 points d'intersection les plus proches erreur : distance entre position trouvée et la droite (angle de l'émetteur)	10 1 position trouvée: idem (9) erreur : distance entre la position trouvée et le point d'intersection des 2 droites	11 2 position trouvées: idem que 3 erreur : distance entre position trouvée et points d'intersection des deux cercles	12 idem (11)
Plus de 3 BTS retenues (+ de 3 TA: + de 3 cercles)	13 idem (9)	14 idem (10)	15 idem (11)	16 idem (11)

Tableau 3 : Les 16 cas possibles obtenus après les étapes 3 et 4

A cette étape 7 de fusion finale, il convient de définir des critères de décision viables de façon à gérer la complémentarité d'information d'un ou des deux capteurs et surtout les informations qui peuvent être contradictoires. Rappelons qu'en cas de discordance des informations des deux capteurs, nous accordons une priorité aux données obtenues par GSM (capteur 1) compte tenu de leur fiabilité par rapport aux données mesurées avec le radiogoniomètre Doppler.

Dans le cas où moins de trois stations de bases ont été retenues après filtrage (cas 1 à 8 du tableau 3), l'estimation de la position du mobile ne pourra s'effectuer qu'avec les données issues du radiogoniomètre Doppler à condition qu'il y ait au moins trois valeurs viables. Il en est de même lorsque moins de trois émetteurs sont obtenus après filtrage, seules les données issues du GSM servent à la localisation à condition qu'il y ait au moins trois valeurs de TA.

Dans le cas où plus de trois stations de base GSM sont retenues après filtrage (cas 13 à 16 du tableau), on peut appliquer le principe de GDOP ou dilution de précision géométrique qui consiste à, choisir les 3 émetteurs les mieux disposés qui permettent de déterminer la position du mobile, avec l'erreur de précision la plus faible possible. Il en est de même lorsque plus de trois émetteurs sont retenus après filtrage (cas 4, 8, 12 et 16 du tableau 3).

Ces différents algorithmes et méthodes de mesures ont commencé à être implémentés sur un prototype final de localisation. Ces différentes étapes ont été testées sur quelques cas de mesures obtenues à partir du radiogoniomètre Doppler et des valeurs d'angles de gisement "générées". Les résultats obtenus en appliquant les trois méthodes de localisation sont présentés au paragraphe suivant.

3. Mise en œuvre de la fusion : comparaison des trois méthodes de calcul de la position du mobile (barycentre, médiane et mode)

Nous avons vu aux chapitres II et III qu'il y a trois façons de déterminer la position du mobile à partir des données issues des deux systèmes de localisation des mobiles qui sont :

- la détermination de la position du mobile par le calcul du barycentre des points d'intersection des cercles ou des droites,
- l'estimation de la position du mobile par radiogoniométrie par le calcul de la médiane et
- la détermination de la position du mobile par radiogoniométrie, par la recherche du mode des points d'intersection des droites (centre de la maille élémentaire la plus représentative).

Nous allons comparer les différents résultats obtenus par les trois méthodes sur quelques essais effectués en 8 positions différentes du mobile en milieu suburbain ou urbain.

En ces lieux, nous avons effectué des enregistrements à l'aide du dispositif de localisation par GSM, ensuite à partir des positions théoriques des émetteurs de radiodiffusion et du lieu d'essai. En prenant une variation allant de 2 à 10 degrés autour de l'angle vrai, on génère des valeurs angulaires comparables à celles qui auraient pu être mesurées. A partir de ces deux sources d'information, nous présentons au tableau 4, une synthèse des résultats obtenus.

Distance entre position GSM et lieu d'essai	Gsm	Radiogoniometrie		Variation angulaire
		Mediane	Maille (mode)	
	78-225 m 439-582 m	67- 200 m 452-532 m		
	Distance entre position GSM et position radio Doppler			
Distance entre position radio Doppler et lieu d'essai	Lieu d'essai	Radiogoniometrie		2° 10°
		Mediane	Maille (mode)	
	6-60 m 90-300 m	8-50 m 100-300 m		
	Distance entre position radio Doppler et lieu d'essai			

43-200 m (75%)
432-650m

Tableau 4: Synthèse des essais en 8 positions: distances entre les positions du mobiles estimées suivant les trois méthodes décrites.

Sur toutes les mesures effectuées en ces 8 endroits différents choisis en zone suburbaine et urbaine, on obtient les résultats suivants.

Dans le tableau du haut du tableau 4, les écarts de distance entre les positions obtenues par GSM et celles obtenues par radiogoniométrie Doppler (par les deux méthodes de traitement :

médiane et mode), varie de 67 à 225 mètres dans la majorité des cas notamment lorsque l'erreur de mesure d'angle de gisement ne dépasse pas 2 degrés. Ces écarts atteignent 582 mètres dans des cas défavorables lorsque les erreurs de mesures d'angle de gisement ne dépassent pas 10 degrés.

Si l'on utilise une carte embarquée à bord du mobile qui permet de circonscrire la zone de localisation du mobile, les précisions de mesures sont améliorées. En effet, dans le tableau de gauche, en comparant la position du mobile estimée sur la carte à la position obtenue par GSM, l'écart de distance entre ces deux positions varie de 43 à 200 mètres dans 75% des cas et de 432 à 650 mètres pour des cas défavorables. Les écarts de distances entre le lieu d'essai et la position estimée par la médiane et le mode des points varient entre 6 et 60 mètres, lorsque l'on ne prend en compte que des variations angulaires de 2 degrés autour de l'angle théorique. Ces écarts de distance varient entre 90 et 300 mètres, lorsque l'erreur angulaire est inférieure à 10 degrés.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les algorithmes de fusion des données issues de chacun des deux systèmes de localisation de mobiles. Ces algorithmes sont fondés sur les méthodes de mesures développées pour chacun des deux systèmes et constituent des pistes envisageables pour le développement d'une maquette complète intégrant les deux systèmes.

Un début d'implémentation a été réalisé par le développement d'un logiciel qui s'insère dans le dispositif de localisation global et qui permet d'automatiser le procédé de localisation. Ce logiciel a été testé sur quelques cas des mesures obtenues, en milieu urbain ou suburbain, à l'aide du radiotéléphone GSM et sur quelques valeurs d'angles de gisement simulées avec des erreurs de mesures réalistes variant entre 2 et 10 degrés.

On note que la précision de localisation est variable selon l'environnement du mobile et des erreurs de mesures effectuées sur les différentes valeurs de TA obtenues et les angles de gisement des émetteurs FM. La détermination de la position du mobile par la recherche de la médiane ou du mode (maille la plus représentative) donne des résultats similaires, proches de ceux obtenus par GSM (barycentre des points d'intersection des cercles).

Dans 75% des cas des expérimentations effectuées, les écarts de distance entre la position estimée par GSM et le lieu d'essai varient entre 43 à 200 mètres. Ces écarts peuvent atteindre 650 mètres dans les cas défavorables. Les écarts de distance entre la position estimée par radiogoniomètre Doppler et le lieu d'essai varient entre 6 à 60 m si les erreurs de mesures d'angles de gisement ne dépassent pas 2 degrés. Ces écarts varient entre 90 et 300 mètres à condition que les erreurs de mesures d'angle ne dépassent pas 10 degrés. Les écarts entre la position déterminée par GSM et la position estimée par radiogoniomètre Doppler varient de 67 à 200 mètres si l'erreur angulaire ne dépasse pas 2 degrés. Ces écarts se situent entre 400 et 600 mètres dans des cas défavorables et à condition que l'erreur de mesure d'angle n'excède pas 10 degrés.

Cette étape préliminaire que nous venons de présenter pourra être reprise pour affiner le dispositif final. Une autre piste pour l'obtention du résultat final à partir des deux systèmes pourrait consister à, définir des domaines décrits par les points d'intersection des cercles d'une part, et ceux décrits par les points d'intersection des droites d'autre part, et à rechercher le domaine commun des deux.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif du travail qui fait l'objet de ce mémoire a consisté à, étudier la faisabilité puis à développer sous la forme d'une maquette fonctionnelle une solution de localisation offrant une disponibilité accrue en milieu urbain, ainsi qu'une précision comparable à celle des systèmes existants. La solution proposée utilise deux capteurs indépendants qui tirent leurs informations d'une part, d'un réseau de radiotéléphonie cellulaire GSM sans intervention de l'opérateur et d'autre part, de la mesure des angles de gisement des émetteurs d'un réseau de radiodiffusion dans la bande des 100 MHz.

Nous nous sommes attachés dans ce travail à trouver et à mettre en œuvre d'une part, une solution originale permettant l'auto localisation d'un mobile du réseau de radiotéléphonie cellulaire GSM sans intervention de l'opérateur et d'autre part, une méthode de mesure des angles de gisement des émetteurs susceptibles de minimiser les erreurs générées par la propagation par trajets multiples en milieu urbain et suburbain.

Le principe de la localisation par le réseau de radiotéléphonie cellulaire GSM repose sur la mesure du temps de propagation des signaux qui transitent entre le mobile qui cherche à se localiser et au moins trois stations d'émissions fixes distinctes du réseau GSM. Cette mesure de temps est réalisée par le réseau et codée sous le paramètre Timing Advance. Pour obtenir des valeurs de TA en provenance d'au moins trois stations de base distinctes il faut effectuer plusieurs changements de stations de base ou handovers inter-BTS (Base Transceiver Station).

Deux solutions techniques ont été développées : l'une utilisant une antenne directive tournant autour de son axe dans son plan azimutal, l'autre étant basée sur l'introduction d'une source agile en fréquence. Le système muni de l'antenne directive et de la source de brouillage agile en fréquence a été expérimenté en milieu urbain et suburbain. Quelques problèmes ont été rencontrés parmi lesquels on peut citer : une insuffisance du nombre de BTS pour localiser le mobile, les coupures de communication intervenues au cours de l'expérimentation du fait d'un niveau trop élevé des perturbations apportées ou d'une atténuation trop forte du signal émis vers la BTS. Ces problèmes n'ont été rencontrés que dans 20% des cas des expérimentations effectuées. Dans 80% des cas, des précisions de localisation allant de 125 à 500 mètres ont été obtenues sachant que la précision intrinsèque de mesure de TA est de 550 mètres. Nous avons proposé une méthode de filtrage des valeurs de TA qui consiste à effectuer une moyenne géométrique de toutes les valeurs de TA obtenues sur la station de base ou sur toutes les cellules appartenant à cette station de base. Cette méthode a été testée sur quelques cas qui conduisent à des précisions de 200 mètres en moyenne. De façon générale, les expérimentations ont montré que les précisions dépendent essentiellement de la précision de la mesure des distances entre la station de base et le mobile (TA) et de la disposition relative des stations de base servant à la localisation autour du point de mesures. Remarquons aussi qu'un tel procédé est exigeant vis à vis du réseau et que l'approche de laboratoire présentée dans ce mémoire ne pourrait être généralisée qu'avec l'accord et l'aide des opérateurs.

Nous avons ensuite étudié un principe de localisation basé sur la radiogoniométrie et nous avons tout d'abord considéré des antennes présentant un diagramme de rayonnement particulier. Des antennes spécifiques ont été développées et optimisées pour un fonctionnement respectivement autour des fréquences de 100 MHz, 475 MHz et 900 MHz. Elles sont associées à un dispositif de mesures d'angles de gisement. L'erreur intrinsèque en milieu dégagé est de 5 degrés.

Ces antennes ont été utilisées pour étudier, l'influence des phénomènes de trajets multiples ou de conditions différentes de propagation sur la précision des mesures angulaires dans les trois gammes de fréquences pour des configurations géométriques de mesures simples. Une série d'expérimentations a permis de noter, qu'en absence du signal direct entre l'émetteur et le récepteur, les signaux réfléchis sur les arbres ou les bâtiments sont prépondérants par rapport aux signaux diffractés sur les arêtes des bâtiments. Les écarts angulaires entre l'angle théorique et l'angle mesuré, dépendent surtout de la disposition du récepteur et de l'émetteur par rapport aux obstacles notamment les bâtiments. Ces écarts peuvent être importants dans les cas où seuls les rayons diffractés ou réfléchis atteignent le récepteur, et que la distance entre l'émetteur et le récepteur est de quelques dizaines de mètres. Ces cas de figures représentent des cas défavorables pour la localisation.

Ces essais nous ont permis de proposer une méthode de mesure qui diminue considérablement les erreurs générées par les trajets multiples. Elle consiste à faire la mesure de l'angle de gisement en plusieurs positions proches sur un même axe longitudinal, sur chacune des fréquences diffusées par la station d'émission considérée, et à calculer la moyenne glissante des valeurs obtenues. Des essais utilisant cette méthode sur les émetteurs conventionnels éloignés du récepteur (1 km au moins) montrent que, les écarts angulaires en milieu suburbain ne dépassent pas 10 degrés dans la plupart des cas.

Les mesures dans les trois bandes de fréquences centrées autour de 100 MHz, 475 MHz et 900 MHz ont montré que, les performances obtenues en terme de précision de mesure d'angle de gisement sont identiques. Il n'y a donc pas lieu d'exploiter simultanément les trois bandes de fréquences pour une mise en œuvre du système de localisation par radiogoniométrie. Le choix d'une bande de fréquences sera imposé par la facilité de mise en œuvre et d'intégration dans le dispositif de mesures. Compte tenu des ces contraintes et de la disponibilité de nombreuses sources d'émission en milieu urbain, nous avons choisi la bande FM (88-108 MHz) et l'utilisation d'un radiogoniomètre Doppler du commerce ayant une précision théorique de l'ordre de 10 degrés. Il a été caractérisé et ses performances ont été évaluées en milieu suburbain et en milieu urbain dans des configurations de mesures simples. On a pu noter qu'en présence du signal direct, le signal réfléchi sur le mur d'un bâtiment engendre des écarts supplémentaires qui peuvent atteindre 25 degrés dans des cas défavorables. Pour s'affranchir des erreurs dues au phénomène de multichemins, nous utilisons la méthode de mesures proposée dans la première partie de l'étude. Plusieurs mesures sont effectuées sur un émetteur donné en plusieurs positions du mobile, un traitement statistique permet d'extraire l'angle de gisement de l'émetteur avec la meilleure précision possible et de déterminer la position du mobile.

Les précisions de mesures obtenues varient entre 2 et 10 degrés dans la plupart des cas. La précision de localisation varie entre 72 et 350 mètres. Ces précisions dépendent de trois paramètres principaux à savoir : la distance entre le récepteur et chacun des émetteurs utilisés, la disposition relative de ces émetteurs par rapport au récepteur et l'erreur angulaire obtenue sur la mesure d'angle de gisement de l'émetteur.

Les premiers essais réalisés avec les deux prototypes de systèmes de localisation par radiogoniométrie et par radiotéléphone GSM développés montrent que les précisions obtenues peuvent être comparées à celles des dispositifs conventionnels. Cependant ils restent non satisfaisants en terme de disponibilité. Pour cette raison nous avons envisagé de coupler les deux techniques de mesures afin d'exploiter leur complémentarité. Des algorithmes de traitement des données ont été élaborés et un début d'implémentation a été entrepris. Ce logiciel a été testé sur quelques cas de mesures en milieu urbain ou suburbain avec le radiotéléphone GSM et sur quelques émetteurs pour lesquels l'erreur angulaire est inférieure à 10 degrés. L'estimation de la position du mobile par radiogoniométrie Doppler donne des résultats similaires, proches de ceux obtenus par radiotéléphonie GSM. Dans 75% des cas de mesures effectuées, les écarts de distance entre les positions obtenues par radiotéléphonie GSM et celles obtenues par radiogoniométrie Doppler varient entre 67 et 225 mètres. Dans certains cas défavorables, ces écarts peuvent se situer entre 400 et 600 mètres.

Ces résultats constituent une première étape du dispositif de fusion des données des deux capteurs développés. Les logiciels et algorithmes développés pourront être repris pour affiner le dispositif final.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] VIOLET A., BAUDIN J. et FOMBONNE P. - " La radiolocalisation " - Cours de l'Ecole Supérieure d'Electricité - 1972 - No 2263.
- [2] CONDAMINES J.P. - " Antennes cadre et radiogoniométrie " - dans Radio-plans pages 570/83 à 570/86.
- [3] WICKMAN J. et HAKANSON A. - " Localisation associée au GSM " - Swedish Telecom Radio, Malmö SUEDE, rubrique "la chronique du navigant" du n°153 de NAVIGATION Janvier 1991. Article présenté au colloque NAV 90 "Land and Information System" du Royal Institute of Navigation, Warwick, 18-20 septembre 1990.
- [4] SILVENTOINEN M. et RANTALAINEN - " Mobile station locating-being watched by big brother? " - dans Mobile Europe The Wireless communications magazine for Europe, september 1995 vol. 5 N° 9.
- [5] MOULY M. et DORNSTETTER J.L. - " The pseudo-synchronization: a cortless feature to obtain the gains of a synchronised cellular networks " - MRC Mobile Radio Conference à Nice-1991-pages 51 à 55.
- [6] MOULY M. et DORNSTETTER J.L., Brevet INPI: 8905469/en " Procédé de pseudo-synchronisation d'un réseau de communication à multiplexage dans le temps et applications "
- [7] MOULY M. et PAUTET M.B - " The GSM Global System for Mobiles Communications ", publié par les auteurs - 1992.
- [8] HODGES M. - " The GSM Radio Interface " - British Telecom Research Laboratories Technol J vol. 8 n° 1 de Janvier 1990.
- [9] SMITH B.L. et CARPENTIER M.H. - "The Microwaves Engineering Handbook volume 2-Microwaves circuits, antennas and propagation " - Editions Chapman et Hall.
- [10] KENNEDY H.D. et WHARTON W. - " Direction Finding Antennas and Systems " 2nd édition - Chapitre 38 - " Antenna engineering Handbook-second edition " -JOHNSON R.C. et JASIC H. - Editions Mac Graw Hill Publishing Company - 1984.
- [11] JEHL J.F. - " Le système <<GPS>>: radionavigation par satellites " - dans l'Onde Electrique - Novembre - Décembre 1992-Vol. 72 N° 6.

- [12] MUNIER D., CEPE - " Le système NAVSTAR-GPS " - article publié dans le n° 511 de Toute l'électronique traitant des systèmes de navigation et de positionnement par satellite, TLE - Février 1986.
- [13] SU S.L. et LI V.O.K. - " Time synchronization and Ranging for multihop Mobile radio networks " - Proceedings IEEE INFOCOM 86, 5th conference "computer and communication integration design, analysis, management", Miami (Floride) 8-10 Avril 1986 pages 636 à 640.
- [14] DORNSTETTER J.L. - " The future Pan European Mobile Radiotéléphone System - a short overview " - 3rd international colloquium Proceedings du 2 - 4 Novembre 1988, Conférence "Coding Theory and Applications" pages 247 à 254.
- [15] TATKEU C. - " Etude et réalisation d'un dispositif de localisation de mobiles terrestres fondé sur l'utilisation des signaux des stations fixes d'un réseau de radiotéléphone GSM et d'émetteurs de radiodiffusion existants " - rapport intermédiaire référence 1995-036N de l'INRETS - Octobre 1995.
- [16] TATKEU C. - " Etude et réalisation d'un dispositif de localisation de mobiles terrestres fondé sur l'utilisation des signaux des stations fixes d'un réseau de radiotéléphone GSM et d'émetteurs de radiodiffusion existants " - rapport intermédiaire référence INRETS 96-018N, Decembre 1996.
- [17] VANDAMME J. - " Modélisation des perturbations engendrées par la présence d'obstacles sur la propagation des ondes hyperfréquences en milieu urbain ; application à la localisation de véhicules et aux télécommunications en tunnel " - Thèse de Doctorat soutenue à l'Université de Lille I, 7 Mai 1996.
- [18] ETSI (European Technical Standardization Institute) : Spécifications et recommandations concernant le GSM :
- [03.09] Handover Procedures
 - [03.22] Functions related to mobile station (MS) in Idle Mode
 - [04.06] MS -BS system interface data link (DL) Layer Specification
 - [04.08] Mobile Radio interface layer 3 specification
 - [05.01] Physical layer on the radio path : General description
 - [05.02] Multiplexing and multiple access on the radio path
 - [05.05] Radio transmission and reception
 - [05.08] Radio Sub-System link control
 - [05.10] Radio Sub-System synchronization
 - [08.08] MSC - BSS interface layer 3 specification
 - [08.58] MSC - BTS interface layer 3 specification
- [19] KOOV J.D.M et CURLEE T.N.,WB6UZZ : "Transmitter Hunting, radio direction finding simplified ", TAB Books, Division of MacGraw-Hill inc. blue Ridge summit, PA 17294-0850.
- [20] DURIEU C., ALDON M.J et MEIZEL D. - " multisensory data fusion for localisation in mobile robotics " - dans la revue 'Traitement du Signal' 1996 Vol. 13 n° 2.

- [21] DELPLANQUE M., DESODT A.M., and JOLLY D. - "la fusion des données " Fev 1995 intermediary synthesis of the laboratory 'Centre d'automatique de Lille' in France.
- [22] DESODT-LEBRUN A.M. - " la fusion des données " extrait de la collection 'Techniques de l'Ingenieur, Traité mesures et contrôle'.
- [23] POSTAIRE J.G. - " De l'image à la décision Analyse des images numériques et théorie de la décision " - DUNOD-Informatique.
- [24] TATKEU C., BERBINEAU M. et HEDDEBAUT M. - " *A new approach to improve mobile localisation based on angular deviation measurements in urban areas* " - Communication au **congrès international PIMRC'97**, Helsinki, 1-4 sept 1997.
- [25] DON TORRIERI J. - " *Stastical theory of passive location system* " - IEEE Transactions on Aerospace and Electronic system Vol AES 20 n° 2 March 1984.
- [26] ROSS - " The specification and measurement of polarization error on Adcock type direction finders " - IEEE Proc.96 III, n° 42 Juillet 1949.
- [27] KEEN R. - " Wireless direction Finding " Chapitre 1, Editions Iliffe & Sons, 1947
- [28] - " Caractéristiques du système mondial de la détermination de la position GPS-NAVSTAR " - document OTAN accord de standardisation STANAG 4294 Juillet 1984
- [29] FOMBONNE P. - " La dégradation géométrique de la précision " - Navigation n°131, Juillet 1985
- [30] DUERR T.E. - " Effect of terrain masking on GPS: Position Dilution Of Precision (PDOP) " - Journal of the Institute of Navigation, Vol 39 n° 3 1992
- [31] NARD G. - " Réception et traitement des données du GPS et des corrections du GPS - différentiel " - Navigation n° 152 Octobre 1990
- [32] HUNTER T., KOSMALKI W. et TRUONG P. - " Vehicule Navigation using différentiel GPS " - IEEE Plans' 90, 20-23 March 1990
- [33] BONIN G., NARD G. et RABIAN J. - " Localisation très précise de véhicules en zone urbaine " - Navigation n° 150, Avril 1990
- [34] LEE H.B - " A novel Procedure for Assessing the accuracy of hyperbolic multilateration systems " - IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol AES 11 n° 1 janv 1975
- [35] BOTTON S., DUQUENNE F., EGELS Y., EVEN M. et WILLIS P. - " GPS Localisation et Navigation " - Editions Hermes
- [36] ABRIAT E. - " Satellite-based Radiodetermination Techniques & Systems Assessment " - Final Report Work Package 3.1 Direction de la recherche SNCF Deutsche Bahn AG
- [37] - "Operation and service manual for 5000 series Radio Direction Finding Systems " - Documents technique de Doppler Systems INC.

- [38] Association Française de robotique industrielle - " Localisation des robots mobiles ", Recueil des contributions du groupe de travail " Technologies " de la Commission robotique Non Manufacturière Mai 1992- Février 1993, document INRETS LI-Aut 137.
- [39] BRIQUET P., VIANNEZ S. et VACHER J.L. - " Compte rendu de mesures des essais de localisation dynamique de véhicules à Paris avec un système GPS " - 1997.
- [40] LAGRANGE X., GODLEWSKI P. et TABBANE S. - " Réseaux GSM-DCS " 2nd édition - HERMES 1996.
- [41] LAYER F., ENGLERT T., FRIESE M., RUF M. -" Locating mobile receivers using DAB single frequency networks ", 3rd Acts Mobile Communication Summit on Demonstrating the futur enwireless information infrastructure, Conference Proceedings Vol 2. pages 592-597, June 8-11 1998, Rhodes Greece.
- [42] KELLER J.B 'Geometrical Theory of Diffraction ' J. Opt.Soc of America-vol. 52 n°2 February 1962 pp 116-130
- [43] KOUYOUMJIAN R.G and PATHAK P.H : 'A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an edge in a perfectly conducting surface' Proceeding of IEEE vol. 62 n° 11 p1448-1461 November 1974
- [44] LUEBBERS R.J : 'Finite conductivity Uniform GTD versus Knife Edge Diffraction in prediction of propagation Path Loss' IEEE Trans. On Antennas and propagation Vol. AP 32 n° 1 January 1984.
- [45] VANDAMME J, BARANOWSKI S. and MARIAGE P. : 'High frequency Diffraction by a Dielectric Wedge Three Dimensional Study' PIMRC'95 27-29 Sept 1995 Toronto,Canada.
- [46] DRANE C., RIZOS C. - " Positioning Systems in Intelligent Transportation Systems " - Artech House - Boston - 1997
- [47] DRANE C., MACNAUGHTAN M., SCOTT C. - " Positioning GSM Telephones " - IEEE Communications magazine - April 98.
- [48] REMY J.G, CUEUGNIET J., SIBEN C. " Systèmes de radiocommunications avec les mobiles " Collection Technique et Scientifique des Télécommunications – EYROLLES – Janvier 1988.

ANNEXES

Annexe I:

1. Etude du fonctionnement du synthétiseur et du VCO du mobile de tests GSM

Les expérimentations effectuées consistent à étudier les évolutions de la tension de commande du VCO dans divers modes de fonctionnement : mise sous tension avant insertion du code PIN (personal Identification Number), mode veille et mode dédié afin d'établir la correspondance entre la tension de commande du VCO du mobile de tests et les fréquences des 124 canaux radiofréquences disponibles pour les opérateurs de GSM.

A l'aide du banc de mesures présenté sur la figure I.1, nous avons pu étudier l'évolution de la tension de commande du VCO du mobile de tests, au cours du temps en fonction de son mode de fonctionnement et établir ainsi les relations entre les valeurs de la tension et de la fréquence.

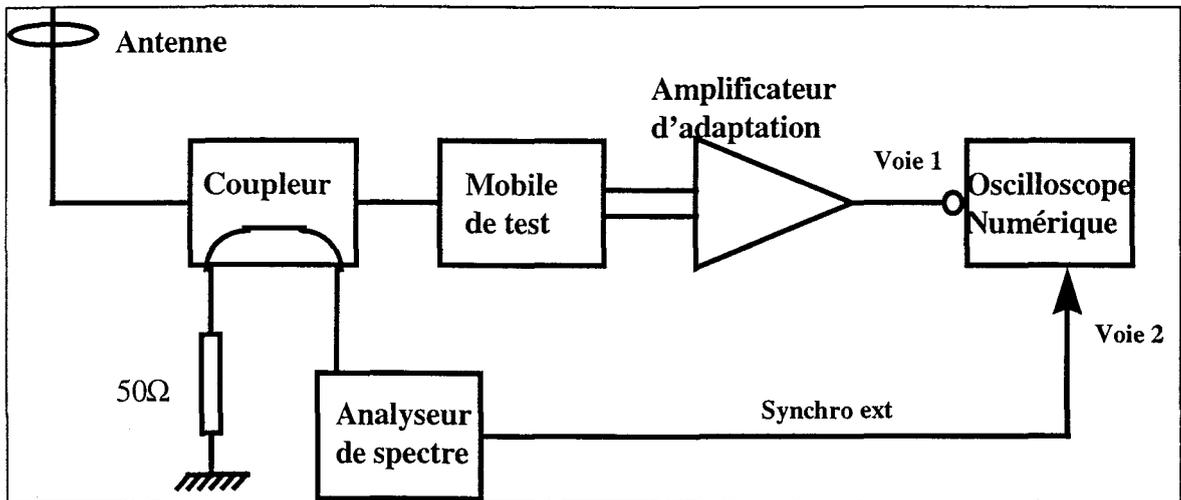


Figure I.1 : Banc de Mesures d'initialisation des paramètres de mesures.

a)- Antenne du mobile de tests remplacée par une charge adaptée

En remplaçant l'antenne omnidirectionnelle du mobile par une charge adaptée, à la mise sous tension du mobile et avant d'insérer le code utilisateur (code PIN), on peut mesurer avec un oscilloscope l'évolution de la tension de commande du VCO en fonction du temps comme illustré sur la figure I.2. La fréquence de réception correspondante peut être mesurée en parallèle avec un circuit de détection à diode PIN et un analyseur de spectre.

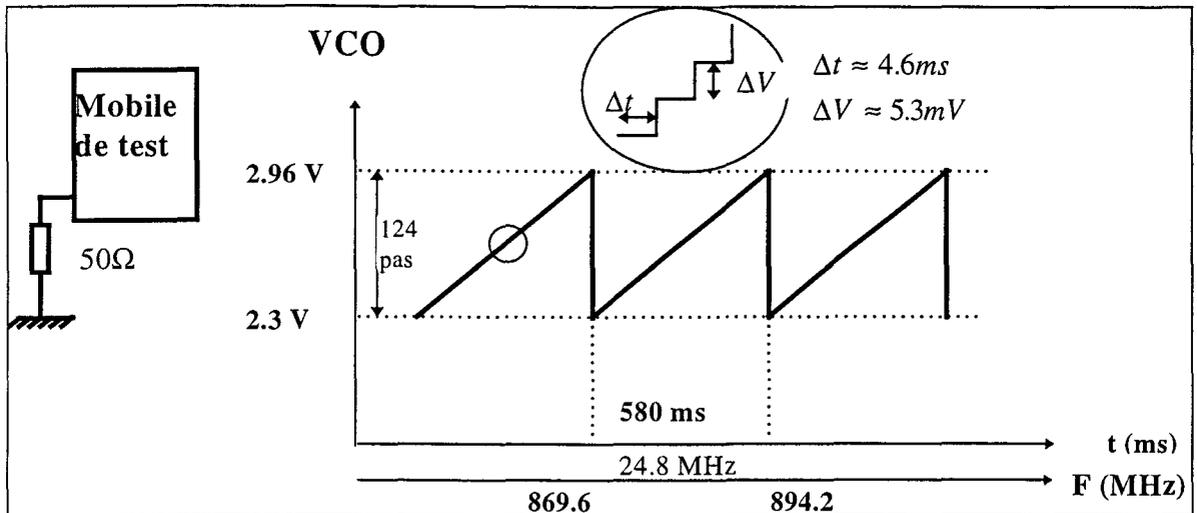


Figure I.2 : Mobile scrutant les stations de base du réseau

A la mise sous tension, le mobile scrute de façon séquentielle l'ensemble des 124 canaux radiofréquences dans la bande de fréquences du lien descendant définie dans le GSM. En effet, les canaux spécifiques à un opérateur donné ne seront indiqués au mobile qu'après insertion du code PIN. Cette opération se traduit par le passage, par toutes les valeurs possibles de la tension de commande du VCO. D'où l'évolution en marches d'escalier de la tension au cours du temps présentée figure I.2. La périodicité de cette évolution est de **580 ms** environ.

On constate que la fréquence évolue entre les valeurs **869,6** et **894,2 MHz** soit une dynamique en fréquence de **24,6 MHz** correspondant à la largeur de chaque bande GSM. En ajoutant aux valeurs extrêmes la valeur de la fréquence intermédiaire FI de l'oscillateur local, on obtient bien une excursion de fréquences entre les deux bornes extrêmes de la bande GSM allouée aux voies descendantes : 935 - 960 MHz.

La tension évolue entre les valeurs **2,3** et **2,96 Volts** soit une dynamique de **0,66 V** à répartir entre les **124** canaux radiofréquences RF des opérateurs du réseau GSM soit **5,32 mV** par canal RF. Cette valeur est voisine de la précision des appareils de mesures utilisés, il convient donc d'augmenter la dynamique de la tension à l'aide d'un amplificateur différentiel qui permet de minimiser les erreurs de mesure en multipliant par six les écarts entre les canaux voisins. Les écarts inter - canaux passent de 5,32 mV à 32 mV.

b)- Radiotéléphone en mode veille

Lorsque le mobile de tests est en mode veille, l'essentiel de son activité consiste à analyser les informations présentes sur le canal de diffusion (BCCH) des stations de base qui l'entourent (au plus six) ETSI [03.22], [04.08] et en particulier, il effectue des mesures sur le niveau et la qualité des signaux reçus en provenance de ces stations de base. L'allure de la tension de commande du VCO relevée à chaque alternance est présentée figure I.3 et traduit l'activité du mobile.

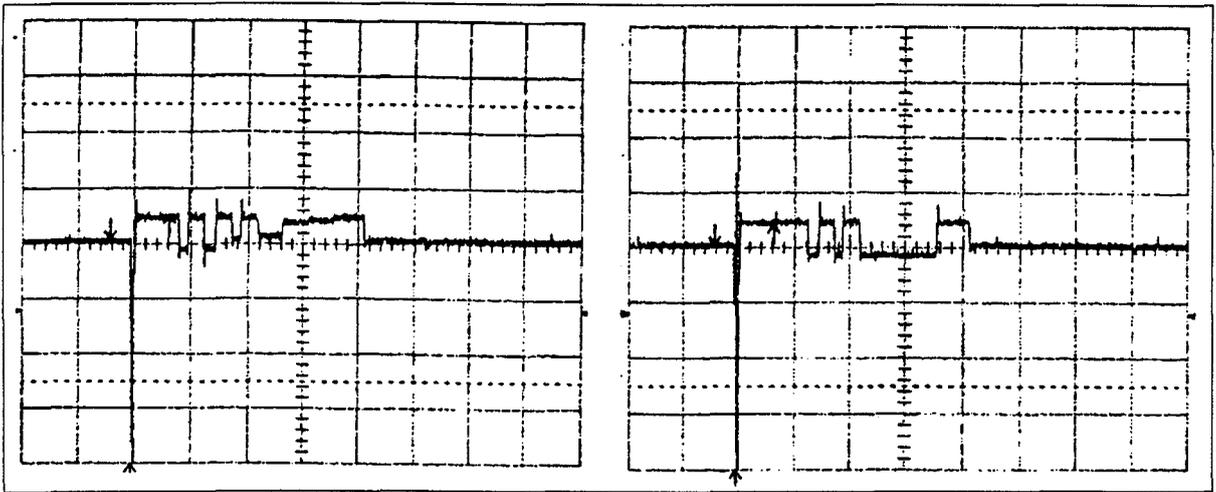


Figure I.3 : Tension de commande du VCO au cours du temps en mode veille

c) - Radiotéléphone en mode dédié ou mode de communication normale :

Lorsque le mobile est connecté à une antenne de réception et qu'une communication est établie, l'évolution du signal de commande du VCO au cours du temps prend l'allure illustrée figure I.4. Pour expliquer les paliers de tension observés sur la courbe de la figure I.4, la figure I.5 présente schématiquement l'évolution des Time-Slots sur les canaux radiofréquences quand le mobile transmet (Uplink), reçoit (Downlink) ou analyse les informations des BCCH voisins (Downlink adjacent cell -BCCH).

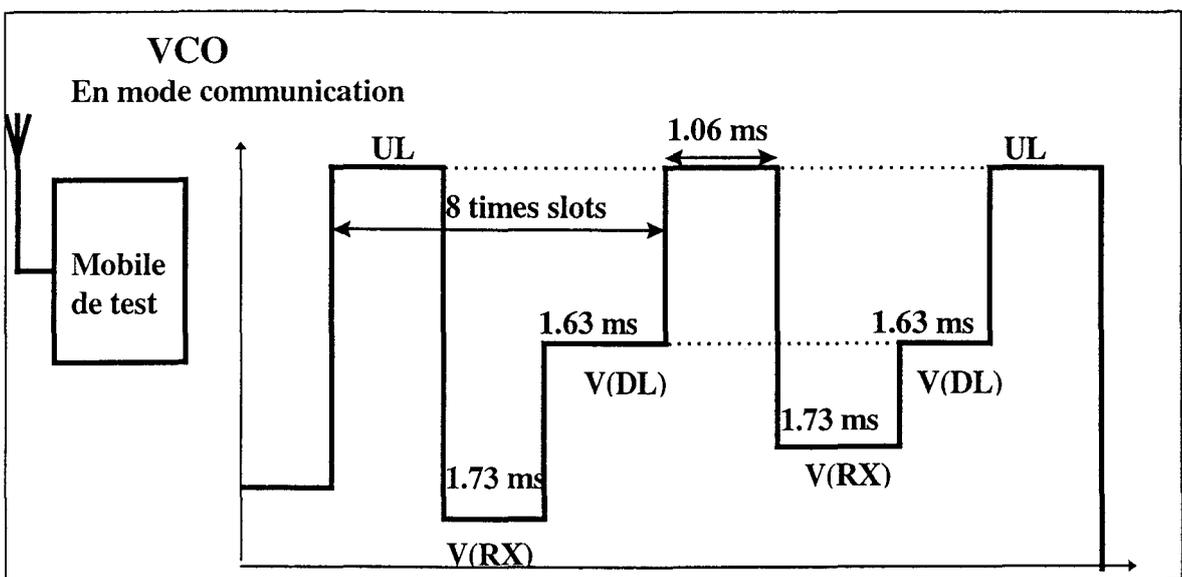


Figure I.4 : Tension de commande du VCO au cours du temps en mode dédié.

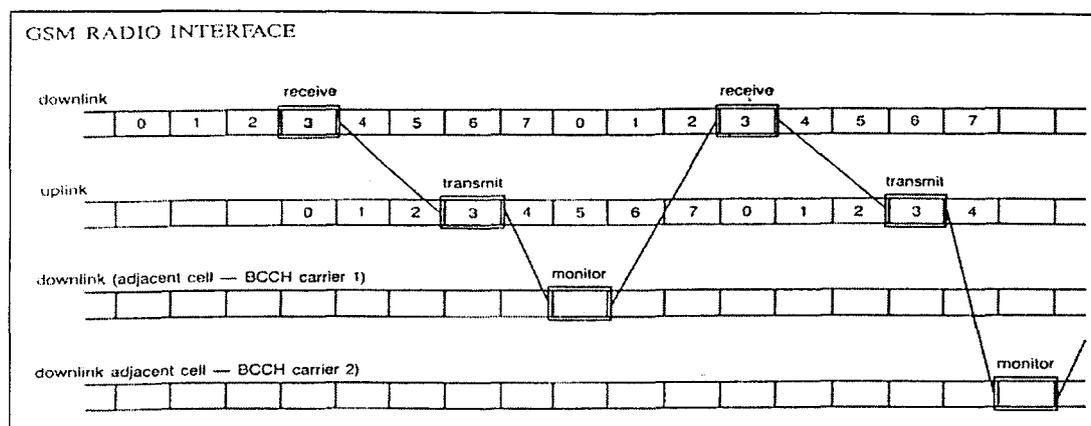


Figure I.5 : Evolution des TimeSlot au cours du temps sur les différents canaux RF

Sur la figure I.4, le palier V(DL) correspond au passage sur le canal "downlink" de la figure I.5 (receive), le palier UL correspond au passage sur le canal "Uplink" et les différents paliers V(RX) correspondent successivement à l'analyse des BCCH des stations de base adjacentes représentées par le passage "downlink adjacent cell -BCCH i" sur la figure I.5.

Lorsque le mobile est en mode dédié, la périodicité de l'évolution de la tension de commande du VCO est équivalente à la durée d'une trame soit encore **8 TimeSlots** de durée **4,616 ms** ($8 \times 577 \mu\text{s} = 4,616 \text{ ms}$). Pendant chaque trame, le mobile reçoit durant **1,63 ms** environ sur le lien descendant du canal de trafic alloué, puis il émet en avance pendant **1,06 ms** environ sur le lien montant du canal de trafic dédié et une fois sur six durant **1,731 ms** le mobile reçoit sur le lien descendant du canal de diffusion des stations voisines.

Afin de préparer le développement de la source agile en fréquence, il est possible d'effectuer l'acquisition des tensions de commande du VCO, via une carte de conversion analogique-numérique d'un ordinateur de type PC. Un logiciel que nous avons développé à cet effet, permet de récupérer les données lues sur la carte et d'afficher la tension mesurée et la fréquence correspondante.

Un exemple d'acquisition via la carte A/N est présenté sur planche 1 ci-après où **RX** représente la tension correspondant à la fréquence de réception sur le lien descendant dédié et **RX1** à **RX6** représentent les tensions relatives aux fréquences des canaux de diffusion des BTS environnantes. On peut apercevoir les **23 premières trames** acquises (**23*8 premiers TimeSlots** de durée 106 ms). On peut y distinguer les tensions évoquées ci-dessus (RX 1 à 6 et RX en gras). On peut constater que le signal est périodique de période **6 trames** (**6*8 TimeSlots**). L'évolution de la tension du VCO relative à la planche 1 est donnée sur la figure I.6.

Les différents essais ont fait apparaître une dérive thermique du VCO, il conviendra donc de calibrer la source agile en fréquences avant la localisation.

Numéro	Tension (mV)	Cellule	Fréquence(MHz)
1	3.997	RX1:	947.4
2	2.41	RX2:	937.8
3	2.43	RX3:	937.8
4	3.003	RX4:	941.4
5	3.134	RX5:	942.2
6	3.856	RX6:	946.6
	2.746	DL RX	939.8
7	3.995	RX1:	947.4
8	2.41	RX2:	937.8
9	2.431	RX3:	937.8
10	2.438	RX4:	937.8
11	3.12	RX5:	942
12	3.863	RX6:	946.6
	2.746	DL RX	939.8
13	3.994	RX1:	947.4
14	2.397	RX2:	937.6
15	2.428	RX3:	937.8
16	2.999	RX4:	941.4
17	3.131	RX5:	942.2
18	3.87	RX6:	946.8
	2.760	DL RX	939.8
19	3.989	RX1:	947.4
20	2.396	RX2:	937.6
21	2.431	RX3:	937.8
22	3.005	RX4:	941.4
23	3.133	RX5:	942.2
24	3.87	RX6:	946.8
	2.750	DL RX	939.8
25	3.993	RX1:	947.4

Planche 1 : Correspondance Tension - Fréquence

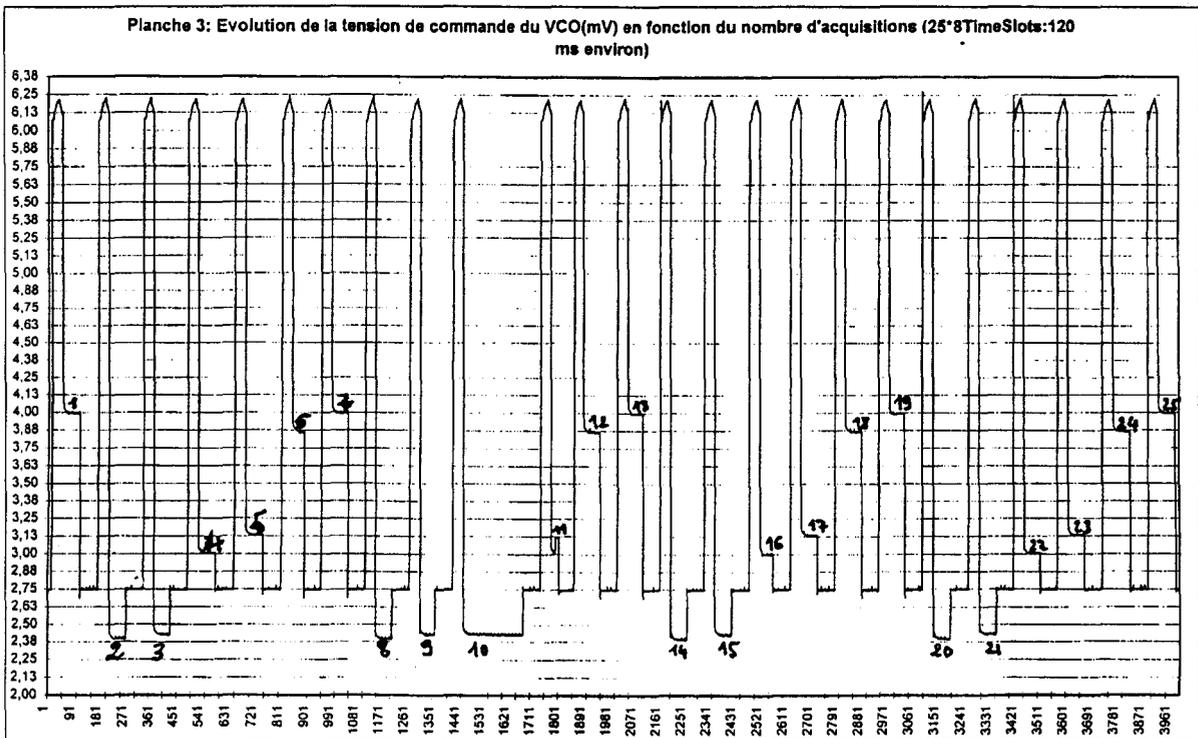


Figure I.6 : Tension du VCO du mobile au cours du temps (une multitrame).

2 Mise en œuvre d'une source de brouillage de fréquences pilotée par le VCO interne du mobile de tests

La source de brouillage agile en fréquence que nous avons envisagé de développer dans une première phase, est fondée sur le principe du brouillage de manière contrôlée de la qualité du signal d'un certain nombre de canaux. Les fréquences de brouillage sont générées par des VCO extérieurs commandés par le VCO du mobile de tests via la carte Analogique/Numérique du système présenté dans le paragraphe précédent et donc en phase avec les fréquences dédiées à la communication ou celles scrutées par le mobile.

Au dispositif on ajoute un système d'étalonnage pour éviter les mesures erronées dues à la dérive thermique de la tension de commande du VCO du mobile de tests et éventuellement un dispositif de modulation des signaux à envoyer. Le dispositif devra opérer des sauts de fréquence en moins de **2 ms** ce qui correspond au temps minimal nécessaire pour effectuer la mesure de la tension de commande du VCO sur le canal de trafic dédié. Un schéma synoptique du dispositif est donné figure I.7.

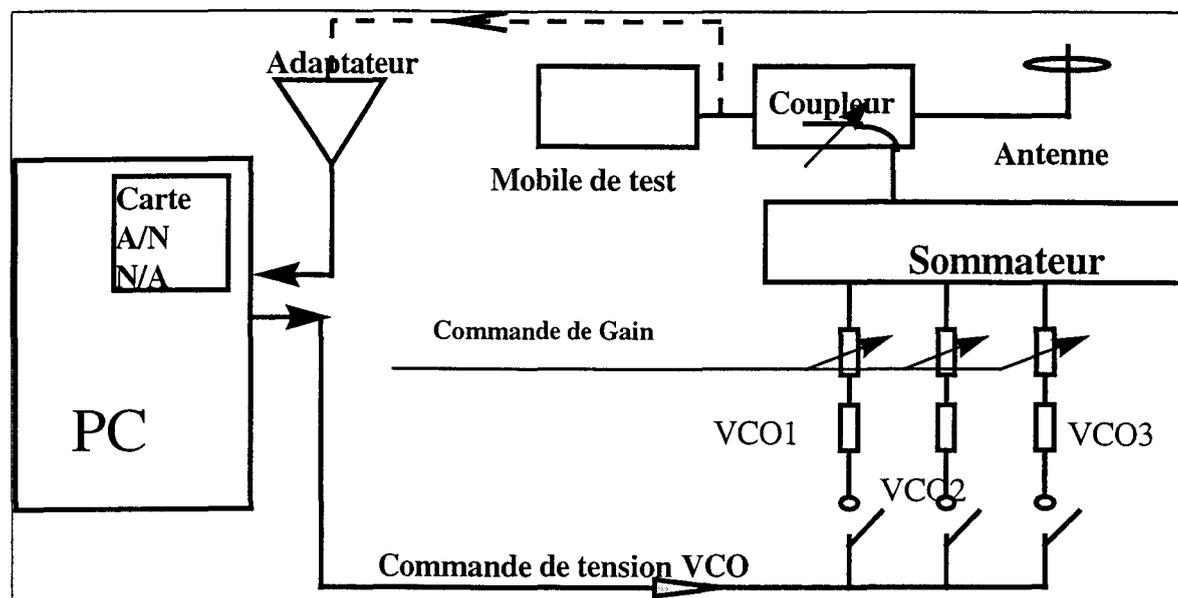


Figure I.7 : Schéma synoptique de brouillage de fréquences.

Du fait des dérives thermiques du VCO du mobile de tests, cette source agile exige un étalonnage très précis en fonction des évolutions de la tension de l'oscillateur local de l'Orbitel avant et parfois pendant chaque expérimentation.

Les différents essais réalisés ont mis en évidence des décalages en fréquences intolérables pour le bon fonctionnement de la source de brouillage. Pour cette raison nous avons envisagé de commander la source agile en fréquences, non plus à partir du VCO interne du mobile de tests, mais plutôt à partir de l'analyse des messages de signalisation associés au canal de trafic dédié. Les messages sont décodés par le mobile de tests sur lesquels, les valeurs des fréquences générées par le VCO interne du mobile sont présentes. Les résultats obtenus avec cette source agile en fréquence sont présentés dans le chapitre II de ce mémoire. Le schéma électronique de cette source est présenté dans l'annexe II.

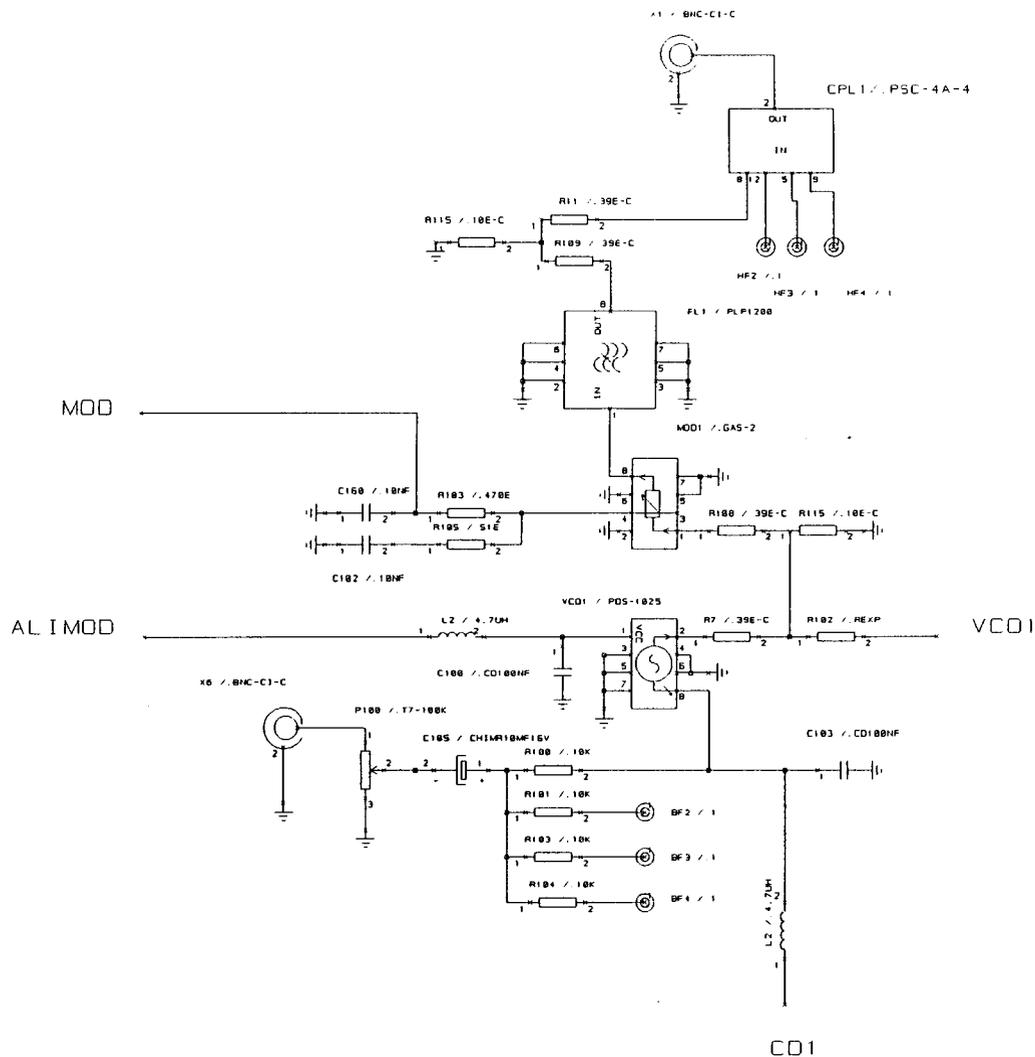
Annexe II:

1. Schémas de la carte de la source agile en fréquence développée

Aux deux pages ci après, sont présentés les schémas du circuit de la source agile en fréquence ; source agile développée dans le deuxième chapitre de ce mémoire.

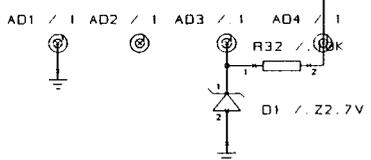
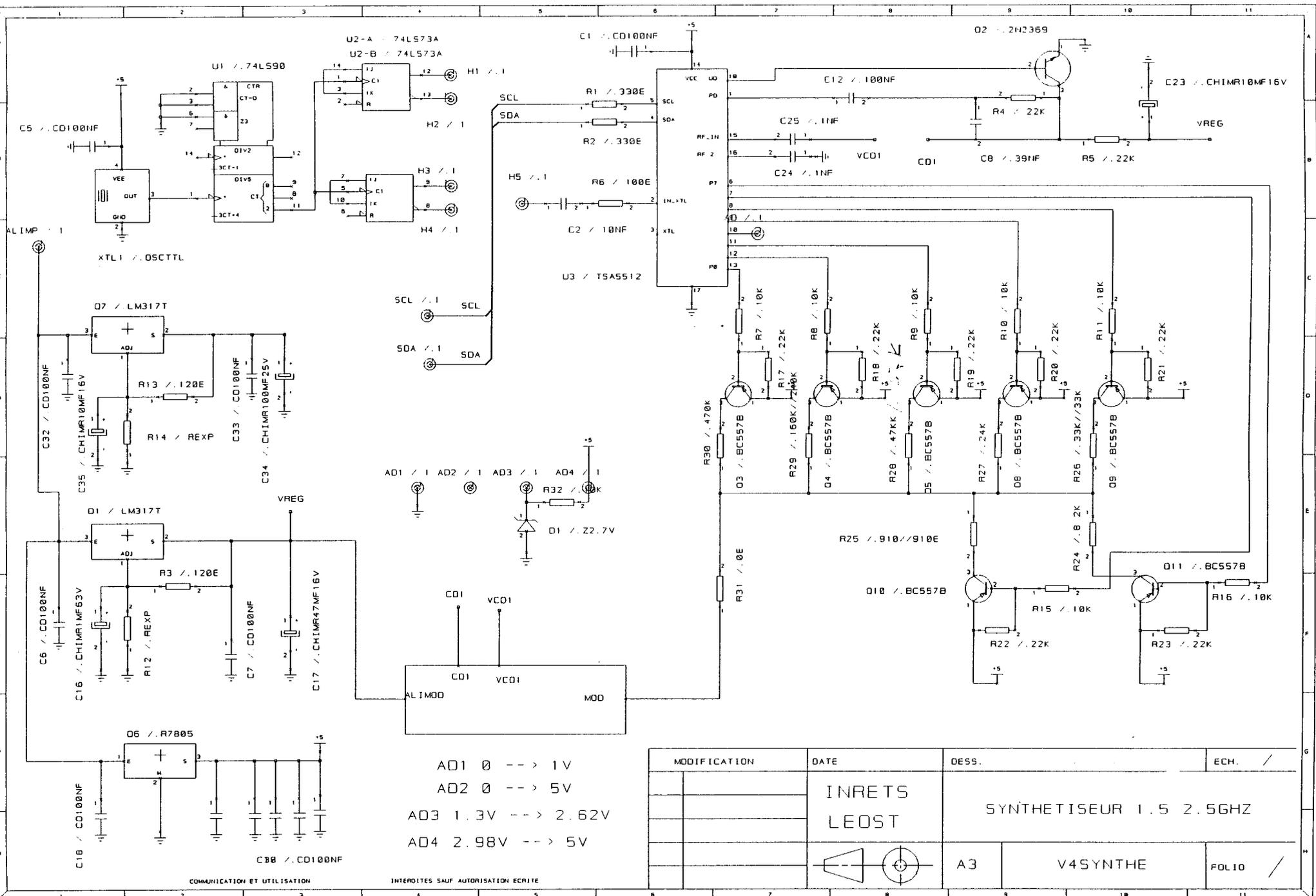
Sur la première page, est présenté le circuit du modulateur FM pour le fonctionnement dans la bande GSM ; et sur la seconde page, est présenté le circuit complet du synthétiseur de fréquences (modulateur inclus).

La source agile comporte quatre oscillateurs VCO, donc on peut commander simultanément quatre fréquences en sortie.



MODIFICATION	DATE 22/01/97	DESS.	ECH. /
	INRETS	MODULATEUR FM BANDE GSM	
	LEOST		
		A3	MOD4VCO
			FOL10 /

SV



- AD1 0 --> 1V
- AD2 0 --> 5V
- AD3 1.3V --> 2.62V
- AD4 2.98V --> 5V

MODIFICATION	DATE	DESS.	ECH.
		INRETS LEOST	
		A3	

SYNTHETISEUR 1.5 2.5GHZ	
V4SYNTHÉ	FOL10

Annexe III-1:

1. Résultats de calculs des diagrammes de rayonnement des antennes retenues dans les bandes FM, VHF et UHF

Sur les schémas des figures III.1 à III.3, nous présentons les diagrammes de rayonnement des antennes réalisées aux différentes fréquences. Ces diagrammes de rayonnement sont obtenus par simulation à l'aide du logiciel de calcul ELNEC.

Pour chacune des sous bandes de fréquences, nous présentons le diagramme théorique obtenu à deux fréquences.

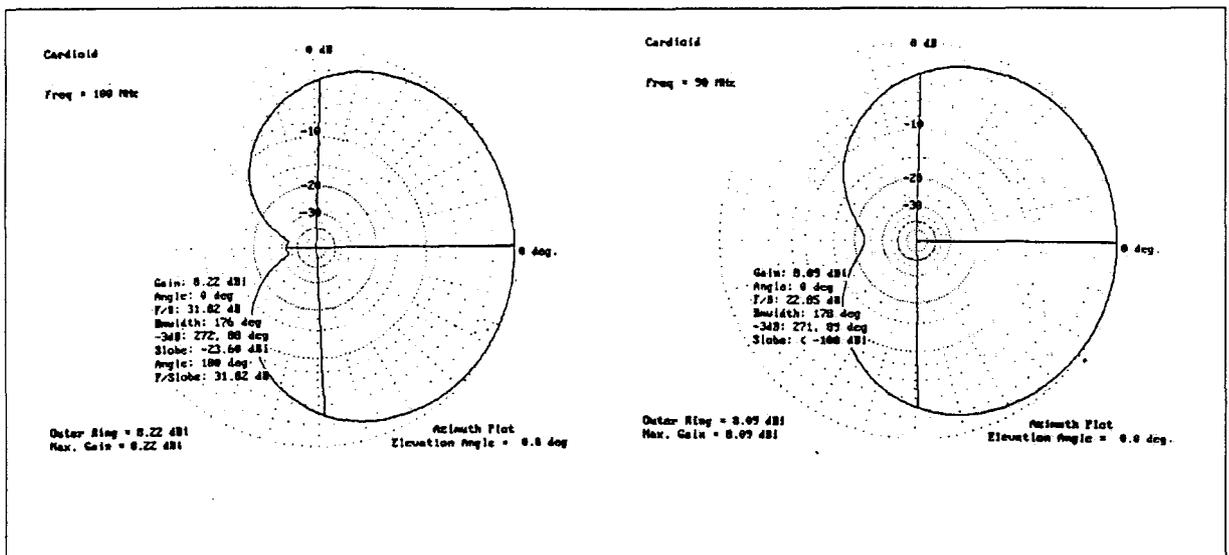


Figure III.1 : Diagrammes de l'antenne cardioïde utilisée aux fréquences de 90 et 100 MHz

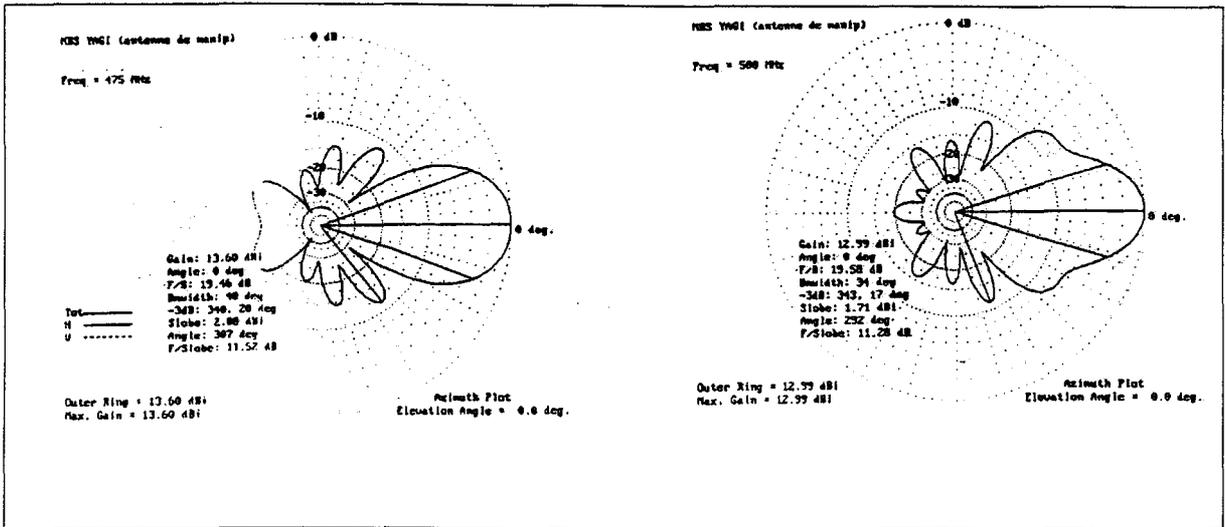


Figure III.2 : Diagrammes de l'antenne YAGI utilisée aux fréquences de 475 et 500 MHz

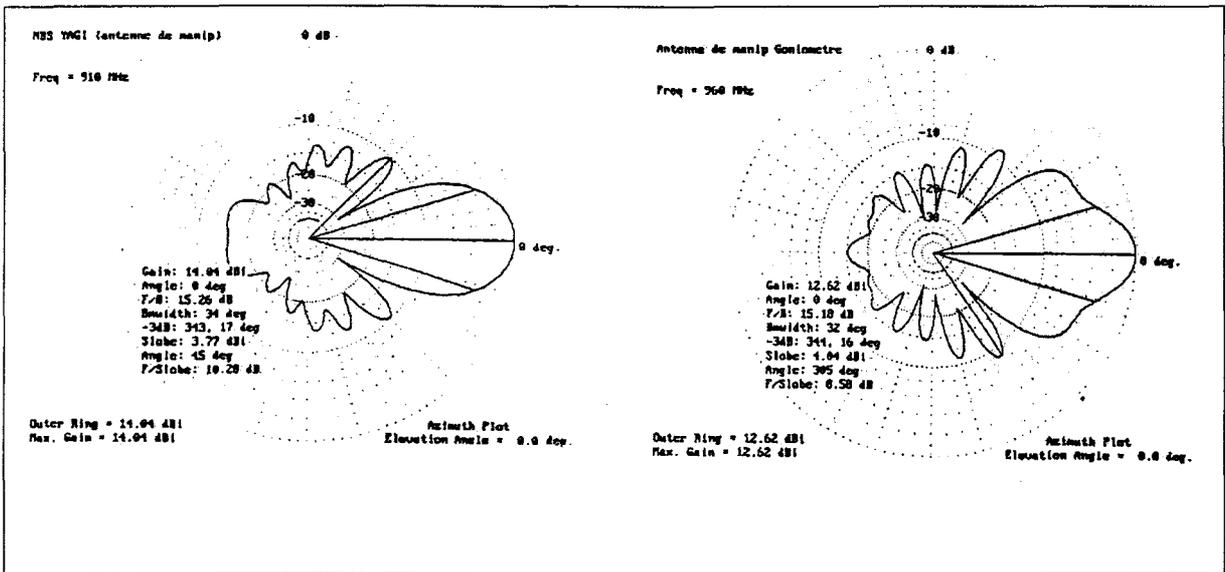


Figure III.3 : Diagrammes de l'antenne YAGI utilisée aux fréquences de 910 et 960 MHz

Annexe III-2:

1. Méthodes de traitement des données et d'extraction de l'angle de gisement de l'émetteur

Dans la plupart des mesures, à angle théorique constant, les relevés angulaires effectués sont sujets à des variations. Pour pallier ce problème et minimiser les erreurs, il convient d'effectuer un traitement des données.

On peut envisager de détecter et filtrer les variations brusques des mesures angulaires observées (au fur et à mesure de l'acquisition) afin d'éliminer les défauts. La détection peut se faire à l'aide d'un circuit dit "dérivateur" que l'on insère entre la sortie des données et l'entrée de l'acquisition.

Une autre façon de concevoir le procédé consiste à effectuer un traitement après l'acquisition des données. Dans ce cas, il faut développer des algorithmes de filtrages adéquats.

Il existe plusieurs méthodes de lissage des courbes fondées sur le filtrage et le traitement des données, parmi lesquelles on peut citer :

- la moyenne mobile d'ordre N (filtrage linéaire) ou moyenne glissante,
- la méthode morphologique (filtrage non linéaire),
- et le traitement statistique ou répartition des données en classes.

1.1. la moyenne mobile d'ordre N ou moyenne glissante

Pour calculer la moyenne mobile d'ordre N, on définit une pile de N éléments que l'on remplit des N premières valeurs acquises. La moyenne arithmétique de ses valeurs est calculée et stockée dans un tableau de résultats. Ensuite, on décale les éléments de la pile d'un étage vers le bas et on remplace la N^{ième} valeur de la pile par la (N+1)^{ième} valeur acquise. On calcule la nouvelle moyenne arithmétique de la pile que l'on stocke dans le tableau de résultats précédent. On reprend le même procédé jusqu'à ce que l'on ait parcouru toutes les données acquises. Il se pose néanmoins le problème du choix des valeurs initiales de la pile pour ce qui concerne les (N/2) premières valeurs de la pile au début du tableau d'acquisition et des (N/2) dernières valeurs en fin d'acquisition. Dans la plupart des cas, ces (N/2) premières valeurs de la pile sont le résultat de la moyenne arithmétique de toutes les valeurs enregistrées. Compte tenu du nombre aléatoire de données enregistrées au préalable, il se pose également le choix de la taille proprement dite de la pile qui ne doit être ni trop petite ni trop grande.

Ce procédé trouve ses limites de validité si les valeurs des données à traiter sont très dispersées. La courbe correspondant aux valeurs obtenues après filtrage a tendance à suivre celle de l'enregistrement initial compte tenu du type de données que nous traitons (valeurs comprises entre 0 et 360 degrés. Dans un cas par exemple où la donnée théorique est aux alentours de 10 degrés, certes la plupart des données sera concentrée autour de cette valeur. S'il survient quelques pics autour de 350 degrés lors du traitement, la valeur moyenne est une valeur intermédiaire entre ces deux, voire proche de la valeur erronée qui est 350 degrés. Par conséquent, les valeurs évoluent après traitement dans le mauvais sens, sauf si on applique plusieurs fois la moyenne mobile sur les données traitées de la même manière.

1.2. la méthode morphologique

Il s'agit d'un filtrage non linéaire des données. Elle consiste à définir de manière judicieuse un élément structurant qui joue le rôle d'une pile tampon composée de N (impair) valeurs. Ce logiciel utilise en entrée un fichier préalablement enregistré de données angulaires acquises au cours de l'expérimentation. Son principe est le même que celui de la moyenne mobile d'ordre N et la différence existe au niveau du calcul qui précède le stockage du résultat intermédiaire. En effet au lieu de stocker à chaque pas la valeur moyenne de la pile, on stocke soit le minimum des valeurs de la pile (fonction appelée EROSION), soit le maximum des valeurs de la pile (fonction DILATATION).

On peut combiner ces procédés de manière séquentielle ; suivant l'application, on peut faire une EROSION suivie d'une DILATATION des données obtenues après EROSION (on dit que nous avons effectué une dilatation de l'érodé ou une OUVERTURE). Cette fonction permet de rechercher la valeur sup. des valeurs inf. et de supprimer tous les pics de taille équivalente à l'élément structurant.

On peut également faire l'inverse c'est à dire une DILATATION suivie d'une EROSION des valeurs obtenues après DILATATION (on dit dans ce cas que l'on a effectué une érosion du dilaté ou une FERMETURE). Cette fonction permet de rechercher les valeurs inf. des valeurs sup. et comble les vallées de taille équivalente à l'élément structurant.

Dans un cas où les valeurs sont relativement dispersées, l'allure générale des courbes obtenues après ces opérations peut suivre de manière fidèle les courbes initiales, si la taille de l'élément structurant n'est pas bien choisie. Ce qui pose un problème du choix de la taille de l'élément structurant en fonction des données recueillies. Les relevés obtenus sont à priori méconnus et donc la méthode morphologique n'est pas très adaptée pour l'application qui nous concerne. Cette méthode est fiable pour des types de données relatives aux images et la reconnaissance des formes.

1.3. le traitement statistique des données: répartition des données en classes

Tout comme les deux procédés ci-dessus, il utilise en entrée un fichier préalablement enregistré de données angulaires. On considère que les données sont des variables aléatoires dont on ne connaît pas à priori la valeur moyenne. On souhaite néanmoins savoir la distribution statistique de manière à qualifier entre autres la nature des mesures fournies par le capteur. Nous savons par ailleurs que, lorsqu'il s'agit d'une variable aléatoire continue, dépendant d'un grand nombre de causes indépendantes dont les effets s'additionnent (aucune n'étant prépondérante), la loi suivie par cette variable aléatoire est une loi normale ou loi de

GAUSS. Dans l'application qui nous concerne directement, les données sont réparties par 10 ou 36 classes (de 36 ou 10 degrés) selon la précision souhaitée. On compte les effectifs de chaque classe (le total de ces effectifs doit éгалer le nombre total de données enregistrées). On retient la classe la plus représentée en effectifs encore appelée mode. Dès lors, on peut alors déterminer la moyenne et l'écart type des données contenues dans la classe la plus représentée et les deux classes situées de part et d'autre d'elle (pour prendre en compte les erreurs intrinsèques du capteur).

2. Radiogoniomètres Doppler muni des antennes demi-ondes : caractérisation et mesures d'angles de gisement

2.1. Caractérisation du radiogoniomètre Doppler muni des antennes demi-ondes

Sur le schémas de la figure III.4, sont présentées les mesures d'angle de gisement aux fréquences de 85 et 98 MHz. Les mesures sont effectuées lorsque l'émetteur émet un signal modulé avec des signaux BF à 400 Hz, 1 kHz 3 kHz et 15 kHz et est situé à une trentaine de mètres du récepteur. Ce dernier prend successivement six positions proches.

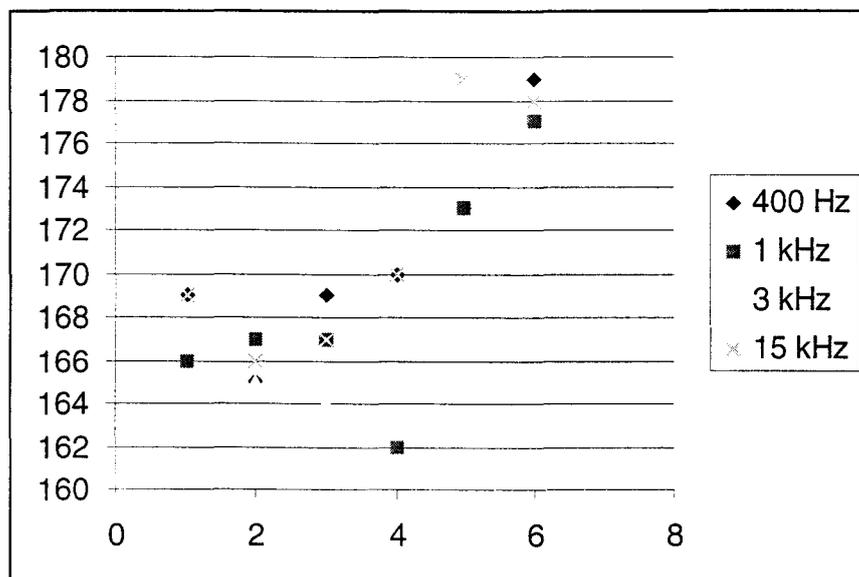


Figure III.4-a : Caractérisation du radiogoniomètre Doppler

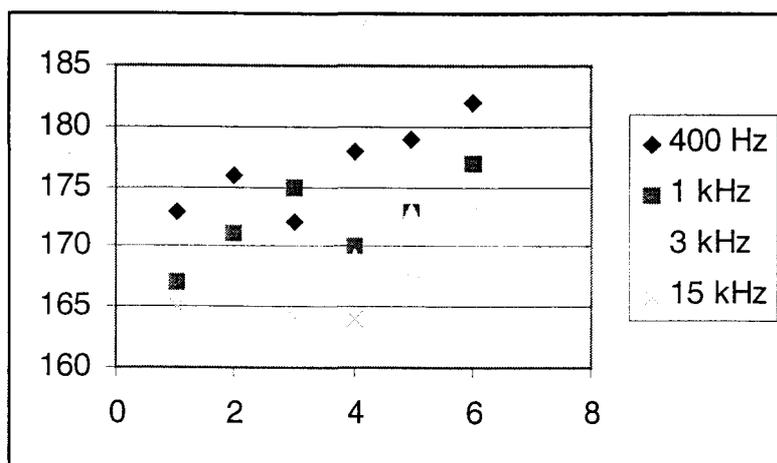


Figure III.4-b : Caractérisation du radiogoniomètre Doppler

Les mesures d'angles varient peu. Le type de modulation en émission a une faible influence sur la précision des mesures d'angles de gisement de l'émetteur.

Sur les figures III.5 à III.8, sont présentés les résultats de mesures obtenues en milieu suburbain sur des émetteurs conventionnels.

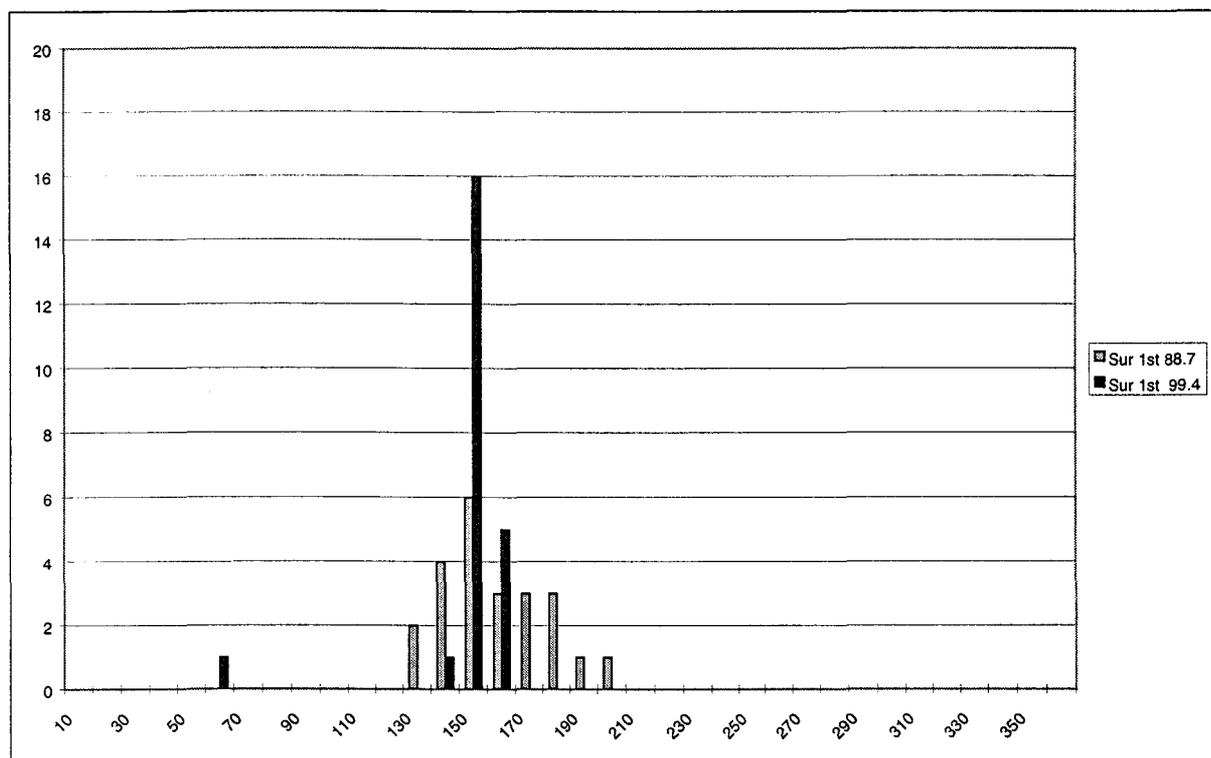


Figure III.5 : Mesures d'angles sur deux émetteurs situés au même endroit en milieu suburbain

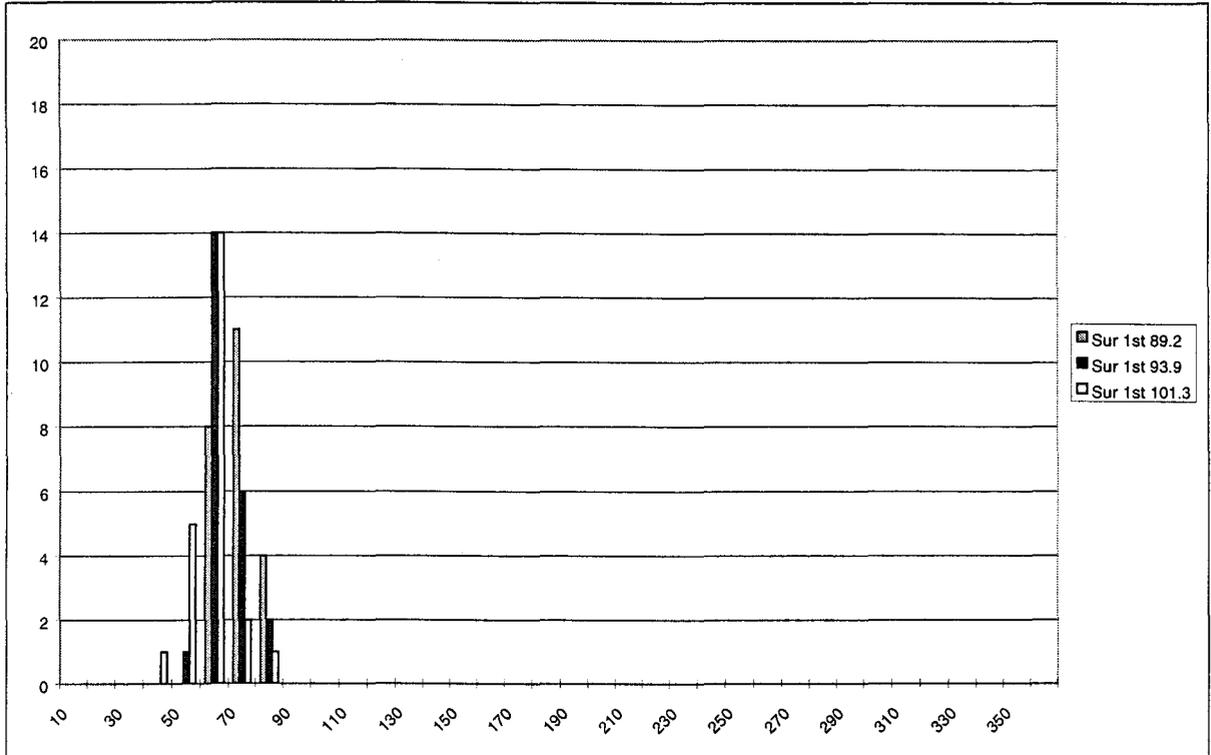


Figure III.8 : Mesures d'angle sur trois émetteurs situés au même endroit en milieu suburbain

Au vu de ces courbes, on note que les valeurs d'angles de gisement obtenues avec le radiogoniomètre muni des antennes demi ondes sont beaucoup moins dispersées que celles obtenues avec le radiogoniomètre Doppler muni des antennes quart d'ondes sur un plan de masse. Il en est de même pour la précision des mesures. Les relevés sont beaucoup plus "corrects".

