الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DR.YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DE LA TECHNOLOGIE
Département Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master
Spécialité: Systèmes de Télécommunications

THÈME

Automatisation des opérations de contrôle du spectre radioélectrique -Goniométrie-

Encadré par :

Mr. KHEDDAR Hamza (promoteur)

Mr. SADOK Mustapha (Co-promoteur)

Présenté par :

M .ABBAS TURKI Hamza

Juin 2017

Résumé

Ce thème porte sur la goniométrie pour les stations de contrôle du spectre radioélectrique, où on veut étudier les différentes méthodes d'estimation de l'angle d'arrivé qui nous permettrons de localiser les émissions des émetteurs, et plus particulièrement la méthode des quatre mesures par interférométrie et l'algorithme aveugle pour la détection des signaux.

Nous allons essayer d'étudier ces deux technique de mesure d'angle d'arrivé et de faire les simulations appropriés,

Nous allons en premier lieu aborder quelques notions générales sur le contrôle du spectre radioélectrique. Ensuite on va évoquer le concept de la goniométrie et citer les critères de performances ce dernier utilisés dans le contrôle du spectre. On traitera un chapitre sur les interfaces radio des différents standards pour avoir une idée globale des signaux des trois standards radio mobiles et leur modulation en général pour enfin consacrer le dernier chapitre à la simulation pour étudier des cas pratiques. Particulièrement, on essayera de mettre à profile l'algorithme aveugle en utilisant Matlab pour générer des signaux de différents standards dans une bande de fréquences sur lesquels on va appliquer un traitement par l'algorithme aveugle afin d'avoir les relèvement en azimut d'une manière automatisée.

Mots-clés : Goniométrie, Angle d'arrivée AOA, DF Direction Finding.

Abstract

This topic focuses on the direction finding for control stations of the radio spectrum, where we want to study the different methods of estimating the angle of arrival that will allow us to locate the transmitters, particularly the method of the four measurements by interferometry and the blind algorithm for signal detection.

We will try to study these two angle measurement techniques to come and make the appropriate simulations.

First, we will discuss some general concepts on radio monitoring. Next, the concept of direction finding and performance parameters of direction finders used in radio monitoring systems will be discussed. A chapter on the Radio Interfaces of the different standards will be handled in order to have a general idea of the signals of the three mobile radio standards and their modulation in general and finally devote the last chapter to the simulation to study practical cases. In particular, an attempt will be made to implement the blind algorithm by using Matlab to generate signals of different standards in a frequency band on which blind algorithm processing will be applied in order to have the bearing spectrum in an automated way. We will also propose and implement an automated method for automatic violation detection (AVD) in order to overcome hard tasks executed by radio monitoring operators.

Keywords: Direction finding, Angle of arrival AOA, DF Direction Finding.

ملخص

هذا الموضوع يرتكز على نظام تحديد الاتجاه وقياس الزوايا لمحطات مراقبة الطيف الراديوي، حيث تطرقنا لدراسة مختلف الطرق لتقدير الزاوية والتي تمكننا من الوصول أو تحديد موقع أجهزة الإرسال الراديوية ، وذلك بمساعدة الخوارزمية العمياء للكشف عن الإشارة .

سنحاول دراسة هذه الطرق و كذلك القيام بمحاكاة الخوارزمية العمياء .

في البداية سنتطرق لبعض المفاهيم العامة لمراقبة الطيف الراديوي ، ثم سنناقش مفهوم تحديد الاتجاه والتطرق إلى المعايير المعمول بها في أجهزة مراقبة الطيف وتحديد الزاوية .

أما في الفصل الأخير فقد قمنا بمحاكاة لدراسة حالات عملية وتطبيقية. وذلك باستعمال الخوارزمية العمياء باستخدام برنامج الماتلاب لتوليد مختلف الإشارات في نطاقات تردد مختلفة وواسعة ،وبالتالي استخراج زاوية القدوم أو السمت لجهاز الإرسال المطلوب وذلك بطريقة تلقائية.

كلمات المفتاح:تحديد اتجاه الزوايا، زاوية الوصول، محدد الاتجاه.

Table des matières

Résumé ii

Abstract iii

ملخص iv

Table des matières v

Liste des tableaux ix

Liste des figures x

Liste des sigles xii

Introduction générale 1

Chapitre 1 2

Généralités sur le contrôle du spectre 2

1.1. Introduction 2
1.2. Radio surveillance (contrôle du spectre) 2
1.3. Systèmes de radio surveillance entre le domaine civil et militaire 3
1.4. Rôles des systèmes de radio surveillance 4
1.5. Différentes configurations des stations de contrôle 4
1.5.1. Configuration fixe 4
1.5.2. Configuration transportable 5
1.5.3. Configuration mobile 5
1.6. Systèmes de radiolocalisation des sources d'émissions radio associés à la radio surveillance 6
1.7. Architecture des stations de contrôle automatisées 6
1.8. Antennes utilisées par les stations de contrôle 8
1.8.1. Les gammes de fréquences VLF, LF, MF et HF 9
1.8.2. Les gammes de fréquences VHF et UHF 10
1.8.3. La gamme SHF 11
1.9. Sous système d'interception 11
1.9.1. Différence entre les intercepteurs et les récepteurs de communication 12
1.9.2. Intercepteur à balayage superhétérodyne 12
1.9.3. Intercepteur à analyse parallèle 13
1.10. Concept de radiolocalisation des sources d'émissions et techniques utilisées 14

1.10.1. Radiolocalisation par triangulation goniométrique 15
1.10.2. Radiolocalisation par point transporté (Running fix) 15
1.10.3. Radiolocalisation à station unique 16
Figure 10.a: techniques de radiolocalisation 15
Triangulation goniométrique 15
Figure 10.b: techniques de radiolocalisation 16
Point transporté 16
Figure 10.c: techniques de radiolocalisation 17
Localisation à station unique 17
1.11. Nouvelle perspective pour le contrôle du spectre 17
1.12. Conclusion 18
Chapitre2 19
Goniométrie et critères de performance des stations de contrôle 19
2.1. Introduction 19
2.2. La Goniométrie 19
2.3. Utilisation de la goniométrie 20
2.4. Mesure de l'angle d'arrivée 20
2.5. Spectre angulaire et exploitation de l'angle d'incidence 22
2.6. Configurations géométriques des Réseaux d'antennes utilisés dans la goniométrie 23
2.6.1. Réseaux d'antennes circulaires uniformes 24
2.7. Aperçu sur la conception des systèmes 25
2.8. Critères de performance d'un système de goniométrie 26
2.8.1. Précision 26
2.8.2. Sensibilité 26
2.8.3. Immunité suffisante aux signaux à haute amplitude 27
2.8.4. Immunité aux distorsions dues à la propagation multi trajets 29
2.8.5. Immunité aux signaux d'interférences Co-canal 30
2.8.6. Courte durée minimale nécessaire pour effectuer le traitement 30
2.8.7. Probabilité d'interception et Vitesse de recherche élevées pour les goniométries à balayage 30
2.9. Les réseaux d'antennes utilisés pour la goniométrie 30
2.9.1. Critères de conception d'un réseau d'un réseau d'antennes pour la goniométrie 31
2.9.2. Exemple de conception 32

2.9.3. Nombre d'antennes élémentaires et canaux de traitement 33
2.9.4. Goniométrie large bande 36
2.9.5. Propagation des ondes par trajets multiples 38
2.10. Conclusion 40
Chapitre 3 41
Interface radio des différents standards 41
3.1. Introduction 41
3.2. L'interface Radio de GSM 41
3.2.1 Le duplexage FDD et multiplexage FDMA/ TDMA 42
3.2.2 Interface radio du standard GSM 43
3.2.3 La structure d'un time slot 44
3.2.4 Hiérarchie de trame 44
3.2.5 La modulation GMSK 45
3.2.6 Le saut de fréquence 45
3.3. L'interface Radio de l'UMTS (UTRA/FDD) 46
3.3.1. Multiplexage WCDMA et Duplexage 46
3.3.2. L'étalement de spectre 47
3.3.3. Modulation 48
3.4. L'interface Radio de LTE 49
3.4.1. Caractéristiques du signal LTE 50
3.4.2. Modulations 51
3.4.3. Systèmes à antennes multiples 52
3.4.4. Chaîne de transmission 53
3.5. Conclusion 55
Chapitre 4 56
Simulation de l'algorithme aveugle pour la goniométrie 56
4.1. Introduction 56
4.2. Algorithme aveugle pour la goniométrie 56
4.2.1. Traitement proposé 57
4.2.2. Processus d'obtention du spectre angulaire 58
4.2.3. Test et résultats 60
4.3. 2eme simulation : Automatic Violation Detection (AVD) 61

4.4. Conclusion 63
Conclusion générale 64
Bibliographie i
Annexe 1 i
Démonstration de l'équation (2.2) i

Liste des tableaux

Tableau 1: Domaines d'utilisation de la goniométrie……..20

Tableau 2: Principaux paramètres OFDM pour LTE …….49

Tableau 3: Différentes configurations pour les systèmes d'antennes à la station de base ……..51

Liste des figures

Figure 1: différentes configurations des stations de contrôle ……..…..5

Figure 2: Équipements portables complémentaires ……..…6

Figure 3: Architecture d'un système d'analyse technique ……..……7

Figure 4: Système de contrôle type, intégré avec un système de gestion……8

Figure 5: Exemple de réseau d'antennes rideaux log-périodiques en étoile ……...……10

Figure 6: Antenne omnidirectionnelle unipolaire large bande à polarisation circulaire……..…10

Figure 7: Exemples d'éléments d'antennes pour les bandes d'ondes métriques et décimétriques…..……11

Figure 8: Schéma synoptique d'un intercepteur superhétérodyne……..……13

Figure 9: analyse séquentielle ……..……...……14

Figure 10.a: techniques de radiolocalisation Triangulation goniométrique…….……..……15

Figure 11.b: techniques de radiolocalisation Point transporté …….……16

Figure 12.c: techniques de radiolocalisation Localisation à station unique……..……16

Figure 13: systèmes classiques de radio surveillance ……17

Figure 14.a: Mesure de l'angle d'arrivée Définition de la direction d'émetteur……21

Figure 15.b: Mesure de l'angle d'arrivée Directions de référence ……..…21

Figure 16: Spectre de puissance et spectre angulaire…….……22

Figure 17: Segmentation des signaux grâce au spectre angulaire ……..…….23

Figure 18: Configurations géométriques des réseaux d'antennes …….……..…23

Figure 19: Géométrie des réseaux circulaires…….……24

Figure 20: Structure d'un système de goniométrie…….……25

Figure 21: Produits d'intermodulations du second ordre et de 3eme ordre ……...……26

Figure 22: Mélange réciproque ……...……...……27

Figure 23: Réseau d'antennes utilisé pour la goniométrie de 20 MHz à 3 GHz……32

Figure 24: Traitement séquentiel de N éléments d'antennes avec H canaux de mesure…….…33

Figure 25: Exemple d'un goniomètre avec N éléments et un canal de mesure unique……..……34

Figure 26: Représentation temps-fréquence des signaux à FPI et des signaux classiques continus……..36

Figure 27: Principe de fonctionnement d'un goniomètre à large bande ……..……..37

Figure 25: Distribution de l'amplitude des ondes incidentes en fonction des azimuts……..…….38

Figure 28: Duplexage FDD …….……...41

Figure 29: Multiplexage FDMA ……..……...41

Figure 28: technique d'accès à répartition dans le temps TDMA……..……..…42
Figure 29: Multiplexage TDMA et duplexage FDD en GSM…….……43
Figure 30: Structure de l'hyper-trame, la super-trame et la multi-trame…….44
Figure 31: Les bandes de fréquences allouées à UMTS……..……45
Figure 32: signal étalé…….…….46
Figure 33: processus d'étalement du spectre …….……..…47
Figure 33: Simplified transmission chain in the UTRA/FDD physical layer…….….48
Figure 35: Principe de transmission en OFDM et schéma équivalent …….……..…48
Figure 34: Préfixe cyclique normal et préfixe cyclique long en LTE……..……...50
Figure 35: Modulations utilisées dans LTE…….……51
Figure 36: Chaîne de transmission LTE ……..……..…53
Figure 37: traitement des sous bandes et relèvements en azimut…….……...55
Figure 40: Spectre angulaire formé à partir des AOA…….……...56
Algorithme aveugle……...……..57
Figure 41: différents signaux générés……..58
Figure 38: Spectre angulaire avec bruit……...59
Figure 39: Spectre angulaire sans bruit…….……..59
Figure 40: scénario étudié…….…….60
Figure 41: scénario étudié AOA……..…….……..……60
Figure 42.a: signal intrus …….……...…60
Figure 43.b: signaux détectés ……60
Figure 44: rapport intrusion détectée…….…..……61

Liste des sigles

2G : **S**econd **G**eneration
3G: **Third G**eneration
ANF: l'**A**gence **N**ationale des **F**réquence
AOA: **A**ngle **O**f **A**rrival
BCH: **B**roadcast **CH**annel
BW : **B**and**W**idth
CAN : **C**onvertisseur **A**nalogique **N**umérique
CFAR: **C**onstant **F**alse **A**larm **R**ate
DF: **D**irection Finding
DOA : **D**irection **O**f **A**rrival
FDD: **F**requency **D**ivision **D**uplex
FDMA: **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess
FFT: **F**ast **F**ourrier **T**ransform
FH: **F**requency **H**opping
FM : **F**requency **M**odulation
FPI: **F**aible **P**robabilité d'**I**nterception
GNSS: **G**lobal **N**avigation **S**atellite **S**ystem
HF: **H**igh **F**requency
IF: **I**ntermediate **F**requency
IP: **I**ntercept **P**oint
LTE: **L**ong-**T**erm **E**volution
OFDMA: **O**rthogonal **F**requency-**D**ivision **M**ultiplexing
PSK: **P**hase **S**hift **K**eying
QAM: **Q**uadrature **A**mplitude **M**odulation
QPSK: **Q**uadrature **P**hase **S**hift **K**eying
RF: **R**adio **F**requency
RG: **R**adio **Goniométrie**
SDMA: **S**pace **D**ivision **M**ultiple **A**ccess
SER: **S**ources d'**E**missions **R**adio
SNOI: **S**ignal **N**ot **O**f **Interest**
SNR: **S**ignal to **N**oise **R**atio
SOI: **S**ignal **O**f **I**nterest
TDD: **T**ime **D**ivision **D**uplex
TDMA: **T**ime **D**ivision **M**ultiple **A**ccess
UIT : **U**nion **I**nternationale des **T**élécommunications
UTRA / UTRAN: UMTS Terrestrial **R**adio **A**ccess **N**etwork
UMTS: **U**niversal **M**obile **T**elecommunications **S**ystem

VHF: **V**ery **H**igh **F**requency

Dédicaces

A ma Mère

A mon défunt père

Je dédie ce modeste travail à l'être qui m'est le plus cher sur cette terre,

Celle qui a tant donné pour ses enfants Ma Mère.

A la mémoire de Mon Père. J'espère toutefois qu'il serait fier de

Mes choix s'il était présent aujourd'hui.

A toute ma famille, cet ensemble de personnes qui forment comme

Une forteresse au fond de nous et

Où l'on peut se réfugier

A tout moment.

A tous les amis que j'ai eu la chance d'avoïr.

A tous ceux que j'aime.

Abbas Turki Hamza

Remerciements

Avant tout on tient à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté pour la réalisation et l'achèvement de ce travail.

C'est avec un grand honneur et un grand plaisir que je remercie mes encadrant Monsieur *KHEDDAR Hamza*, et *SADOK Mustapha* (Enseignant a l'Institut National des Télécoms et des TIC Oran –ex : ITO), pour me dirigés tout au long de la réalisation de ce travail, pour ses esprits scientifique, ses précieux conseils et ses encouragements. Soyez assuré de tout mon respect et de ma profonde gratitude.

Mes propres sentiments de reconnaissance et mes remerciements les plus respectueuses vont aussi à toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de cette mémoire, à tous les enseignants, collègues (Algérie télécom) et amis, ainsi qu'au personnel administratif et technique de l'université de Médéa.

Introduction générale

Les applications de la radio surveillance des signaux radioélectriques peuvent aller de la vérification de conformité des émissions spécifiques aux opérateurs à l'identification et la radiolocalisation des émetteurs inconnus ou illicites.

Les systèmes de radio surveillance sont largement utilisés aussi bien pour des applications civiles que militaires, développés en parallèle avec les systèmes de radiocommunication. Ces derniers sont toujours en évolution et qui nécessitent des systèmes de radio surveillance de plus en plus performants face à la croissance continue du nombre de terminaux et dispositifs utilisés dans les communications sans fil.

Dans ce mémoire nous allons mettre en vue la théorie nécessaire à la mise au point d'un système automatisé vis-à-vis du contrôle du spectre radioélectriques avec les différentes opérations qui y sont associées.

Ensuite, on va s'efforcer à proposer des processus d'automatisation pour la goniométrie sur une gamme de fréquences donnée, en faisant recours à l'algorithme aveugle et en implémentant ces processus sur un outil de simulation afin de les élaborer sur des signaux de différents standards, ainsi on va proposer une méthode automatisée pour la détection des signaux intrus pour mettre en valeur l'apport de l'automatisation des opérations de contrôle en termes d'efficacité des systèmes de radio surveillance.

Chapitre 1

Généralités sur le contrôle du spectre

1.1. Introduction

La localisation d'émetteurs de radiocommunication s'intéresse à la fois des organismes civils et des entités militaires mais pour des besoins différents. La complexité de l'environnement électromagnétique urbain nécessairement être prise en compte dans les opérations de localisation, en premier lieu au niveau des traitements et des équipements puis au niveau des processus opérationnels.

Elle répond principalement à deux besoins : un besoin de *contrôle du spectre*, qui est généralement de nature *civile* et assuré par des autorités de régulation telles que l'**ANF** (Agence National des Fréquences) et l'**ARPT** (Autorité de Régulation de La Poste de Télécommunications) et un besoin de *surveillance et/ou de renseignement radioélectrique*, de nature *militaire* ou de *sécurité civile*.

La Zone Urbaine est un milieu difficile pour la localisation des émetteurs de radiocommunication, en particulier pour les terminaux, en raison de la complexité de l'environnement radioélectrique et elle ne peut pas être traitée correctement par les techniques classiques.

1.2. Radio surveillance (contrôle du spectre)

Les techniques de radio surveillance sont élaborées afin que les paramètres techniques et les normes spécifiées pour les systèmes de radiocommunication soient respectés afin d'avoir une utilisation efficace du spectre des fréquences radioélectriques dans le cadre de la coexistence des réseaux de radiocommunications et dans un environnement radioélectrique exempt de brouillage.

La radio surveillance est souvent requise par des organismes gouvernementaux. L'Union Internationale des Télécommunications (*UIT)* a désigné l'organisation *UIT* Radiocommunications (*UIT-R*) pour gérer le spectre RF et la transmission par satellite au niveau mondial. Les organismes de réglementation nationaux, tels que l'Agence Nationale des Fréquence (*ANF*) et Autorité de Régulation de La Poste de Télécommunications (*ARPT*), gère l'utilisation du spectre au niveau de notre pays.

Ces organismes disposent des systèmes de radio surveillance nécessaires pour effectuer les opérations de contrôle du spectre dans le cadre de la gestion de ce dernier.

1.3. Systèmes de radio surveillance entre le domaine civil et militaire

Le préalable indispensable à toute mise en œuvre des fonctionnalités de radio surveillance est l'interception des signaux radioélectriques et leur réception à des fins d'analyse, immédiate ou différée, selon les cas d'application et la complexité des environnements radioélectriques. Pour cela, les intercepteurs, récepteurs et détecteurs sont utilisés en radio surveillance, aussi bien dans le domaine civil (fonctionnement politique, économique et social de la société qui devient de plus en plus axée sur la transmission d'informations entre particuliers, acteurs économiques, dirigeants et organismes régulateurs) que militaire (conduite des forces et contrôle du théâtre d'opérations). Qu'il s'agisse de:

- Réglementer l'utilisation du spectre.
- Vérifier la bonne application de la réglementation.
- Valider le bon fonctionnement d'un réseau installé.
- Surveiller un champ de bataille.

Dans le domaine *civil*, les signaux à traiter par la radio surveillance ne présentent généralement pas de propriétés particulières de furtivité. L'interception et la réception privilégient donc plutôt la qualité du filtrage des porteuses reçues, dans des conditions généralement favorables à la production de mesures techniques précises, au détriment de la vitesse de balayage et de la rapidité (exploitations éventuellement conduites en temps différé).

Dans le domaine militaire, les modes d'alerte et d'autoprotection basés sur la radio surveillance des communications nécessitent des modes de balayage rapides et des filtres à large bande instantanées, afin d'augmenter la probabilité de détection des signaux versatiles et furtifs (notamment les signaux à évasion de fréquence). Le renseignement d'origine électromagnétique peut utiliser à la fois des modes d'acquisition à balayage rapide pour optimiser la probabilité d'interception, et des modes d'acquisition à balayage lent et durées d'enregistrement longues, pour optimiser les conditions de mise en œuvre des traitements de détection et d'analyse en aval. Dans tous les cadres d'applications militaires, la complexité radioélectrique des théâtres d'opérations (tacticité des porteurs limitant la taille et la hauteur des aériens, le poids, le volume et la consommation des récepteurs) et les difficultés de captation des signaux (éloignement fréquent des émetteurs cibles, bouillages, etc.) accroissent fortement les besoins de performance par rapport au cadre civil [2]:

- Meilleures sensibilité et sélectivité en réception
- Largeur de bande instantanée plus importante

- Parallélisme des filtrages, des détections et des traitements en aval
- Meilleure robustesse aux conditions climatiques
- Autonomie et automatisation renforcées.

1.4. Rôles des systèmes de radio surveillance

En effectuant la surveillance permanente ou intermittente d'une large gamme de fréquences, les systèmes de radio surveillance permettent la détection et l'analyse des nouvelles sources d'émission, la détermination de l'emplacement physique de celles-ci et donc l'évaluation des sources de brouillage et les émissions illicites.

Les tâches effectuées par un système de radio surveillance (domaine civil) se résument dans l'établissement des mesures suivantes :

- Fréquence centrale
- Intensité du champ électrique
- Occupation du spectre et des différents canaux de fréquences
- Bande passante
- Reconnaissance des types de modulation et ensuite démodulation
- Goniométrie et radiolocalisation des sources d'émissions

Ces tâchas complexes s'exécutent en plusieurs étapes et elles nécessitent un large éventail de moyens radio-électroniques (récepteurs RF, Antennes, Station de contrôle...etc.).

1.5. Différentes configurations des stations de contrôle

On distingue trois configurations des stations de contrôle

1.5.1. Configuration fixe

Les sites fixes sont utilisés pour l'acquisition cible, les opérateurs dans les sites fixes contrôlent le spectre pour identifier les Signaux d'Intérêt (SOI: Signals Of Interest).

1.5.2. Configuration transportable

Une fois un SOI est identifié, le Système Transportable est déployé. L'opérateur effectuera les mesures de triangulation. Les résultats fourniront une ellipse de l'emplacement de la cible. Cette ellipse devient une région d'opération (AO: Area of Operation). Les configurations Transportables peuvent être utilisées avec une antenne montée sur le trépied ou le mat pour un usage d'installations temporaire par terre ou sur le toit d'un bâtiment.

1.5.3. Configuration mobile

Pouvant être installée dans n'importe quel véhicule avec le minimum de modifications, le système Mobile est déployé dans la région d'opération, l'opérateur effectuera la localisation radiogoniométrique pour déterminer l'emplacement physique des sources d'émission radio.

Les différentes configurations sont représentées dans la

Figure **45**.



Station fixe Station transportable Station mobile

Figure 45: différentes configurations des stations de contrôle

1.6. Systèmes de radiolocalisation des sources d'émissions radio associés à la radio surveillance

La couverture de terrain requise et la radiolocalisation de Sources d'émissions Radio (SER) peut être obtenue à l'aide d'un système de stations distantes de radio surveillance et de goniométrie (la centrale et plusieurs stations périphériques), qui fournissent la détection et la réception de signaux par le poste central et les opérations synchronisées de goniométrie par la commande de la station centrale, ainsi que la radiolocalisation des SER avec représentation sur la carte géographique.

Le nombre de stations pour le système stationnaire est défini par le relief, la possibilité d'utiliser des bâtiments de grande hauteur pour le montage du pylône de l'antenne, par la puissance des SER contrôlée et la sensibilité du détecteur et du goniomètre.

Pour les endroits où il est difficile de recevoir des signaux via des stations fixes, les stations mobiles de radio surveillance doivent être utilisées comme support supplémentaire pour les systèmes fixes de détection et de goniomètre. Ces stations mobiles sont destinées à une localisation plus précise des sources d'émissions radio détectées. Des équipements portatifs : kits d'antennes et analyseurs de spectre portables sont fournis pour la localisation des sources d'émissions radio dans les bâtiments et dans les lieux qui sont hors de portée des équipements mobiles (

Figure **46**). [3]



Kits d'antennes portables Analyseur de spectre portable

Figure 46: Équipements portables complémentaires [17].

1.7. Architecture des stations de contrôle automatisées

L'équipement installé dans une station de contrôle des émissions doit être approprié aux mesures qui sont faites dans cette station. Ces mesures découlent des tâches qui ont été confiées à la station, lesquelles dépendent des objectifs du contrôle des émissions dans le pays. La nature et la qualité des mesures

déterminent les types d'équipements nécessaires. Une station de contrôle doit être dotée d'un équipement minimum : un récepteur, et un système d'antenne pour la gamme de fréquences à laquelle on s'intéresse. La plupart des stations de contrôle ont recours à l'automatisation pour libérer les opérateurs des mesures fastidieuses de longue durée, par exemple les mesures pour déterminer le degré d'occupation du spectre.

Des systèmes d'analyse technique sont utilisés pour rendre automatiques certaines opérations et mesures. Un système d'analyse technique dispose d'une architecture en plusieurs parties, comme illustré dans le schéma bloque suivant (Figure 47) :

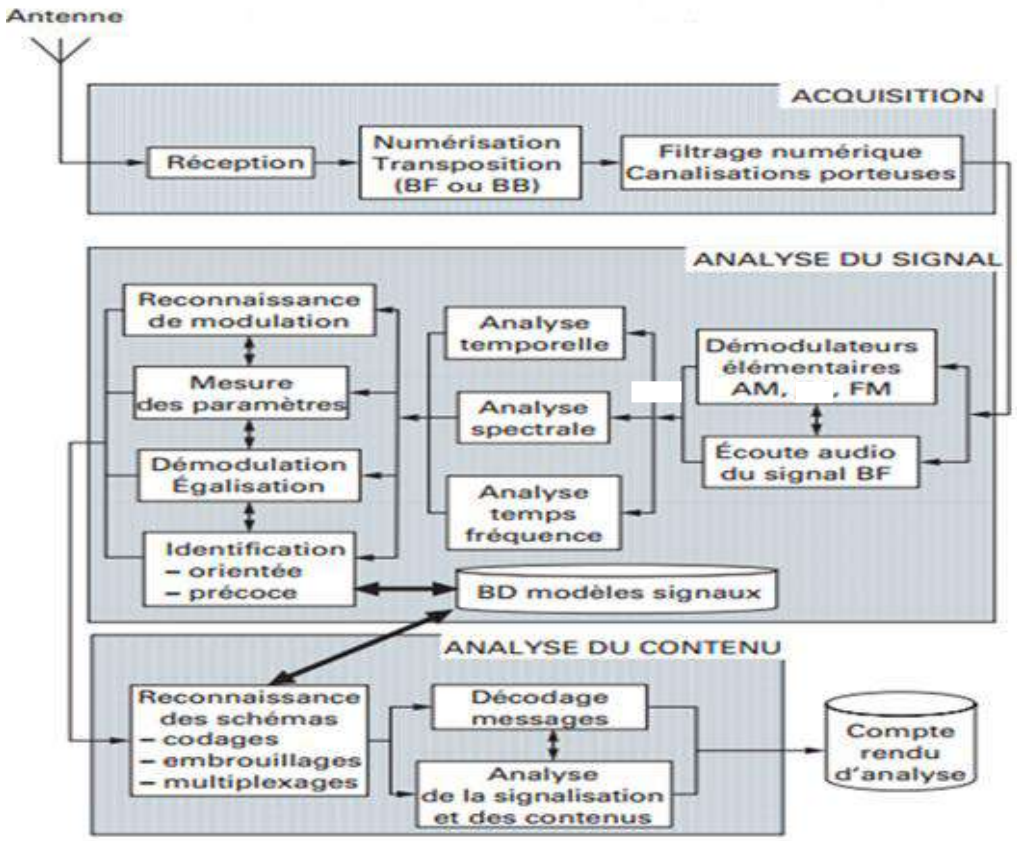


Figure 47: Architecture d'un système d'analyse technique. [2]

Ce système pourrait être complété par un goniomètre pour obtenir des relèvements en azimut.

Les systèmes de radio surveillance les plus élaborés sont constitués par une hiérarchie de stations de contrôle nationales, régionales, décentralisées et mobiles, mises en réseau en temps réel pour permettre la commande intégrée d'une multiplicité de stations à partir d'une seule console d'exploitation (Figure 48).

Les systèmes de ce type ont un fonctionnement orienté sur les ordinateurs et les réseaux, avec utilisation de logiciels performants qui libèrent les opérateurs des tâches fastidieuses et accélèrent considérablement les mesures. Une telle structure a aussi pour effet d'augmenter le taux d'utilisation des

équipements, en automatisant les travaux de base, par exemple la recherche des émetteurs fonctionnant sans licence. [1]

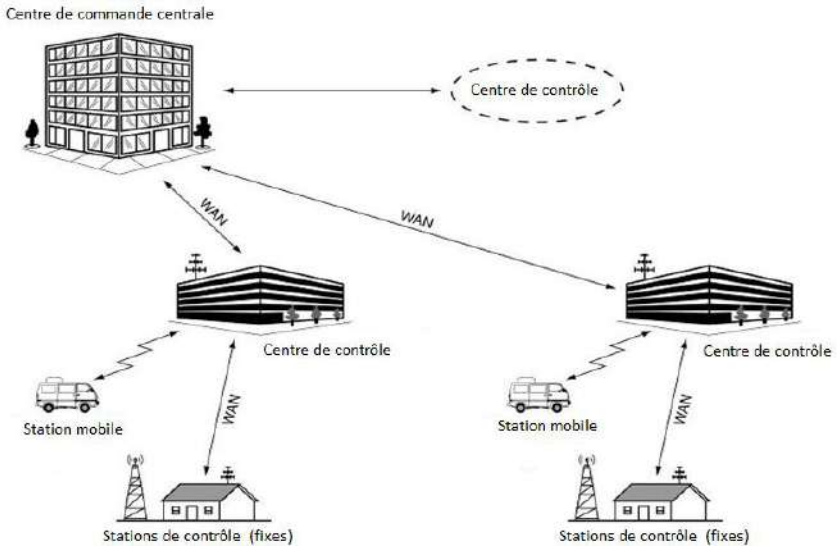


Figure 48: Système de contrôle type, intégré avec un système de gestion [17].

1.8. Antennes utilisées par les stations de contrôle

Les antennes des stations de contrôle du spectre devraient, dans le cas idéal, être installées sur des hauteurs surplombant un paysage dégagé pour que l'on puisse recevoir les signaux du plus grand nombre possible d'émetteurs contrôlés, sur une zone de service étendue et pour tous les azimuts.

La fonction des antennes de réception est de capter un maximum de signal de l'environnement et de l'envoyer à l'entrée du récepteur, tout en limitant au minimum la réception de bruit et de signaux brouilleurs. Les caractéristiques d'une antenne de contrôle des émissions donnée seront déterminées, dans une large mesure, par chaque type d'application. Lors du choix d'une antenne de contrôle, il faut tenir compte, entre autres, des propriétés du signal utile, des paramètres à observer, des caractéristiques de l'emplacement et des éventuelles sources de brouillage.

Pour obtenir les meilleurs résultats, il convient que la polarisation de l'antenne corresponde à celle du front d'onde du signal à recevoir et que les impédances de la ligne de transmission et du circuit d'entrée du récepteur soient adaptées de manière que le maximum d'énergie reçue soit transmis au récepteur.

Pour le contrôle général des émissions ou pour la détermination de l'occupation du spectre des fréquences radioélectriques, les antennes de réception omnidirectionnelles se sont révélées efficaces. En revanche, pour l'observation d'un signal particulier sur une fréquence utilisée en partage, il peut être

souhaitable d'employer une antenne à effet directif permettant d'affaiblir un ou plusieurs signaux brouilleurs ou de renforcer le signal utile.

Pour certaines catégories d'observations, par exemple, les mesures de champ, il est jugé nécessaire d'utiliser une antenne dont les propriétés de réponse en fréquence sont prévisibles avec précision et ne varient pas dans le temps. [1]

Les réseaux d'antennes se sont révélé un moyen efficace pour les applications de goniométrie. Selon la méthode de utilisé, il existe diverses configurations du réseau d'antennes. Les antennes à grande ouverture comptent généralement davantage d'éléments dans l'ouverture, ce qui permet d'éviter les ambiguïtés introduites par le bruit aléatoire et qui ont tendance à diminuer en fonction de l'inverse de la racine carrée du nombre d'éléments. Dans la bande des ondes décamétriques, on utilise couramment des antennes réseaux circulaires ou linéaires en «L» ou en «X» et dans la gamme des ondes métriques et décimétriques, on utilise essentiellement des antennes réseaux circulaires. Selon la méthode de goniométrie utilisée, il est possible de couvrir une gamme de fréquences étendue avec une seule antenne réseau ou bien il faut partager cette gamme de fréquences en un certain nombre de sous-gammes et prévoir autant d'antennes réseaux.

Dans la gamme des ondes décamétriques, on utilise des réseaux d'antennes unipolaires ou d'antennes cadres croisées pour les systèmes fixes, et des antennes cadres ou des éléments en ferrite pour les applications mobiles. Dans la gamme des ondes métriques et décimétriques, on utilise essentiellement des réseaux d'antennes doublets ou d'éventails.

Étant donné qu'aucune antenne ne réunit toutes les propriétés requises pour recevoir efficacement tous les types de signaux, les stations de contrôle des émissions sont généralement et nécessairement pourvues d'un certain nombre d'antennes de types différents. [1]

1.8.1. Les gammes de fréquences VLF, LF, MF et HF

Ces systèmes d'antennes rassurant une réception dans tous les sens à polarisation verticale ou horizontale dans les gammes de fréquences VLF, LF, MF et HF utilisent:

Des grandes antennes telles qu'une antenne à large bande en cône renversé ou de plusieurs antennes unipolaire coniques. [1]

Un réseau d'antennes log-périodique en étoile, avec six antennes-rideaux ayant chacune une ouverture 60° et espacées de 60° autour d'un pylône central (jusqu'à 60 m de hauteur), illustré dans la

Figure 49 ,permettant de répondre aux besoins en matière gamme de fréquences et de gain, on peut utiliser aussi un réseau d'antenne cadres. [1]

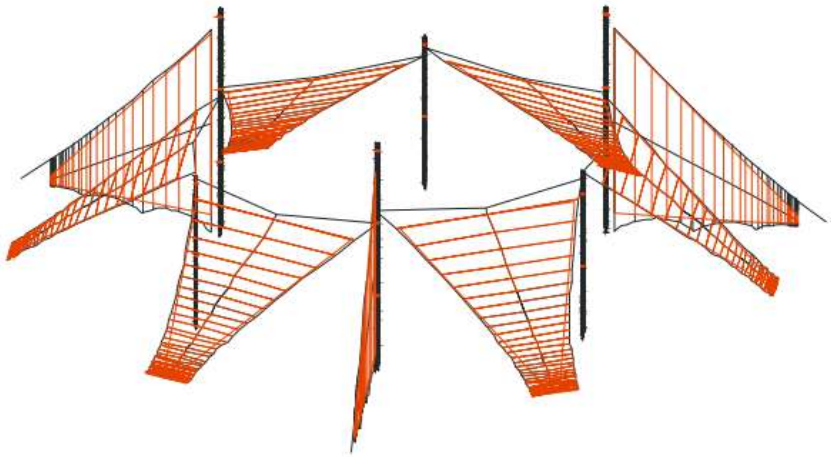


Figure 49: Exemple de réseau d'antennes rideaux log-périodiques en étoile [1].

Une antenne omnidirectionnelle unipolaire à polarisation circulaire à large bande qui peut être utilisée pour recevoir une onde de sol de courte portée et une onde ionosphérique de moyenne à longue portée (Figure 50) [1].

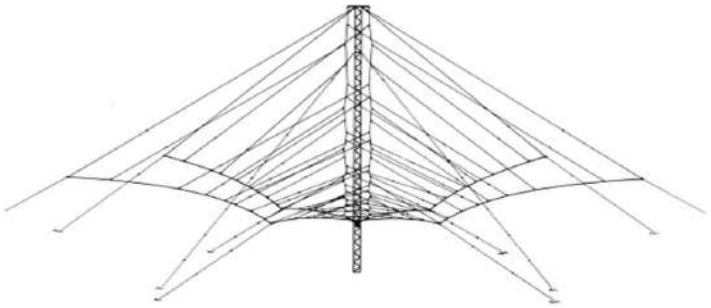


Figure 50: Antenne omnidirectionnelle unipolaire large bande à polarisation circulaire [1]

1.8.2. Les gammes de fréquences VHF et UHF

Un exemple d'antenne utilisée dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques est l'antenne biconique omnidirectionnelle large bande, illustrée à la Figure 51. Cette antenne peut être assortie d'un éventail à neuf éléments, également illustré dans la figure, pour assurer une couverture en goniométrie. Deux tailles d'antenne sont présentées. Le petit système, à gauche, est suffisamment compact et léger pour être utilisé dans une configuration portable ou placé sur le toit d'une voiture touristique ou dans le porte-bagage, formant ainsi une station de contrôle mobile banalisée. Les deux configurations assurent une très bonne couverture sur une gamme de fréquences de 20 à 3 000 MHz, la plus petite étant légèrement moins sensible aux fréquences inférieures à 100 MHz.

La combinaison de l'antenne biconique et de l'éventail à neuf éléments peut être utilisée pour le contrôle et la goniométrie sur l'ensemble de la gamme des ondes métriques et décimétriques pour les applications fixes et mobiles.

Dans cette gamme de fréquence il est plus rentable d'augmenter la hauteur du pylône sur lequel est monté l'ensemble d'antennes car la propagation des ondes VHF/UHF se fait en visibilité directe, surtout si la station est située à l'intérieur ou à proximité d'une zone métropolitaine [1].

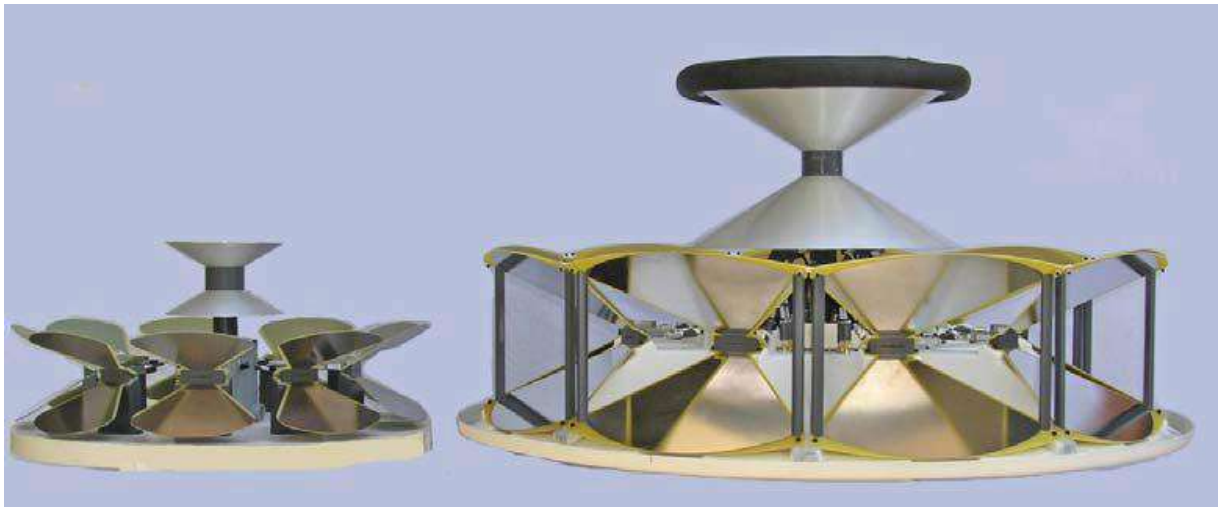


Figure 51: Exemples d'éléments d'antennes pour les bandes d'ondes métriques et décimétriques (boîtiers retirés) [1]

1.8.3. La gamme SHF

La réception directive à large bande s'obtient avec des antennes log-périodiques à polarisation rectiligne ou à polarisation rectiligne double, dans une large gamme de fréquences, de 1 à 26 GHz. Les antennes cornets ont un gain plus élevé, mais une gamme de fréquences limitée. Dans la gamme des ondes SHF, on a un grand affaiblissement en espace libre, raison pour laquelle on utilise des antennes du type «réflecteur et alimentation» qui ont un gain élevé pour le contrôle des signaux jusqu'à 40 GHz [1].

1.9. Sous système d'interception

Le terme générique d'« intercepteur » désigne habituellement un système comprenant une ou plusieurs antennes reliées à un récepteur, réalisant le filtrage et la transposition des signaux sur les porteuses présentes dans la bande de fréquence scrutée, et à un calculateur réalisant différentes analyses sur les canaux issus de ce filtrage, notamment pour rechercher les signaux modulés sur porteuse.

En pratique, un intercepteur combine de nombreuses fonctionnalités. En effet, l'objectif final d'un système d'interception est :

- la détection de présence de signaux sur les différents canaux filtrés.
- la mesure des caractéristiques des signaux présents dans les canaux filtrés (gabarits spectraux, fréquences porteuses, largeur de bande, etc.), pour vérifier, par exemple, la concordance desdits signaux à la règlementation (dans un cadre de contrôle du spectre civil).
- le cas échéant, estimer les paramètres de modulation/codage, identifier les signaux intrus déjà connus ou non, reconnaître la présence de signaux inconnus et les enregistrer pour des analyses ultérieures.
- sur un théâtre d'opérations, reconnaître certains signaux pouvant constituer des menaces potentielles et identifier les émetteurs correspondants, etc.
- le cas échéant, estimer les caractéristiques spatio-temporelles des champs radioélectriques reçus à des fins de localisation des sources émettrices des signaux tels que :
  - ✓ Les signatures spatiales des signaux sur un réseau antennaire
  - ✓ La direction d'arrivée d'un signal.

1.9.1. Différence entre les intercepteurs et les récepteurs de communication

Dans l'architecture des récepteurs de communication, on ne tient compte que de la fréquence, le type de modulation et la bande passante du signal d'arrivé sont connus, ce qui conduit à une conception très efficace.

Dans les intercepteurs, non seulement les caractéristiques du signal d'entré sont inconnu, mais le signal peut être généré spécifiquement pour éviter la détection par un intercepteur.

Les intercepteurs les plus couramment utilisés en radio surveillance sont les intercepteurs à balayage superhétérodyne et les intercepteurs à analyse parallèle.

1.9.2. Intercepteur à balayage superhétérodyne

C'est un récepteur superhétérodyne dont la fréquence de l'oscillateur local varie de manière manuelle ou automatique. Une des composantes de la démodulation, le plus souvent la détection d'enveloppe, est utilisée pour automatiser la détection d'énergie, puis le contrôle de gain, afin, éviter la saturation sur les

porteuses scrutées, etc. Le schéma synoptique d'un intercepteur à balayage superhétérodyne est donné sur la Figure 52.

La conception d'un intercepteur à balayage doit obéir à un compromis entre la vitesse de balayage et le pouvoir de résolution spectrale exigé [2].

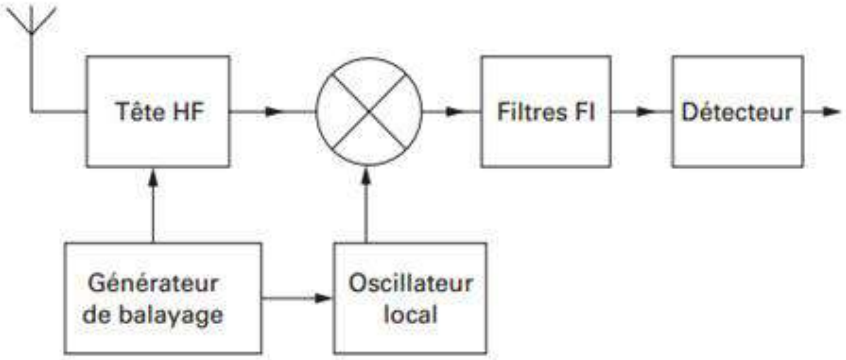


Figure 52: Schéma synoptique d'un intercepteur superhétérodyne [2].

Une grande vitesse de balayage nécessite une faible réponse impulsionnelle de tout l'ensemble de réception et donc une bande large, incompatible avec une grande sélectivité en fréquence.

En pratique, des filtres bande étroite, dont la largeur de bande est fonction de la résolution spectrale exigée, doivent être utilisés, avec des réponses impulsionnelle aussi courtes que possible pour cela, des filtres gaussiens sont généralement utilisés.

Pour obtenir une réponse en amplitude/fréquence correcte, il est nécessaire que la relation suivante soit satisfaite:

$$\mathrm{v} = \frac{\Delta F}{\Delta t} \leq \mathrm{b}^2 \qquad (1.1)$$

Avec : ΔF excursion en fréquence du balayage, Δt temps de positionnement sur la porteuse (limitant la durée d'intégration), V vitesse de balayage, b bande passante à 3 dB du filtre de réception. Comme par exemple pour une vitesse de 1 MHz/s, le filtre utilisé doit avoir une bande passante supérieure à 1 kHz. [2]

1.9.3. Intercepteur à analyse parallèle

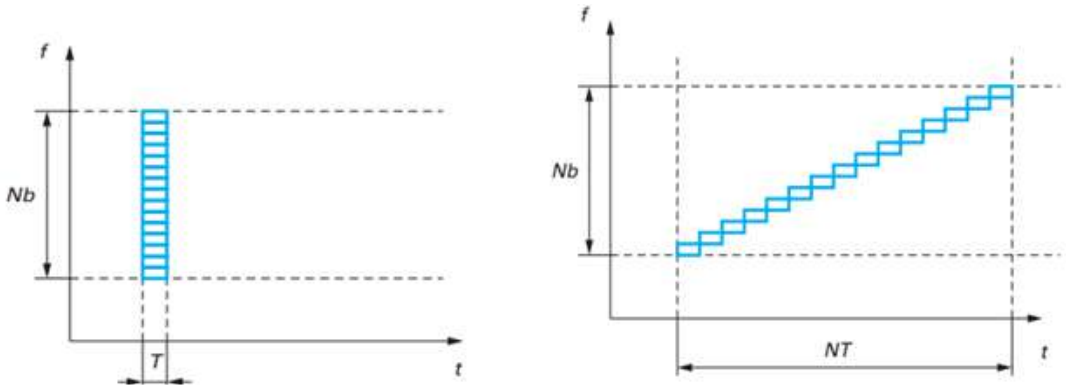
L'apparition des formes d'ondes furtives à saut de fréquence rapide nécessite l'emploi d'intercepteurs à bande large, c'est-à-dire capable d'acquérir instantanément une portion significative ΔF de la bande de saut de l'émission, pour fournir une image de l'activité radioélectrique dans le temps le plus bref possible et la bande la plus large possible. L'interception large bande doit cependant conserver une résolution

spectrale suffisante pour correspondre grosso modo à la canalisation et à la bande instantanée b du signal intercepté, sous peine de perdre en sensibilité. L'analyse parallèle apparaît comme une réponse à cette double exigence [2].

La

Figure **53**.a illustre le principe d'un intercepteur à analyse parallèle. À résolution en fréquence donnée b, et pour une même durée d'analyse T, l'analyse parallèle de $N_{canaux} = \Delta F / b_{\text{canaux}}$ fréquentiels fournit par rapport à l'intercepteur à balayage

Figure **53**.b.



(a) intercepteur parallèle (b) intercepteur à balayage

Figure 53: analyse séquentielle [2].

1.10. Concept de radiolocalisation des sources d'émissions et techniques utilisées

La radiolocalisation est le processus qui permet la détermination de l'emplacement exacte d'un émetteur radioélectrique en utilisant les lignes de relèvement (directions d'arrivée) obtenues par la goniométrie.

Ces lignes de relèvement peuvent être utilisées de diverses façons pour estimer la position d'un émetteur d'intérêt, en fonction du degré de sophistication du système de goniométrie utilisé et de la précision réalisable, on distingue trois principales méthodes qui sont répondues dans le domaine de la radio surveillance.

1.10.1. Radiolocalisation par triangulation goniométrique

La précision maximale est atteinte si plusieurs goniomètres sont utilisés pour déterminer la position de l'émetteur par triangulation. Si plus de deux lignes de relèvement sont utilisées pour la radiolocalisation, un résultat ambigu est généralement obtenu (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**.a)

La position la plus probable peut être calculée de différentes façons. Par exemple, la position peut être déterminée en minimisant les erreurs quadratiques ou par estimation d'un maximum de vraisemblance.

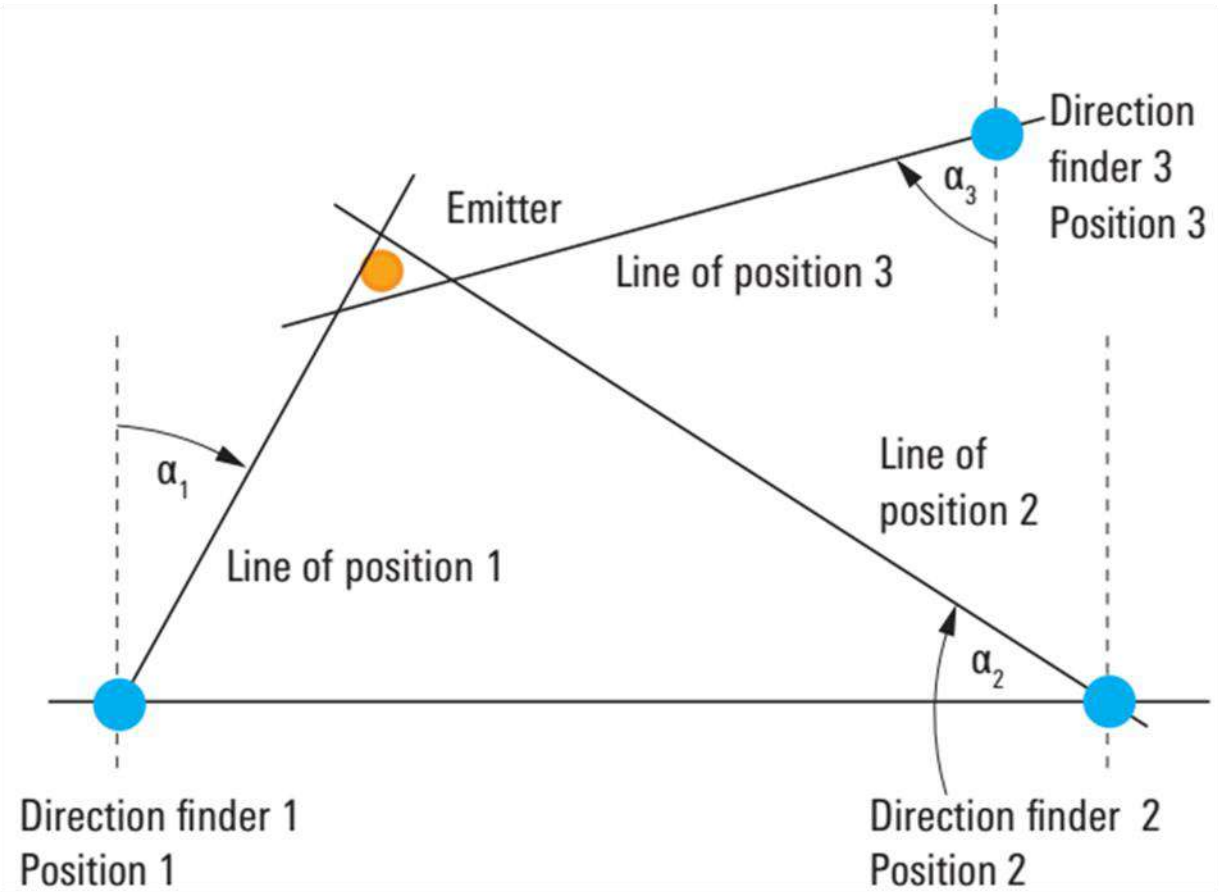


Figure 54.a: techniques de radiolocalisation

Triangulation goniométrique

1.10.2. Radiolocalisation par point transporté (Running fix)

Si un goniomètre en mouvement prend plusieurs directions d'arrivée d'un émetteur, la position de l'émetteur peut être déterminée par un point transporté (running fix) à condition que l'émetteur se déplace légèrement par rapport à la plate-forme du goniomètre et doit rester actif suffisamment longtemps pour déterminer sa position (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**.b).

1.10.3. Radiolocalisation à station unique

Cette technique implique l'utilisation des goniomètres qui mesurent l'élévation ε de l'onde incidente en plus de la ligne de relèvement (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**.c), la mesure de l'élévation et de a distance par rapport à l'émetteur sont basées sur l'estimation de la hauteur virtuelle H de l'ionosphère à travers laquelle l'onde est réfléchie.

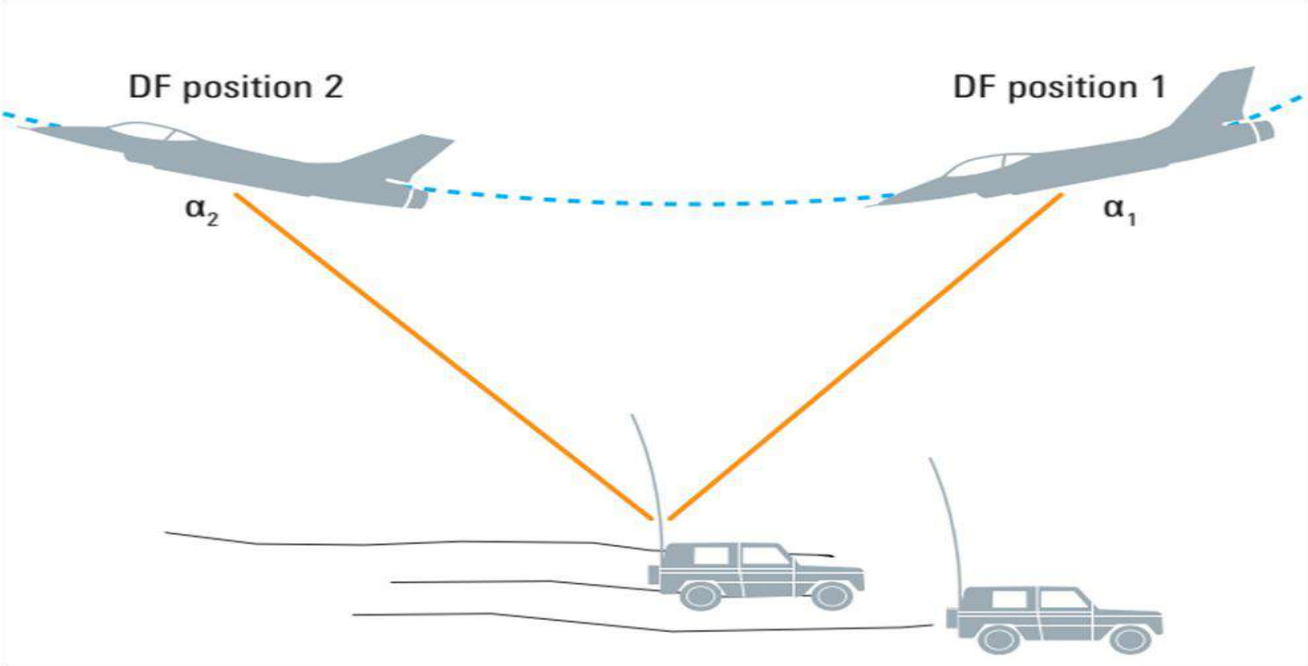


Figure 55.b: techniques de radiolocalisation

Point transporté

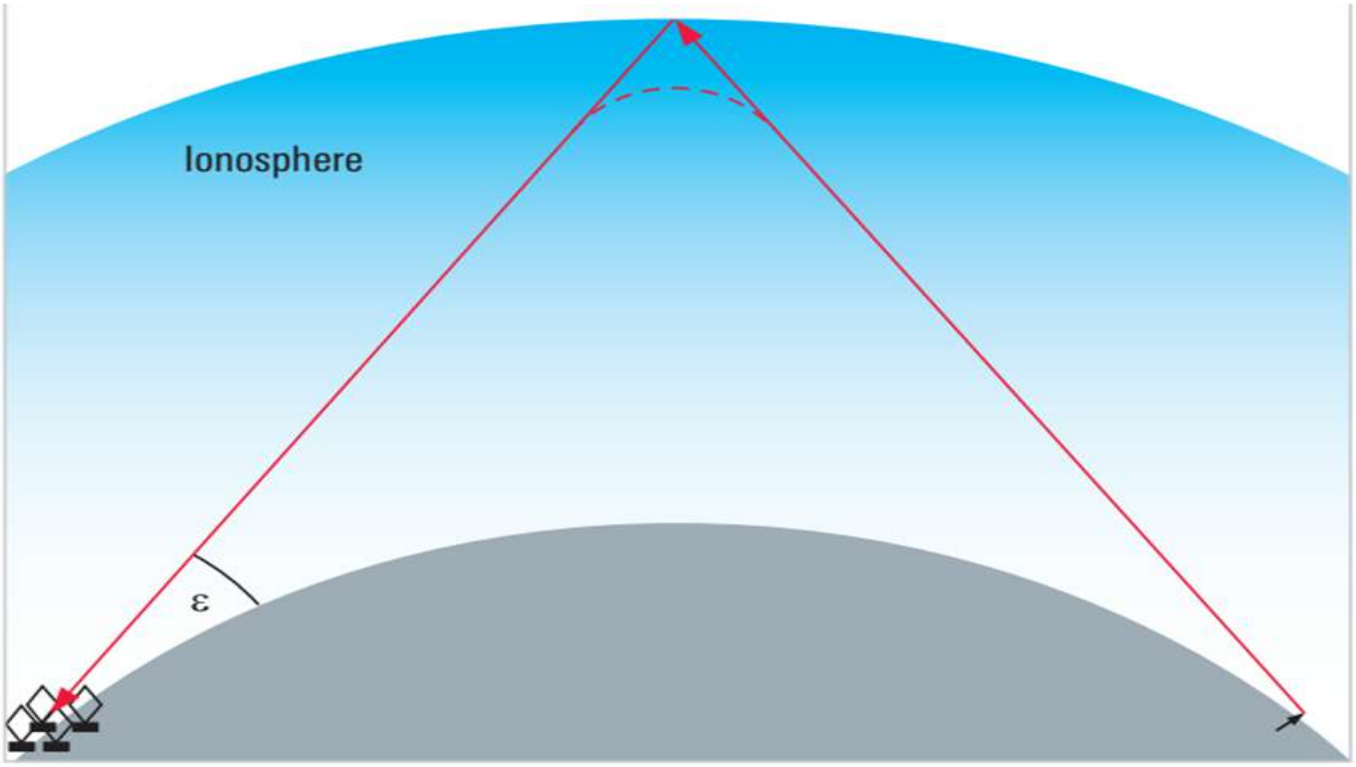


Figure 56.c: techniques de radiolocalisation

Localisation à station unique

1.11. Nouvelle perspective pour le contrôle du spectre

Pour avoir une efficacité de contrôle du spectre, il est primordial d'avoir des systèmes qui assurent la détection en temps réel des interférences à tout moment et n'importe où (anytime and anywhere). La tendance actuelle, répondant à cette exigence, est une infrastructure de contrôle du spectre, basée sur les réseaux de capteurs distribués.

Un réseau de capteurs à grande échelle, pour le contrôle de l'activité radio, implique certainement un flux important de données à analyser, afin d'arriver à une gestion efficace du spectre radioélectrique. Pour ce faire, il est nécessaire d'automatiser l'ensemble des traitements : de détection, d'analyse et de prédiction des émissions. Il sera ainsi possible d'en disposer d'une base de données de l'activité radio, permettant une meilleure gestion de l'occupation spectrale (selon différentes degrés de libertés : temps, fréquence, espace) et ainsi rentabiliser l'utilisation de cette ressource rare. L'architecture des réseaux de contrôle de spectre classiques basés sur des stations fixes de haute gamme engendre des coûts importants

de déploiement et de maintenance. L'évolution vers les réseaux de capteurs distribués s'inscrit dans une logique de réduction des coûts, et de plus une amélioration des performances, du fait que l'organe de réception et de plus en plus proche des émissions cibles [5].

Un schéma qui fait apparaitre les deux variétés des systèmes de contrôle du spectre est illustré dans la Figure 57.

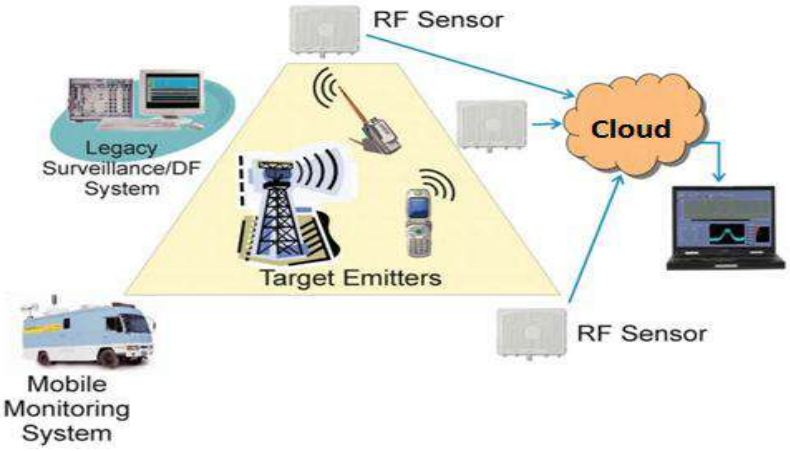


Figure 57: systèmes classiques de radio surveillance [5].

1.12. Conclusion

Dans ce chapitre, on a abordé les différents systèmes de radio surveillance, les stations de contrôle associées à ces systèmes, ainsi que les objectifs de la radio surveillance.

Ensuite on a vu comment ces objectifs sont atteints par les différents systèmes en utilisant les différentes applications de radio surveillance qui peuvent varier de la vérification de la conformité des transmissions spécifiques aux opérateurs jusqu' à la découverte et la radiolocalisation d'émetteurs inconnus ou illégaux, tout en prenant en considération les gammes de fréquences desquelles relèvent les signaux d'intérêt.

Enfin on a parlé de la nouvelle tendance des systèmes de contrôle du spectre, orientée sur l'utilisation des réseaux de capteurs distribués, qui représentent le prochain candidat pour l'automatisation des opérations de contrôle du spectre radioélectriques, en raison de leur coût réduit et de leur simplicité de mise en place par rapport aux systèmes classiques de radio surveillance.

Chapitre2

Goniométrie et critères de performance des stations de contrôle

2.1.Introduction

Le développement rapide des radios communications a abouti à l'augmentation de l'importance de la goniométrie. La goniométrie a pour but de rendre plus efficace le repérage des signaux radio fréquence, pour ce faire les antennes et la propagation des ondes, la fréquence radio (RF), la technologie des circuits, les logiciels d'ingénierie, etc., sont essentielles.

L'une des utilisations les plus importantes des goniométries consiste à *fixer* la position d'émetteurs. Cela peut inclure le sauvetage des naufragés et de localisation des signaux illégitimes inconnus, tels que les émissions indésirables.

La goniométrie implique l'estimation de la direction d'un émetteur, par rapport à une direction de référence spécifiée (en direction d'un véhicule, avion,…etc.). La direction de l'émetteur est définie par:

- ✓ Angle azimutal α (angle d'arrivé) calculé dans le sens horaire à partir de la direction de référence.
- ✓ Angle d'élévation ε par rapport au plan horizontal dans la direction du zénith.

2.2.La Goniométrie

La goniométrie est la détermination de la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique. Elle a deux applications principales :

- **En navigation** : la radiogoniométrie d'un émetteur fixe et connu permet de déterminer un lieu de position pour le récepteur et par conséquent une position en relevant au moins deux émetteurs.
- **En guerre électronique** : la radiogoniométrie d'une émission hostile permet de localiser cet émetteur soit en employant plusieurs récepteurs en des positions différentes, soit par calcul en fonction de la cinématique propre du récepteur.

La goniométrie permet à un récepteur radio muni d'un goniomètre de repérer la direction d'un émetteur : fixe (balise, émetteur illégal ou hostile), mobile (radio localisation).

2.3.Utilisation de la goniométrie

La goniométrie a été initialement utilisée dans les systèmes de navigation, jusqu'à l'avènement du *Système de Positionnement par Satellites* (GPS), qui semble faire disparaître cette utilisation [6].

Bien que la goniométrie n'est guère utilisée à des fins de navigation vue la disponibilité des systèmes de navigation par satellites (GNSS), il y'a une exigence croissante par rapport à la détermination de l'emplacement des émetteurs face à l'accroissement de la mobilité des équipements RF [11].

La nécessité de la goniométrie découle des besoins de localisation et de pistage des sources émettrices des signaux que ce soit pour des applications civiles ou militaires. Le tableau suivant résume les domaines d'utilisation de la goniométrie :

Tableau 1: Domaines d'utilisation de la goniométrie [6].

Utilisation de la goniométrie	Domaine
localisation des sources d'interférences ou des émetteurs non autorisés (stations de bases sans License)	Contrôle du spectre radioélectrique
reconnaissance des radiocommunications des organisations criminelles et détection des activités des ennemis potentiels	services de sécurité et intelligence militaire
reconnaissance de l'angle d'arrivée, des ondes électromagnétiques incidentes, beamforming	systèmes intelligents SDMA
Conception des émetteurs/récepteurs radios astronomiques	Radioastronomie

2.4.Mesure de l'angle d'arrivée

L'utilisation de la goniométrie joue un rôle primordial dans la radiocommunication avec ses divers domaines, dont la majorité utilise le principe qui consiste à estimer l'angle d'arrivée d'un émetteur par rapport à une direction de référence (le nord géographique, le nord magnétique, l'axe du toit d'une voiture, d'un bateau ou avion …etc.

L'angle d'arrivée est mesuré comme suit :

- ✓ L'azimut α mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir de la direction de référence.
- ✓ L'angle d'élévation Ɛ à partir du plan horizontal dans la direction de l'angle polaire (zénith) calculé à partir l'axe (*ZZ'*). [10]

Pour des considérations théoriques et afin de caractériser les propriétés des antennes, les notations angulaires sont utilisées selon le système de coordonnées polaires.

On aura donc:

$$\begin{cases} \alpha = \pi/2 - \phi \\ \varepsilon = \pi/2 - \theta \end{cases} \quad (2.1)$$

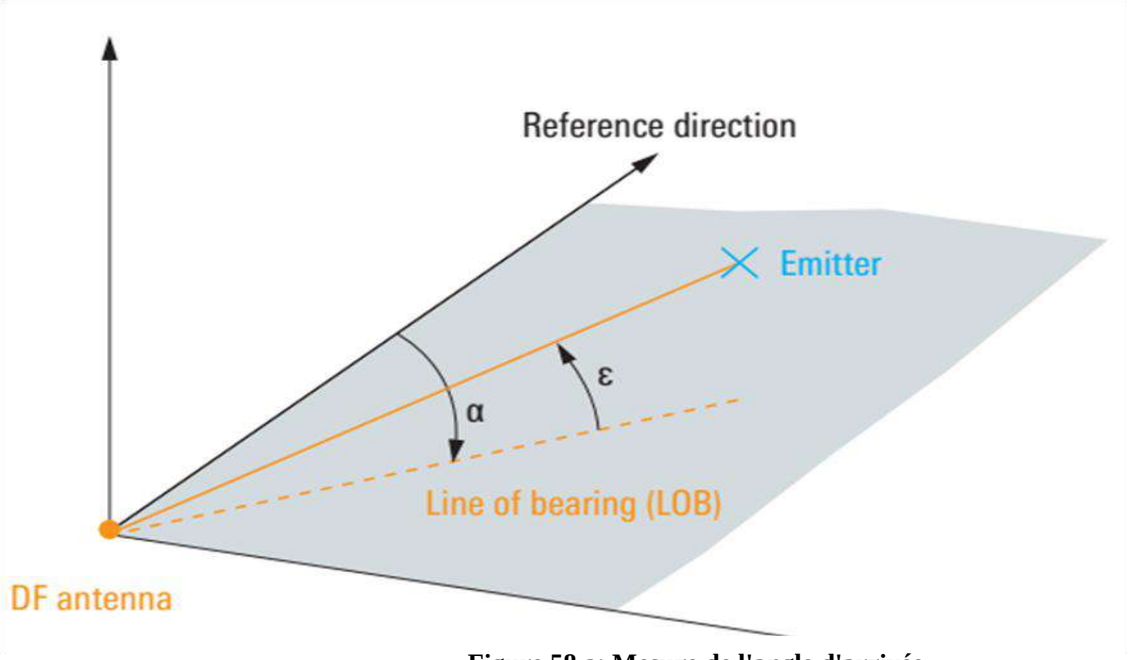


Figure 58.a: Mesure de l'angle d'arrivée

Définition de la direction d'émetteur

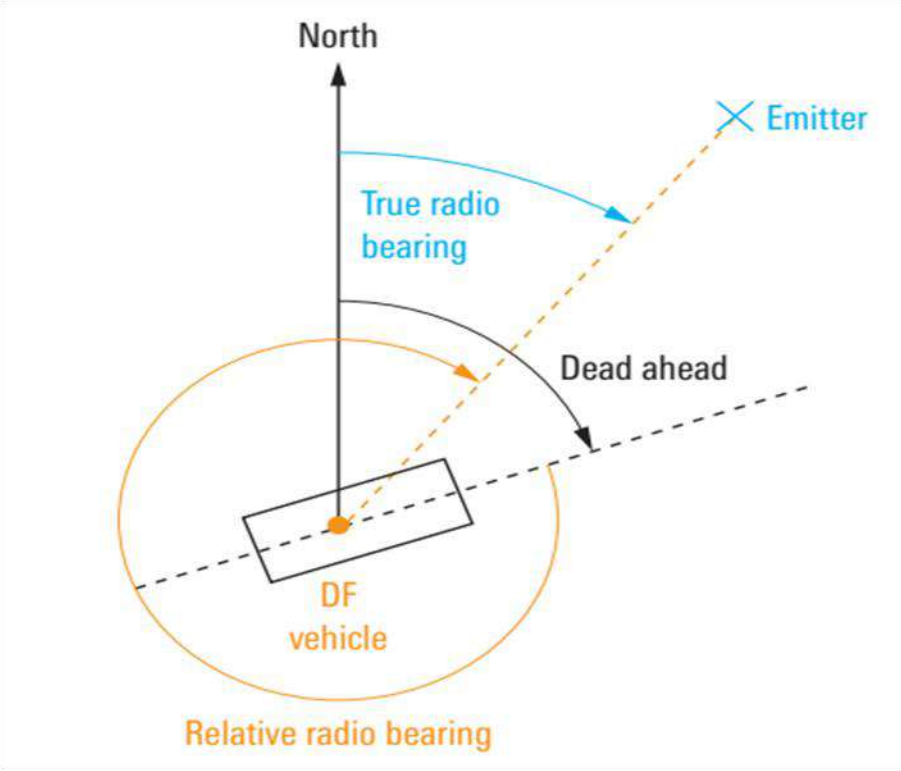


Figure 59.b: Mesure de l'angle d'arrivée

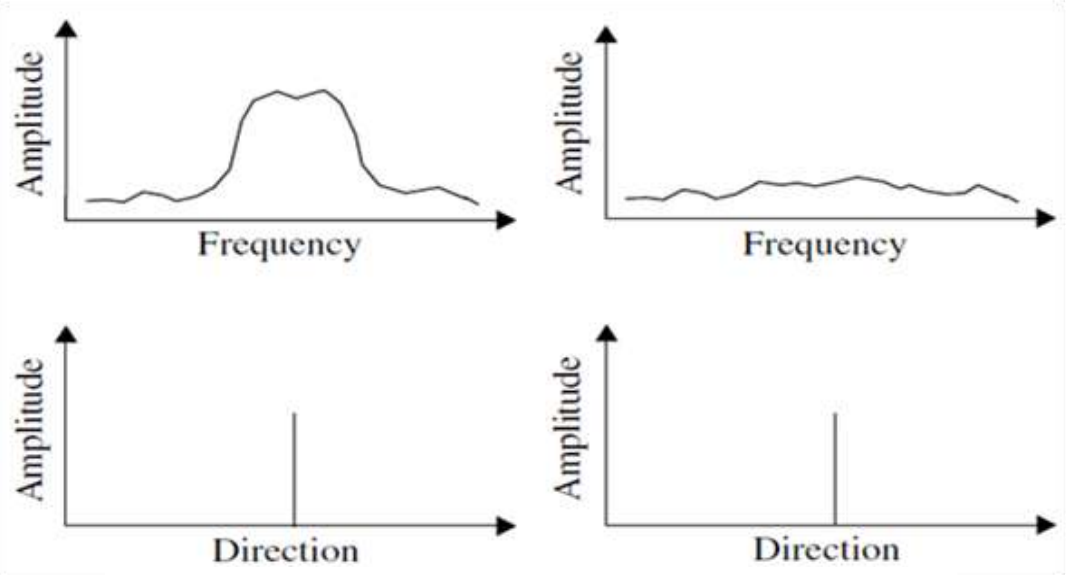
Directions de référence

Dans le cas général, les directions estimées des ondes incidentes sont différentes de la direction de l'émetteur en question, les angles d'incidence représentent alors simplement un résultat intermédiaire pour l'utilisateur, ce qui fait que les implémentations pratiques doivent prendre en compte les effets de la propagation et trouver un moyen pour les minimiser, parmi ces effets, on peut citer :la propagation par multi-trajets , les signaux d'interférences Co-canal et les interférences internes générées par le système.

2.5.Spectre angulaire et exploitation de l'angle d'incidence

Les informations fournies par l'angle d'incidence peuvent être exploitées dans plusieurs domaines, l'importance de la goniométrie réside dans la recherche de signaux inconnus, et l'estimation de leurs paramètres.

Dans la plupart des cas, le spectre angulaire d'un émetteur montre un contraste plus haut par rapport au spectre de puissance qui représente un faible contraste pour certains signaux.



(a) bande étroite (b) large bande

Figure 60: Spectre de puissance et spectre angulaire

La

Comme les composantes spectrales ayant le même angle d'arrivée ont une forte probabilité d'arriver du même émetteur, les goniométries sont très performants pour la segmentation des signaux, la Figure 61 illustre comment cela fonctionne .Bien que le spectre de puissance ne fournisse aucune identification sur les différents émetteurs, le spectre angulaire leur permet d'être clairement distingués [10].

montre à titre d'exemple le spectre de puissance et le spectre angulaire d'un signal classique à bande étroite, en comparaison avec les deux spectres (angulaire, de puissance) d'un signal étalé, on remarque que le contraste reste inchangé dans le spectre angulaire.

Comme les composantes spectrales ayant le même angle d'arrivée ont une forte probabilité d'arriver du même émetteur, les goniométries sont très performants pour la segmentation des signaux, la Figure 61 illustre comment cela fonctionne .Bien que le spectre de puissance ne fournisse aucune identification sur les différents émetteurs, le spectre angulaire leur permet d'être clairement distingués [10].

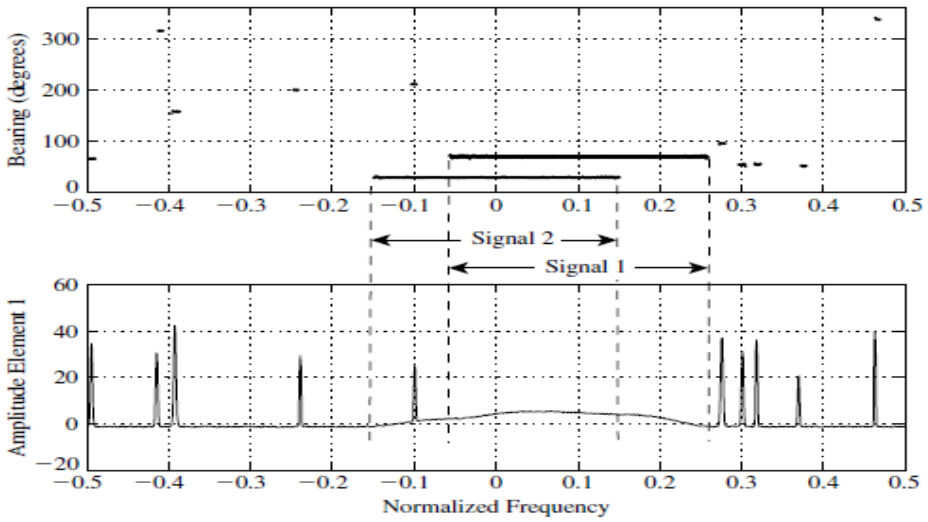


Figure 61: Segmentation des signaux grâce au spectre angulaire [10]

2.6.Configurations géométriques des Réseaux d'antennes utilisés dans la goniométrie

La géométrie des réseaux d'antennes (disposition des antennes élémentaires dans l'espace) peut prendre des formes diverses en fonction des paramètres à extraire. Dans la Figure 62, sont montrés trois configurations possibles des réseaux d'antennes. On peut distinguer une configuration linéaire(a), permettant de résoudre une seule composante angulaire (azimut ou élévation), et des configurations circulaires(b) et planaires(c) permettant de résoudre les deux composantes (azimut et élévation)[7].

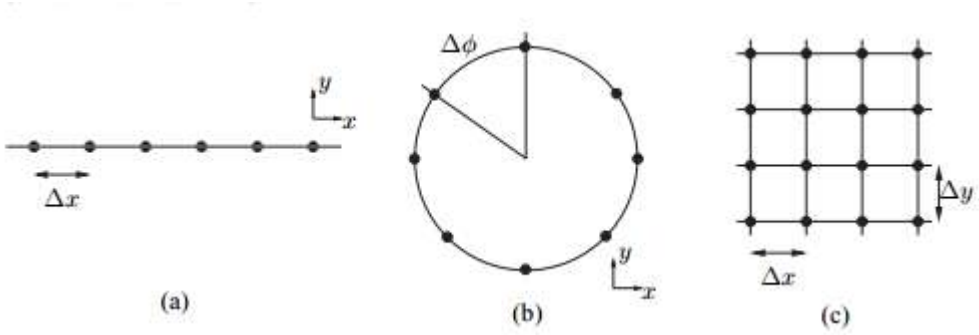


Figure 62: Configurations géométriques des réseaux d'antennes [7]

2.6.1. Réseaux d'antennes circulaires uniformes

Dans les environnements multi trajets, les signaux arrivent au terminal mobile depuis n'importe-quel azimut. Dans ces scénarios qui sont communs dans la radiolocalisation, les réseaux d'antennes appropriés sont les réseaux circulaires uniformes, qui fournissent une couverture azimutale entière (360°). La Figure 63 représente un exemple d'un réseau circulaire uniforme de rayon a, constitué de N éléments d'antennes uniformément espacés, le front d'onde incidente est plan. [8]

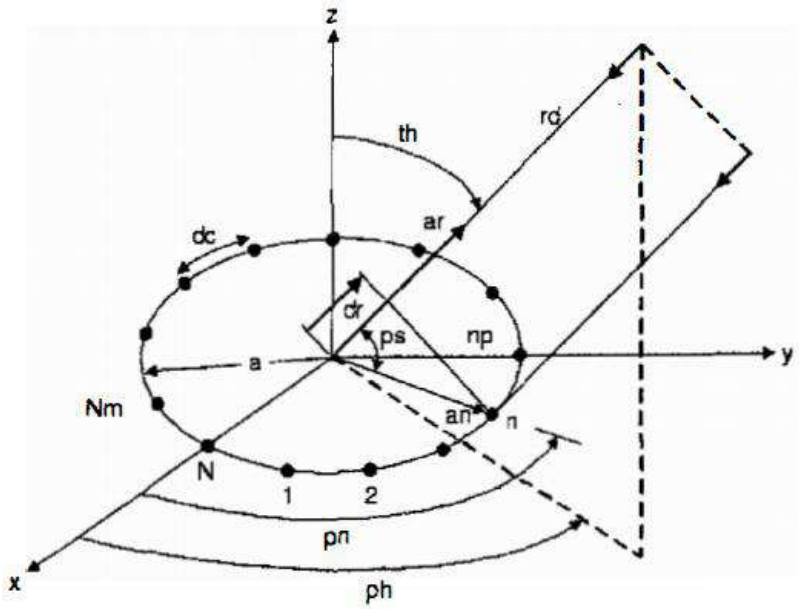


Figure 63: Géométrie des réseaux circulaires [8].

Le vecteur directionnel du réseau circulaire est donné par :

$$a(\theta) = a(\boldsymbol{\varsigma}, \phi) = \left[e^{\boldsymbol{\varsigma}\cos(\phi-\phi_1)}, e^{\boldsymbol{\varsigma}\cos(\phi-\phi_2)}, \dots, e^{\boldsymbol{\varsigma}\cos(\phi-\phi_N)}\right]^T \quad (2.2)$$

Où la dépendance d'élévation est à travers le paramètre $\boldsymbol{\varsigma} = \boldsymbol{ka}\sin\theta$, et le vecteur $\theta = (\boldsymbol{\varsigma}, \phi)$ est utilisé pour représenter les directions d'arrivée de la source [8].

2.7.Aperçu sur la conception des systèmes

Les systèmes récents de goniométrie ont la structure similaire à celle illustrée dans la Figure 64 . Des réseaux d'antennes à N éléments uniformément distribués en espace sont utilisés, un signal RF est issu de chaque antenne, ce qui fait en sortie N signaux qui vont traverser le réseau RF selon H canaux de mesures, et vont être numérisés et présentés à un bloc de traitement de signal qui va extraire les paramètres utiles sur ces signaux, comme:

- Le nombre d'ondes incidentes
- L'azimut et l'élévation des ondes détectées
- Polarisation des ondes détectées
- Niveaux de puissance, types de modulations, …etc.

Dans le cas le plus simple, un canal de mesure est assigné à chaque élément d'antenne: $H = N$, quoique pour des raisons économiques, il est souvent nécessaire de minimiser le nombre de canaux de mesures, dans ce cas, le réseau RF implémenté peut être un multiplexeur ou formateur de faisceau. [10]

Dans le cas où un multiplexeur est utilisé, le réseau d'antennes est divisé en sous-réseaux comportant chacun H éléments d'antennes connectés au canal de mesure d'une manière séquentielle.

Cela va induire une augmentation du temps de mesure dépendant du nombre d'étapes de mesures séquentielles (étapes pour qu'un canal redevient disponible pour le même sous-réseau) et par conséquent augmenter la durée minimale nécessaire du signal à détecter et à traiter. Un compromis entre le cout et le temps de mesure est donc requis. [10]

Les CAN ne fonctionnent pas à la fréquence des signaux captés par les antennes directement, des conversions à une fréquence intermédiaire (IF) convenable sont donc nécessaires (TUNER). Le signal d'entrée subit des mélanges de fréquences en un ou plusieurs étages, le résultat est filtré en une somme ou différence de fréquences, selon la fréquence intermédiaire désirée. Des oscillateurs sont utilisés pour le mélange de fréquences [10].

Au stade du traitement numérique, les signaux doivent être convertis en bande de base complexe et puis filtrés selon l'application.

Les stations de contrôle distribuées sur l'échelle d'un pays sont connectées localement à un ordinateur pour afficher et interpréter les résultats sur une interface homme-machine. [10]

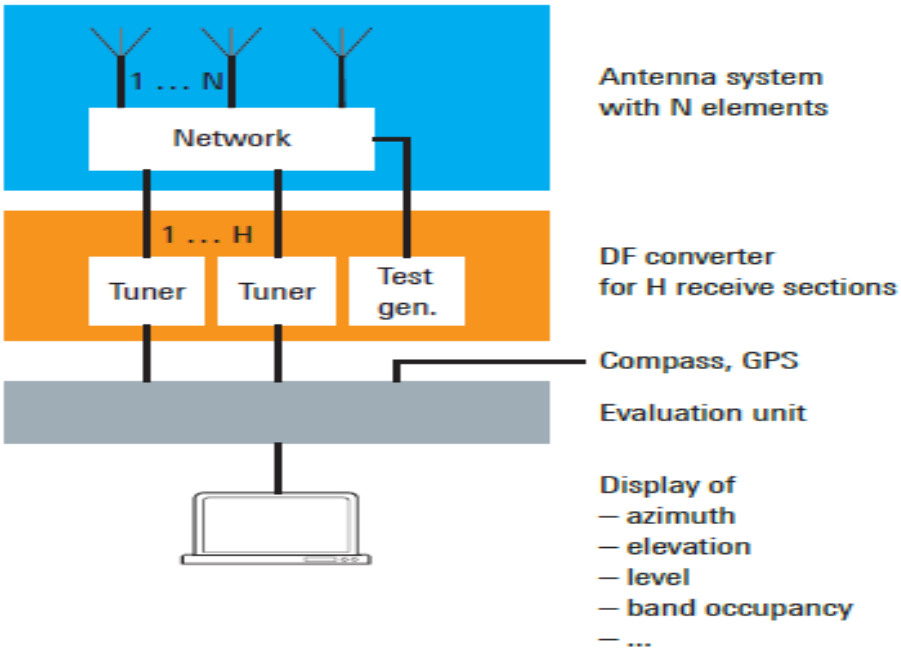


Figure 64: Structure d'un système de goniométrie [11]

2.8.Critères de performance d'un système de goniométrie

2.8.1. Précision

Caractérisée par les erreurs enregistrées sur l'angle d'arrivée, résultantes des variations de la fréquence et de la position de l'émetteur. Le SNR choisi doit être suffisamment grand pour avoir un minimum d'erreurs engendrées par le bruit. L'erreur quadratique moyenne est utilisée pour caractériser les erreurs.

2.8.2. Sensibilité

Se traduit par la capacité du goniomètre de fournir des résultats fiables même avec des signaux à faible amplitude. Dépend de la taille du réseau d'antennes, des gains et des facteurs de bruit des éléments d'antennes, du facteur de bruit du convertisseur et du temps de mesure.

Si on prend l'exemple d'un réseau circulaire uniforme, ayant un diamètre a = D et composé de N éléments omnidirectionnels, travaillant à la longueur d'onde λ, la limite inférieure de la variance σ_ϕ^2 sur l'azimut est donnée par :

$$\sigma_\phi^2 \geq \frac{\lambda^2}{\pi^2 D^2 NK}\left(\frac{1}{\mathrm{SNR}} + \frac{1}{N\mathrm{SNR}^2}\right) \qquad (2.3)$$

On suppose une onde à un angle d'élévation de 0°, l'équation (2.3) ne dépend pas de l'azimut, à cause de la nature symétrique des réseaux circulaires uniformes

K est le nombre d'échantillons utilisés pour mesurer l'angle d'arrivée, SNR est le rapport signal/bruit à la sortie de l'un des N chemins de réception supposés identiques. [10]

$$SNR = \frac{P}{Pn} = \left(\frac{E}{En}\right)^2 \tag{2.4}$$

Pour des valeurs du SNR suffisamment grandes, $\frac{1}{\text{SNR}} \gg \frac{1}{N\text{SNR}^2}$ On obtient :

$$E \geq E_n \frac{\lambda}{\sigma_\varphi \pi D \sqrt{NK}} \tag{2.5}$$

Par exemple, un système avec 5 éléments d'antennes avec D/λ = 0.5 une variance de l'angle d'arrivée de $\sigma_\phi = 2° = 0.0349$ rad et de k=1 va nécessiter une valeur du champ $E \geq 4.08\ E_n$ [10]

2.8.3. Immunité suffisante aux signaux à haute amplitude

L'immunité aux signaux à haute amplitude d'un goniomètre caractérise son comportement dans la présence des signaux à haute amplitude en dehors du canal de fréquences contenant le signal d'intérêt. A cause de l'augmentation de l'intensité de l'émission, cet aspect joue un rôle critique dans l'implémentation des systèmes de goniométrie. [10]

Les effets de saturation, les intermodulations, le mélange réciproque sont les principaux facteurs qui ont une influence sur l'immunité du système aux signaux à haute amplitude.

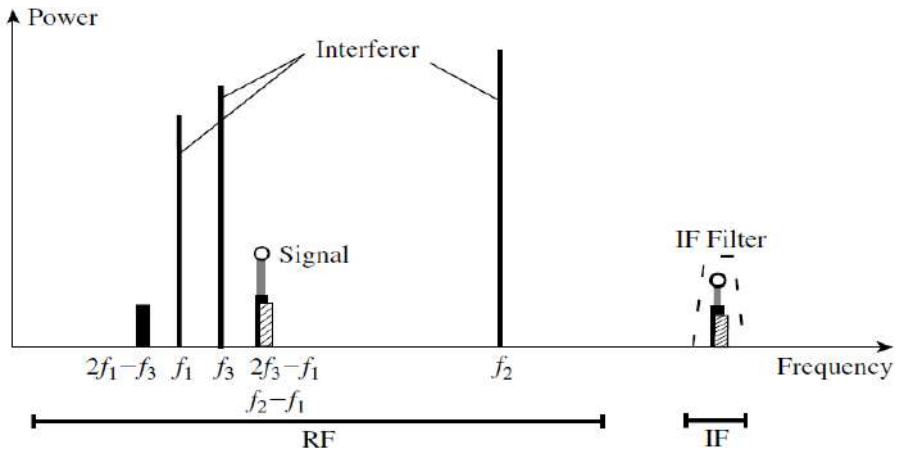


Figure 65: Produits d'intermodulations du second ordre et de 3eme ordre. [10]

Les effets de saturation sont significatifs principalement avec la conversion A / N. L'intermodulation est un effet où deux ou plusieurs grands signaux sont mélangés, à cause des fonctions de transfert non linéaires des dispositifs électroniques tels que les amplificateurs et les mélangeurs (Figure 65) [10].

L'intermodulation est généralement caractérisée en utilisant les points d'interception IP_k de l'ordre k. Dans les systèmes réels, les produits d'intermodulation de deuxième et troisième ordres prédominent. En

utilisant le point d'interception IP_2, nous obtenons la relation suivante entre la puissance des produits de mélange de second ordre P_{m2} à fréquence f_{m2} et les signaux parasites P_{I1} et P_{I2} aux fréquences f_1 et f_2 :

$$P_{m2} = \frac{P_{I1} P_{I2}}{IP_2} \tag{2.6}$$

En considérant des petits signaux et la relation des fréquences suivante :

$$f_{m2} = |f_1 \pm f_2| \tag{2.7}$$

Pour la puissance des produits de mélanges de troisième ordre, on obtient :

$$P_{m3} = \frac{P_{I1}^p P_{I2}^q P_{I3}^r}{IP_3^2} \; p + q + r \tag{2.8}$$

La relation en fréquence entre les brouilleurs et les produits de mélange vérifie :

$$f_{m3} = |pf_1 \pm qf_2 \pm rf_3| \tag{2.9}$$

D'une manière conventionnelle, le point d'interception est spécifié comme un niveau de puissance référencé à 1 mW en dBm, IP_k (dBm) = 10 log (IP_k /1mW):

$$IP_2 = P_{I1} + P_{I2} - P_{m2} \quad (dBm) \tag{2.10}$$

$$IP_3 = \frac{pPI_1 + qPI_2 + rPI_3 - P_{m3}}{2} \tag{2.11}$$

Le mélange réciproque se produit dans les systèmes d'échantillonnage tels que les CAN et les mélangeurs. Il est dû aux fluctuations de phase dans le signal échantillon (par exemple, générateur d'horloge ou oscillateur local). Ces fluctuations provoquent un élargissement du signal dans le domaine fréquentiel, qui est connu comme bruit de bande latérale. Si un signal d'interférence

Atteint le dispositif d'échantillonnage, le bruit de bande latérale sera mélangé dans ses bandes latérales. Si le signal d'intérêt est situé dans ces bandes latérales, il y aura une perte du SNR (Figure 66) [10].

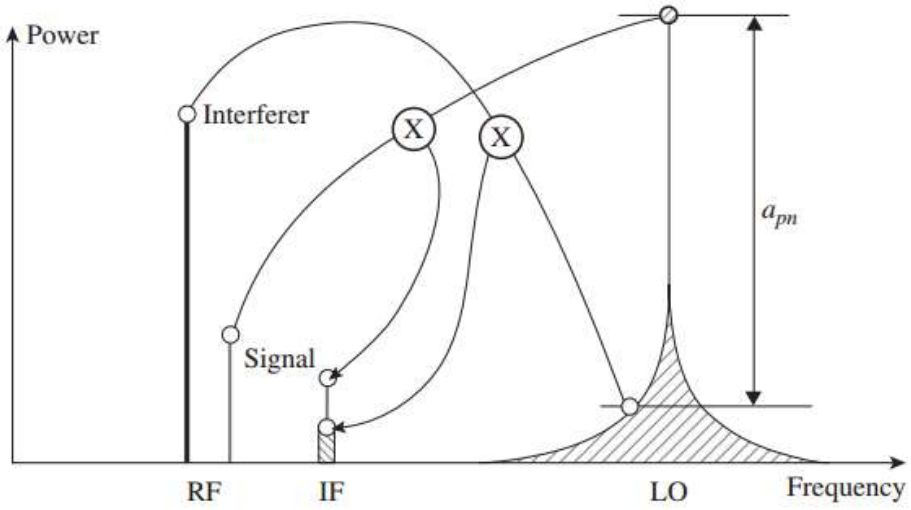


Figure 66: Mélange réciproque [10].

La puissance de bruit provoqué par le mélange réciproque au sein d'un récepteur à bande étroite de largeur B est déterminée par :

$$P_{np} = P_I B 10^{a_{pn}/10} \tag{2.12}$$

Où a_{pn} est la densité spectrale de puissance du bruit de phase à bande latérale unique de l'oscillateur local ou autre dispositif d'échantillonnage lié à la porteuse (généralement donnée en DBc / Hz), P_I est la puissance du signal brouilleur.

2.8.4. Immunité aux distorsions dues à la propagation multi trajets

Dans des circonstances normales, la propagation des ondes entre l'émetteur et le goniomètre est perturbée par les bâtiments, les montagnes, les collines, etc. Même s'il y'a visibilité directe, des ondes secondaires continuent de surgir, à cause de la réflexion, la réfraction et la diffraction, qui seront ensuite superposées à l'onde directe comme étant des signaux d'interférence. Si le signal d'interférence a un niveau de puissance inférieur à celui de l'onde désirée, l'erreur sur l'angle d'arrivée peut être minimisée en choisissant des dimensions appropriées dans le goniomètre.

Dans le cas le plus simple impliquant des algorithmes à ondes uniques, il suffit de sélectionner une grande ouverture d'antenne [10].

Avec des algorithmes de goniométrie à haute résolution, nous pouvons séparer l'angle d'incidence dominant de l'onde afin qu'il soit possible d'estimer la direction de l'émetteur (par exemple, en employant des modèles de propagation). L'inconvénient ici est la grande quantité d'informations requises à l'avance (En plus de la complexité de calcul) [10].

2.8.5. Immunité aux signaux d'interférences Co-canal

Contrairement aux interférences dues aux multi trajets, les signaux d'interférences Co-canal se produisent habituellement sous forme des signaux non corrélés dans la bande de fréquences qui contient le signal d'intérêt. Cela peut être causé, par exemple, par les équipements et les systèmes électroniques, des dépassements dans les émetteurs ou des défauts dans les systèmes de transmission. Des signaux parasites Co-canal corrélés se produisent lors de la goniométrie des émetteurs à ondes courantes. [10]

2.8.6. Courte durée minimale nécessaire pour effectuer le traitement

Les techniques de transmission avancées utilisent parfois l'accès multiple à répartition dans le temps (TDMA), le saut de fréquence ou la transmission en burst. La goniométrie est possible Avec de tels signaux uniquement si l'on peut traiter les signaux des antennes avec une rapidité suffisante et avec un rapport signal / bruit acceptable pour rendre ces derniers utiles pour le calcul des angles d'arrivées. Les courtes durées des signaux imposent également qu'un nombre suffisant d'échantillons soit disponible pour l'estimation d'une moyenne sur le signal, par conséquent, des systèmes d'antennes plus grands sont nécessaires pour garantir la même sensibilité qu'avec des signaux continus [10].

2.8.7. Probabilité d'interception et Vitesse de recherche élevées pour les goniométries à balayage

Pour avoir une fiabilité de l'interception et de la goniométrie avec des signaux ayant une fréquence inconnue, la plage de fréquence possible doit être traitée dans un intervalle de temps aussi court que possible par rapport à la durée de transmission du signal d'intérêt. [10]

2.9.Les réseaux d'antennes utilisés pour la goniométrie

Les caractéristiques d'un goniomètre dépendent exclusivement des caractéristiques du réseau d'antennes en plus du bruit intrinsèque du système.

Avec une approximation en bande étroite, le modèle standard de traitement du signal associé aux réseaux d'antennes exprime ce fait pour N antennes et M ondes par une relation entre le vecteur de mesure x (t) et les vecteurs d'orientation du réseau $\mathbf{a}(\phi_j, \theta_j)$, les signaux $s_j(t)$ et le vecteur de bruit n(t).

$$\mathbf{x}(\mathrm{t}) = \sum_{j=1}^{M} s_j(t)\mathbf{a}(\phi_j, \theta_j) + \mathbf{n}(\mathrm{t}) \qquad (2.13)$$

La sommation survient sur les ondes superposées sur le canal de fréquences d'intérêt. Les composantes $a_i(\phi, \theta)$ des vecteurs directeurs du réseau représentent les caractéristiques directionnelles relatives complexes des sorties des antennes.

$$\mathbf{a}(\phi\,, \theta) = [a_1(\phi, \theta) \ldots a_i(\phi, \theta) \ldots a_N(\phi, \theta)]^T \qquad (2.14)$$

Où ϕ représente l'angle azimutal et θ l'angle du zénith. Le continuum formé par les vecteurs $\mathbf{a}(\phi\,, \theta)$ dans l'espace vectoriel complexe de N dimensions C^N contient l'ensemble des vecteurs directionnels du réseau et montre pour ainsi dire, les caractéristiques directionnelles des sorties du réseau d'antennes à N éléments.

L'importance clé des vecteurs directionnels du réseau d'antennes réside dans le fait de transformer la variation de l'angle d'incidence de l'onde en une variation du vecteur de mesure, qui serait plus ou moins exploitable en fonction de la puissance du signal et de la puissance du bruit. Ceci est exprimé par la limite de Cramer-Rao liée à une sensibilité à la direction. [10]

2.9.1. Critères de conception d'un réseau d'un réseau d'antennes pour la goniométrie

Les aspects suivants déterminent les principaux critères de conception d'un réseau d'antennes approprié pour la goniométrie :

Une ouverture d'antenne la plus grande possible : Pour avoir une forte dépendance entre les vecteurs directeurs et les angles d'incidence c à d avoir des changements importants aux niveaux des vecteurs directeurs si les changements sur les angles d'incidence sont importants, il faut utiliser des dimensions d'antennes qui sont grandes relativement à la longueur d'onde.

A partir de là, la géométrie du réseau peut être dérivée : les réseaux circulaires sont utiles pour avoir une vision panoramique le l'azimut (une couverture azimutale entière, de 360°), tandis que les réseaux linéaires sont utiles pour les angles azimutaux inférieurs à 90 °. Pour les angles d'interception supérieurs à 90 °, il est judicieux d'utiliser des réseaux circulaires partiels [10].

Nombre d'éléments d'antenne : Pour une taille d'ouverture donnée, les ambiguïtés peuvent être évitées en introduisant un nombre suffisant d'éléments d'antennes (équivalent à la dimension de l'ensemble des vecteurs directionnels). Dans toute mise en œuvre pratique, nous devons prendre en compte le fait que le couplage entre les éléments augmentera avec un plus grand nombre d'éléments. Cela peut entraîner une perte de sensibilité. Un grand nombre d'éléments implique également un plus grand nombre de canaux de mesure si nous ne souhaitons pas augmenter le temps de mesure. [10]

Nous devons également rappeler qu'en pratique, le paramètre espace s'étend généralement bien au-delà des angles d'incidence de l'onde, ϕ et θ. En particulier, la dépendance en polarisation des vecteurs directeurs du réseau et l'influence des différentes plates-formes de support (p. Ex. Mât, véhicule) sur les vecteurs directeurs du réseau entraîne des erreurs sur les angles d'arrivée, si ces problèmes ne sont pas pris en compte lors de la conception d'antennes ou de la caractérisation de l'ensemble du réseau.

Une approche de conception éprouvée consiste à configurer le réseau d'antennes de façon à maximiser la sensibilité de ses vecteurs directeurs aux paramètres à évaluer et à la minimiser à l'égard des paramètres non intéressants. [10]

Si nous voulons concevoir un réseau d'antennes pour l'estimation de l'azimut d'un émetteur. Comme nous ne sommes pas intéressés par l'élévation, nous pouvons utiliser une géométrie d'antenne qui s'étend horizontalement. En outre, nous ne sommes pas intéressés par la polarisation, nous devrions donc sélectionner nos éléments d'antenne en fonction de la polarisation de préférence prévue et (grâce à un découplage minutieux des lignes d'alimentation et des structures de support), veiller à ce que les vecteurs directeurs du réseau soient largement indépendants de toute fluctuation possible des paramètres de polarisation. Parce que nous utiliserons les antennes sur les pylônes ainsi que sur les véhicules, nous devons également nous efforcer d'un bon découplage entre les éléments d'antenne et la structure de support. Ceci est réalisé principalement par l'utilisation d'éléments d'antennes symétriques avec une rejection de mode commun très élevée [10].

2.9.2. Exemple de conception

La Figure 67 montre un réseau d'antennes pour la goniométrie des signaux polarisés verticalement dans la gamme de fréquences de 20 MHz à 3 GHz. Le réseau d'antennes circulaire externe a un diamètre d'environ 1 m et couvre la gamme de fréquences de 20 MHz à 1,3 GHz. Il se compose de neuf éléments dipolaires. Les éléments présentent une caractéristique approximativement omnidirectionnelle dans le plan horizontal, tandis que la caractéristique directionnelle des phases se manifeste sous une forme d'un cosinus dans l'équation suivante :

$$a_i(\phi,\theta) \approx \sin\theta\, e^{j\,k_0 R \sin\theta \cos\left(\phi - \frac{2\pi(i-1)}{N}\right)} \tag{2.15}$$

Où R est le rayon du réseau d'antennes, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ et N, le nombre d'éléments $N = 9$,[10].



Figure 67: Réseau d'antennes utilisé pour la goniométrie de 20 MHz à 3 GHz [10].

Le réseau circulaire intérieur se compose de huit éléments dipolaires disposés en face à un réflecteur cylindrique. L'élément de référence omnidirectionnel est implémenté à travers l'ensemble des éléments dipolaires. La broche située au centre de l'antenne est utilisée comme parafoudre [10].

2.9.3. Nombre d'antennes élémentaires et canaux de traitement

Pour obtenir des résultats non ambigus de la goniométrie, les paramètres suivants doivent satisfaire certaines conditions :

- Nombre d'antennes élémentaires
- Distance entre les antennes élémentaires
- Nombre d'ondes à traiter
- Rang η de la matrice de corrélation du signal
- Vecteur directionnel du réseau.

Wax et Ziskind (1989) font l'hypothèse basique que tout ensemble arbitraire de N vecteurs directeurs du réseau ai (Θ), i = 1,2, ..., N avec des vecteurs de paramètres Θ disjoints sont linéairement indépendants. En se basant sur cette hypothèse et avec un rang de la matrice de corrélation sans bruit des signaux ayant pour valeur $\eta = rang(SS^H) \leq M$ Il est montré que $M < \frac{N+\eta}{2}$.

Les ondes peuvent être soumises à une goniométrie sans ambiguïté. Pour le cas limitant des signaux non corrélés, nous obtenons le critère connu M <N ou M <N-1

L'hypothèse de départ est essentielle pour l'implémentation du réseau d'antennes puisque l'indépendance linéaire des vecteurs directeurs du réseau doit être maintenue avec la configuration la plus éloignée possible du réseau d'antennes, compte tenu des influences de l'erreur. D'un point de vue pratique,

cet aspect joue un rôle prédominant dans la détermination du nombre minimal d'antennes élémentaires pour une taille donnée du réseau [10].

La sensibilité maximale et la durée minimale du signal requises peuvent être assurées si chaque élément d'antenne est traité à l'aide d'un canal de traitement séparé. Si nous souhaitons obtenir simultanément de bonnes caractéristiques de signaux forts, de telles solutions sont trop coûteuses dans de nombreux cas. Ainsi, nous devons faire face à un nombre réduit de canaux de traitement et diviser le réseau d'antennes en sous-réseaux. Des mesures cohérentes sont effectuées dans les sous-réseaux, qui sont traités séquentiellement, la Figure 68 représente le diagramme en blocs basique de ce type d'acquisition de données pour les réseaux d'antennes utilisant une seule voie de mesure.

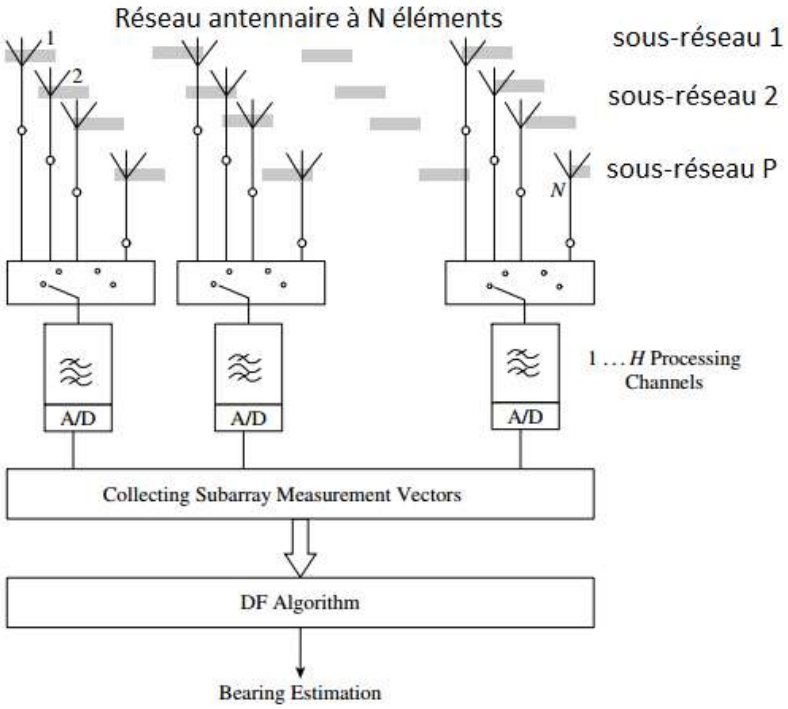


Figure 68: Traitement séquentiel de N éléments d'antennes avec H canaux de mesure [10]

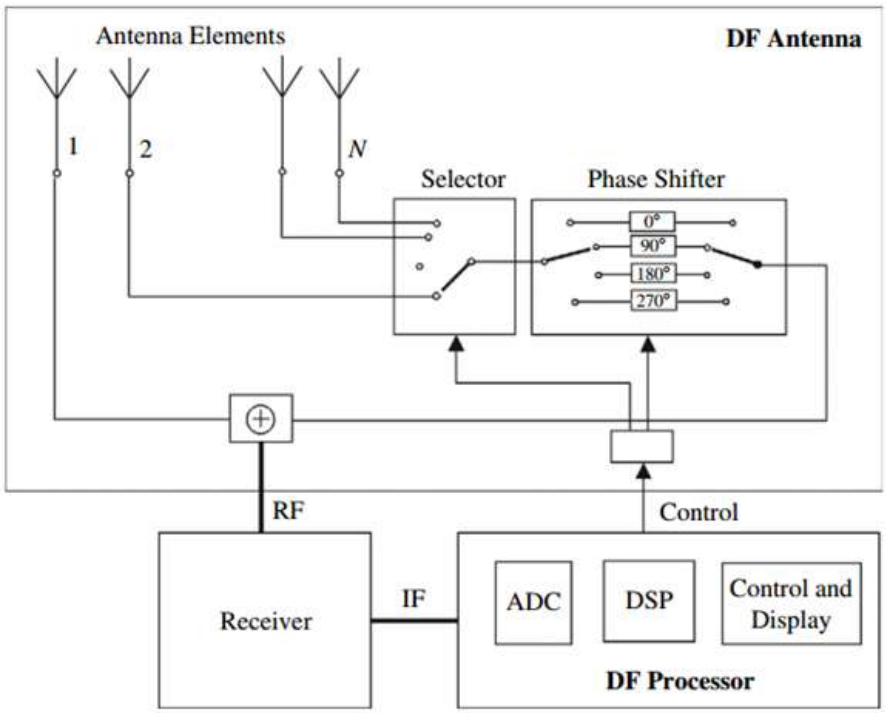


Figure 69: Exemple d'un goniométrie avec N élements et un canal de mesure unique [10]

Étant donné que la référence de phase à partir d'une deuxième voie de mesure est insuffisante, l'information de phase doit être obtenue indirectement par des mesures d'amplitude dans ce cas. Le principe de base consiste à effectuer cette mesure d'amplitude en plusieurs étapes avec différents états d'antenne, puis à calculer les angles d'incidence basés sur les changements enregistrés sur la puissance du signal mesurée et sur des changements connus sur l'état des antennes (Figure 69) [10].

La différence de phase β1k entre l'élément de référence (1er élément) et le $K^{ième}$ élément avec k∈ {2 ... N} est déterminée en additionnant les sorties d'élément, qui sont modulées en phase dans quatre états (0◦, 90◦, 180◦ et 270◦) avec l'élément 1 de référence. La mesure 4 (N-1) des modules carrés de la sortie de l'antenne est requise. [10]

Pour un cycle de mesure, nous avons :

$$\begin{cases} y_{k1}=|x_1+x_k|^2=|x_1|^2+|x_k|^2+x_1x_k^*+x_kx_1^* \\ y_{k2}=|x_1-x_k|^2=|x_1|^2+|x_k|^2-x_1x_k^*-x_kx_1^* \\ y_{k3}=|x_1-jx_k|^2=|x_1|^2+|x_k|^2+jx_1x_k^*-jx_kx_1^* \\ y_{k4}=|x_1+jx_k|^2=|x_1|^2+|x_k|^2-jx_1x_k^*+jx_kx_1^* \end{cases} \quad (2.16)$$

Avec $y_{k1}, y_{k2}, y_{k3}, y_{k4}$ représente respectivement Mesure 1, 2,3et Mesure 4

En prenant la différence, on obtient les parties réelle et imaginaire des produits conjugués complexes $x_1x_k^*$:

$$\begin{cases} y_{k1} - y_{k2} = 4Re(x_1 x_k^*) \\ y_{k3} - y_{k4} = -4Im(x_1 x_k^*) \end{cases} \qquad (2.17)$$

Pour la différence de phase :

$$\beta_{1k} = \arctan\left(-\frac{y_{k3} - y_{k4}}{y_{k1} - y_{k2}}\right) \qquad (2.18)$$

2.9.4. Goniométrie large bande

***Signaux en bandes étroite et large* :** soit un signal sur porteuse f_0 noté s(t) avec :

$$s(t) = RE\{a(t)exp[j\varphi(t)]exp[j2\pi f_0 t]\} \qquad (2.19)$$

Son spectre est noté $\hat{s}$(f). Le signal étant filtré en bande de base $f_0 = 0$ ou sur porteuse,$f_0 > 0$, son support spectral est supposé borné sur $\left[f_0 - \frac{\Delta f}{2}\ ,\ f_0 + \frac{\Delta f}{2}\right]$.

La fréquence centrale$f_c(\hat{s})$ dudit signal et sa 1/2 bande équivalente $\frac{BW_e}{2}$ sont définies ainsi :

$$f_c(\hat{S}) = \frac{\int_{f_0-\frac{\Delta f}{2}}^{f_0+\frac{\Delta f}{2}} f\left|\hat{S}(f)\right|^2 df}{\int_{f_0-\frac{\Delta f}{2}}^{f_0+\frac{\Delta f}{2}} \left|\hat{S}(f)\right|^2 df} \quad , \quad \frac{BW_e(\hat{S})}{2} = \left(\frac{\int_{f_0-\frac{\Delta f}{2}}^{f_0+\frac{\Delta f}{2}} (f-f_c)\left|\hat{S}(f)\right|^2 df}{\int_{f_0-\frac{\Delta f}{2}}^{f_0+\frac{\Delta f}{2}} \left|\hat{S}(f)\right|^2 df}\right)^{1/2} \qquad (2.20)$$

À partir de ces définitions, le signal est dit « intrinsèquement en bande étroite » si le rapport entre la bande équivalente et la porteuse vérifie : $\frac{BW_e}{f_0} << 1$ (en pratique la limite souvent considérée est :$\frac{BW_e}{f_0} < \frac{1}{20}$), [2].

Un signal à large bande est un signal ayant l'énergie distribuée sur une bande passante équivalente (BW_e) importante par rapport à la fréquence centrale du signal. La goniométrie pour ce genre de signaux nécessite des méthodes qui ne sont pas élaborées par les procédures traditionnellement utilisées pour estimer la direction d'arrivée d'un signal.

La technique d'étalement du spectre est de plus en plus utilisée dans les radiocommunications de nos jours. Elle comprend :

- ✓ Le saut de fréquence (FH)
- ✓ Spectre étalé à séquence directe (DSSS)

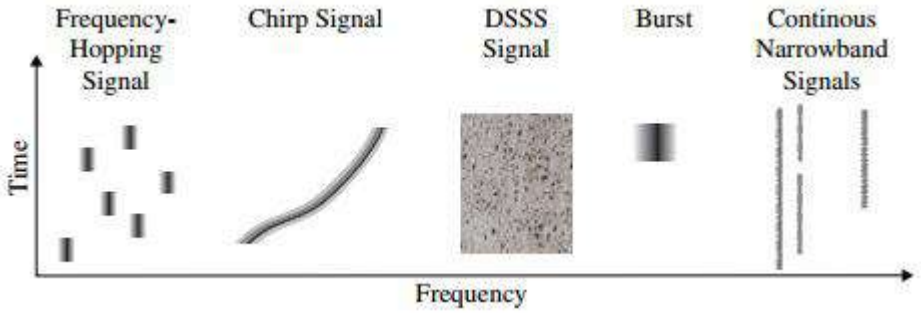


Figure 70: Représentation temps-fréquence des signaux à FPI et des signaux classiques continus

Dans de nombreuses applications, les signaux Burst à durée compressée sont également importants (Figure 70).

Les signaux continus classiques y sont également représentés à titre de référence.

En utilisant le saut de fréquence, le message à transmettre est découpé en petites sections (généralement de quelques millisecondes en fonction de la plage de fréquences) et transmises à l'aide de fréquences porteuses variées d'une manière pseudo-aléatoire. Le récepteur suit la séquence pseudo-aléatoire convenue afin de récupérer le contenu du message.

Dans les systèmes radio DSSS, le signal de message subit une modulation pseudo-aléatoire à vitesse élevée, ce qui provoque la distribution du signal souhaité sur une large bande de fréquences. La goniométrie avec des signaux de ce type nécessite des largeurs de bande qui ne sont généralement plus petites par rapport à la fréquence centrale. Par conséquent, notre approximation en bande étroite du modèle de signal ne tient plus, et nous devons maintenant prendre en compte la réponse en fréquence des caractéristiques de l'antenne. [10]

Les systèmes de goniométrie pour ces types de signaux utilisent la compensation de la réponse en fréquence. Deux approches sont possibles.

La focalisation cohérente : Les signaux d'antenne mesurés sont multipliés par un terme de compensation avant le calcul des directions d'arrivées. Ce terme compense les différences de retard entre les éléments d'antenne. En conséquence, des informations sont nécessaires à l'avance sur les angles d'incidence approximatifs des ondes.

La focalisation non cohérente : la gamme de fréquences que nous surveillons est divisée en sous-bandes à l'aide d'un banc de filtres. La goniométrie est alors effectuée en se basant sur le modèle à bande étroite. Les parties relatives du spectre angulaire obtenues de cette manière sont combinées et attribuées à un émetteur. [10]

La Figure 71 illustre le principe de fonctionnement d'un goniomètre à large bande, qui utilise la focalisation non cohérente [10].

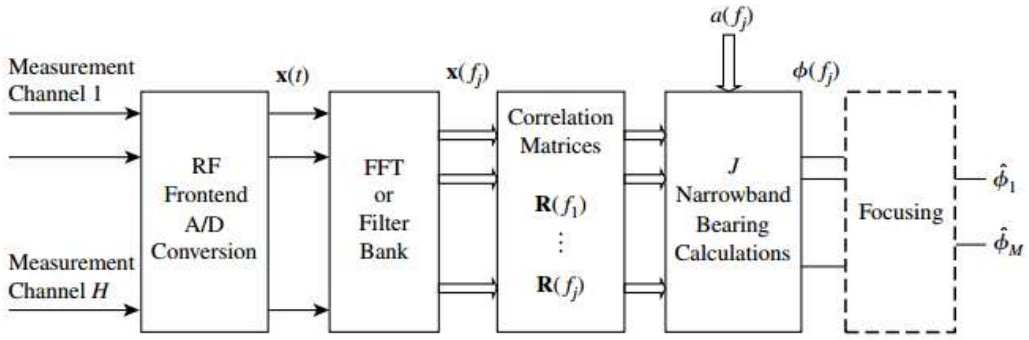


Figure 71: Principe de fonctionnement d'un goniomètre à large bande [10]

Après la conversion A / N et la conversion numérique en bande de base, les parties réelles et imaginaires du signal à large bande dans chaque voie de mesure, sont introduites dans un banc de filtres numériques, qui est conventionnellement implémenté par transformée de Fourier rapide (FFT) ou par banc de filtres polyphasé. Le banc de filtres découpe le signal à large bande, ayant une bande passante B_{RT} en canaux à bande étroite J_F de bande passante B_C, avec : $B_{RT} = J_F B_C$

Dans l'étape suivante dans la chaîne de traitement, les sorties du banc de filtres de chaque chemin de mesure, sont combinées pour calculer les matrices de corrélation. La taille minimale des matrices de corrélation dépend de l'algorithme utilisé : les techniques basées sur les modèles mono-onde ont besoin d'un vecteur de taille $N * 1$ pour chaque canal de fréquence, tandis que les algorithmes multicanaux nécessitent jusqu'à $(N^2 + N)/2$ termes de corrélation par canal de fréquence [10].

Les matrices de corrélation et les multiples vecteurs directionnels du réseau dépendant de la fréquence, forment les données d'entrée pour le calcul de l'angle d'arrivé. Le spectre angulaire obtenu de cette manière est ensuite affiché avec une interface graphique.

2.9.5. Propagation des ondes par trajets multiples

Dans une situation opérationnelle, le comportement d'un goniomètre dans un champ d'ondes perturbé par la présence de trajets multiples est d'une importance majeure. En effet, quels que soient leurs principes, les goniomètres classiques utilisent tous l'hypothèse de front d'onde plan, la mesure d'incidence revenant à donner la normale. Or le cas simple d'une onde plane se produit rarement dans la pratique.

Dans un environnement réel, des ondes supplémentaires doivent généralement être prises en compte. Ceux-ci sont générés par d'autres émetteurs dans le même canal de fréquence (interférence incohérente) ou

se présentent sous forme d'ondes secondaires en raison de la réflexion, de la réfraction ou de la diffraction (interférence cohérente dans le canal). En général, un grand nombre d'ondes est présent.

En HF, à la sortie de l'ionosphère, le champ électromagnétique résultant est la somme de trajets ayant des amplitudes, des paramètres angulaires (azimut et site), des polarisations, des phases et des fréquences instantanées différents.

En onde de sol (HF ou VUHF), la présence d'obstacles sur le chemin de propagation en onde de sol génère des situations de trajets multiples plus ou moins corrélés spatialement et temporellement, particulièrement importants en zone urbaine.

La Figure montre, à titre d'exemple, la distribution azimutale des ondes générées par un émetteur mobile dans une zone construite. La composante d'onde directe avec l'amplitude d'arrive à partir d'un angle de 90 ° [10].

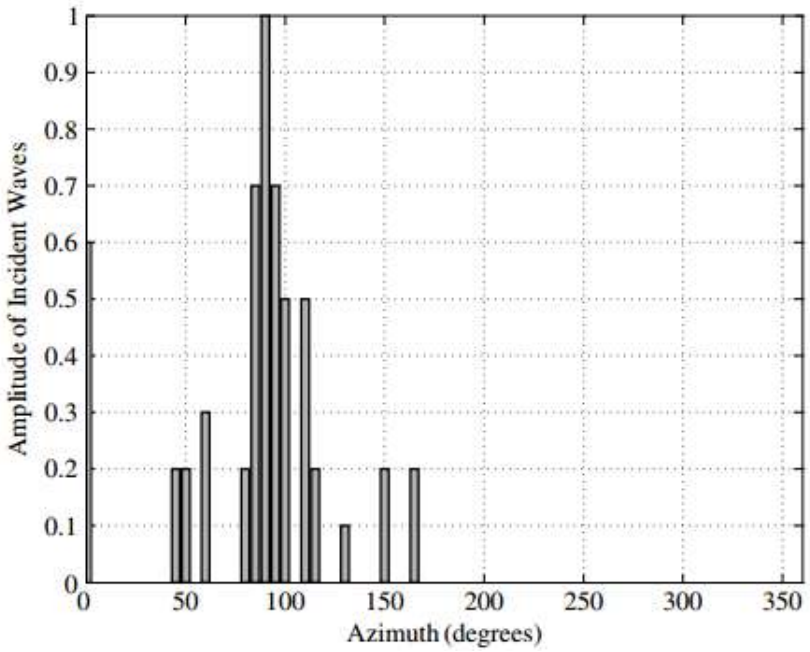


Figure 25: Distribution de l'amplitude des ondes incidentes en fonction des azimuts [10]

2.10.Conclusion

Comme il a été évoqué dans ce chapitre, la goniométrie consiste à estimer les angles d'arrivée des émissions radioélectriques en utilisant des réseaux d'antennes et des processeurs de signaux appropriés.

L'importance de la goniométrie réside dans l'utilité de ses résultats pour la radiolocalisation des émetteurs cibles, aussi bien pour des applications civiles commerciales ou de surveillance, que pour les applications militaires.

Les goniomètres utilisés dans la radio surveillance doivent remplir certains critères de performance face aux signaux radioélectriques à faible probabilité d'interception issus de certaines technologies et standards.

Chapitre 3

Interface radio des différents standards

3.1.Introduction

Les communications sans fil associées à la téléphonie cellulaire sont l'une des grandes réussites d'ingénierie des dernières années, non seulement d'un point de vue scientifique, où les progrès ont été phénoménaux, mais aussi en termes de taille de marché et d'impact sur la société, en changeant la façon dont nous communiquons et travaillons.

L'arrivé de la troisième génération *3G* et l'apparition de la quatrième génération *4G* ont permis des communications de meilleure qualité en terme de capacité et de fiabilité.

Ces réseaux cellulaires utilisent pour la transmission des différents flux de données les ondes radioélectriques se propageant dans l'air.

Des techniques d'accès ont été développées en parallèle avec le développement des réseaux cellulaires pour mieux rentabiliser l'utilisation des ressources spectrales en permettant leur partage entre les opérateurs existants.

Dans ce chapitre on présente les différentes interfaces Radio utilisés dans les des réseaux cellulaires (GSM, UMTS, et LTE) reliant le terminal (MS) avec la station de base, en discutant les principales tâches effectuées sur ces interfaces.

3.2.L'interface Radio de GSM

La transmission radio utilise deux voies :

- ✓ le sens montant pour transporter l'information du terminal vers le relais,
- ✓ le sens descendant pour transporter l'information du relais vers le terminal.

Une communication doit utiliser deux voies pour fonctionner : une dans le sens montant, une dans le sens descendant, c'est ce qu'on appelle un canal duplex.

Il existe deux façons de définir un canal duplex :

3.2.1 Le duplexage FDD et multiplexage FDMA/ TDMA

Duplexage FDD (Frequency **D**ivision **D**uplex) **:** Un procédé de duplexage dont les transmissions des liaisons montantes (Uplink) et descendante (Downlink) utilisent deux bandes de fréquences distinctes (Figure 72), dans chaque liaison, les signaux sont transmis d'une manière continue en parallèle.

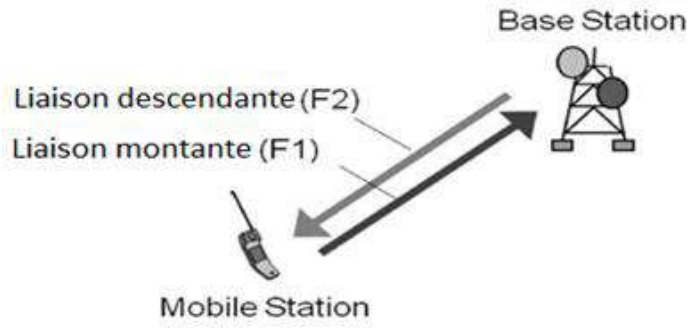


Figure 72: Duplexage FDD

Multiplexage FDMA : Accès multiple par répartition en fréquence (FDMA). C'est une méthode d'accès dont la bande de fréquence est divisée en canaux de largeur de bande égale afin que chaque conversation soit portée sur une fréquence différente, des bandes de garde sont utilisées afin de minimiser les interférences entre les canaux adjacents (Figure 73).

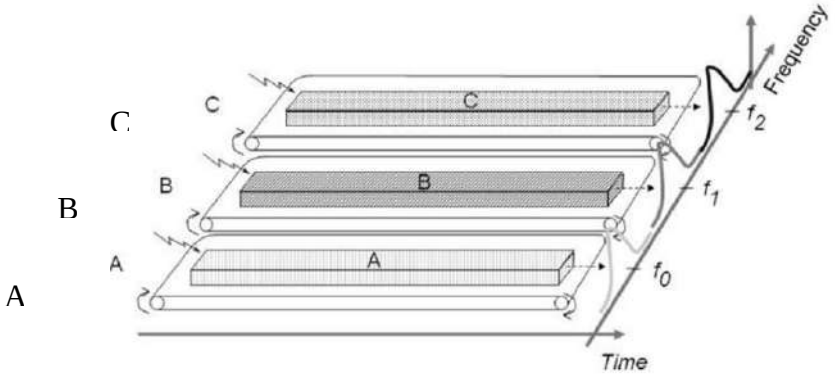


Figure 73: Multiplexage FDMA

Multiplexage TDMA : accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) est une technologie complexe car elle nécessite une synchronisation précise entre l'émetteur et le récepteur. Le TDMA est utilisé dans les systèmes radio mobiles numériques. Les stations mobiles individuelles attribuent cycliquement une fréquence pour l'utilisation exclusive d'un intervalle de temps. Dans la plupart des cas, toute la bande passante du système pour un intervalle de temps n'est pas affectée à une station. Cependant, la fréquence du système est divisée en sous-bandes, et le TDMA est utilisé pour l'accès multiple dans chaque sous-bande. Les sous-bandes sont identifiées par les fréquences porteuses. Les systèmes mobiles utilisant cette technique sont désignés par les systèmes à multi-porteuses.

Dans l'exemple suivant (Figure), la bande de fréquences a été partagée par trois utilisateurs. Chaque utilisateur reçoit des délais déterminés pour envoyer et recevoir des données. Dans cet exemple, l'utilisateur 'B' envoie après l'utilisateur 'A', et l'utilisateur 'C' envoie ensuite.

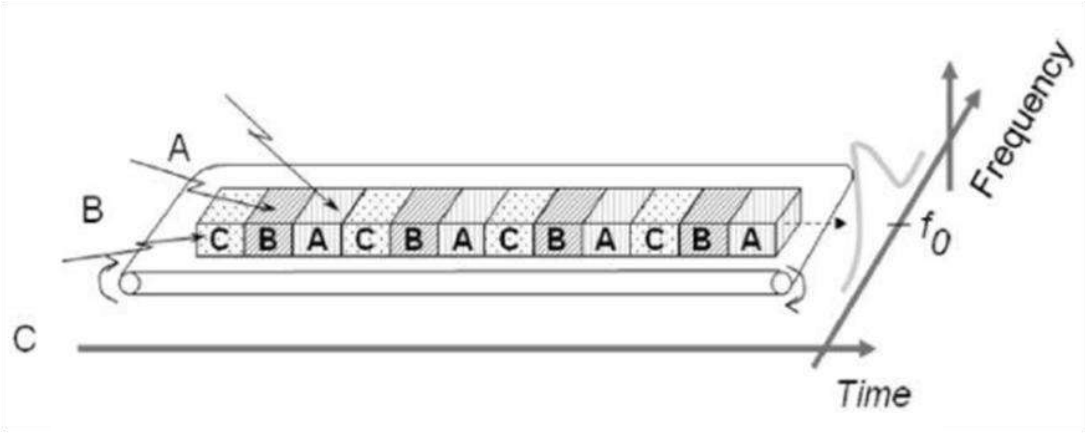


Figure 28: technique d'accès à répartition dans le temps TDMA

3.2.2 Interface radio du standard GSM

Le système GSM réserve deux bandes de fréquences. La bande 890-915 MHz en liaison montante et la bande 935-960MHz en liaison descendante, avec un écart duplex de 45MHZ afin d'éviter tout chevauchement entre les deux bandes. Chacune des bandes est partagée en 124 canaux de largeurs égales de 200KHZ. Tout en utilisant une bande de garde de 100 KHZ aux extrémités de ces bandes (Figure).

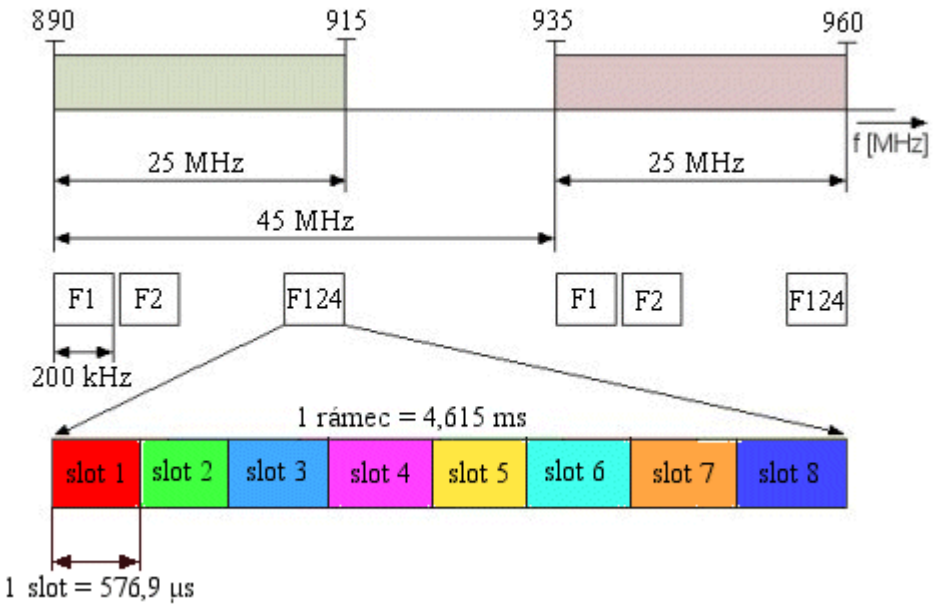


Figure 29: Multiplexage TDMA et duplexage FDD en GSM

Le duplexage TDD (**T**ime **D**ivision **D**uplex) :en GSM est appliqué sur chaque canal de 200khz en le divisant en 8 intervalles de temps appelés time slot (TS). L'ensemble de ces TS constitue une trame, où chaque TS est alloué à un utilisateur, avec une période de 577µs, ce qui correspond à une période de trame de 4.615 ms. le débit de cette trame est environ 270 Kbit/s. [15]

3.2.3 La structure d'un time slot

Le time slot accueille un élément de signal radio appelé « burst » qui a une durée de 0.546 ms, un peu plus petite que la durée de time slot à cause d'un temps de garde qui est introduit pour empêcher les bursts transmis de différents mobiles de se chevaucher, en raison de leurs distances différentes de la station de base. Il existe plusieurs types de bursts dédiés à des fonctions particulières, telles que la synchronisation, l'accès initial, ou la transmission de données.

3.2.4 Hiérarchie de trame

Des informations variées sont transmises en GSM. Pour la mise en œuvre cette variété d'informations, une longue structure temporelle a été définie. On l'appelle 'hyper-trame', qui a une durée de 3 h 28 min 53.760s. Un numéro de trame (FN) est attribué à chaque trame TDMA dans l'hyper-trame de 0 à 2 715 647.Une hyper-trame est subdivisée en 2048 super-trames, qui ont une durée de 6,12 secondes. La super-

trame est subdivisée à son tour en multi-trames. En GSM, il existe deux types de multi-trames définis, contenant 26 ou 51 trames TDMA. (Figure 74)

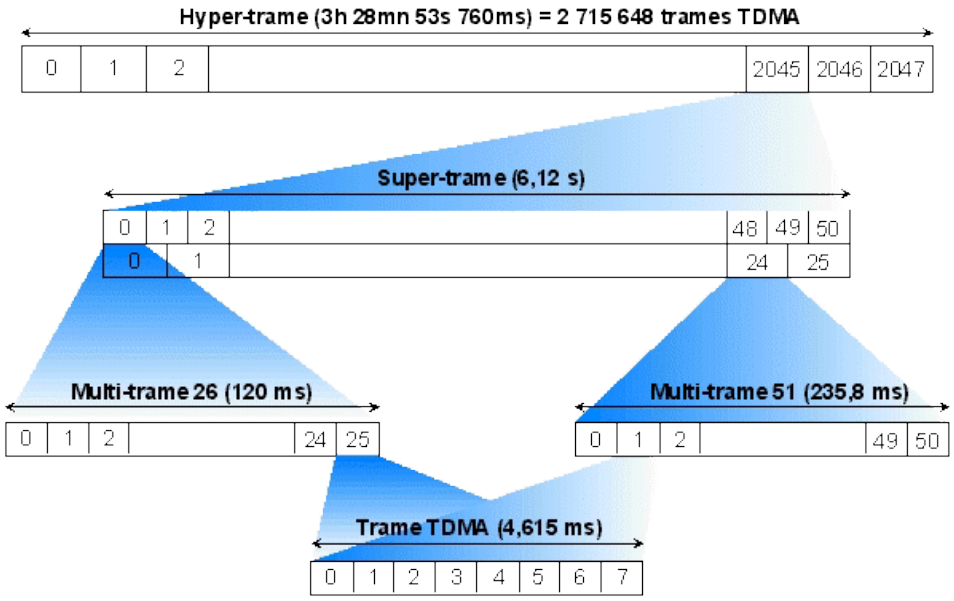


Figure 74: Structure de l'hyper-trame, la super-trame et la multi-trame.

3.2.5 La modulation GMSK

Le type de modulation utilisé dans la technologie GSM est la GMSK, qui est une variante de Minimum Shift Keying (MSK). Le filtre gaussien d'une bande approprié est utilisé avant l'étape de modulation, ce filtre permet d'avoir un spectre étroit. Cette modulation a été choisis en GSM parce qu'elle travaille avec deux fréquences entre lesquelles elle transite facilement. En plus elle permet des transmissions dans la largeur de bande de 200khz[16], qui corresponde à celle de GSM.[15]

3.2.6 Le saut de fréquence

Le saut fréquence lent (SFH), est une technique utilisée dans le standard GSM, dans cette technique différents bursts sont transmis sur différentes fréquences pour un utilisateur. En sautant d'une fréquence à une autre le signal reste pendant une période courte sur une fréquence, par conséquent, l'évanouissement est réduit.

Pour effectuer le saut de fréquence le récepteur doit suivre le modèle de saut utilisé par l'émetteur pour connaitre les fréquences utilisées. La séquence de sauts de fréquence réelle est déterminée par la BS, en sélectionnant une parmi l'ensemble de séquences PN prédéfinies et correspondant cette séquence aux

fréquences disponibles pour la cellule. En outre, elle informe la MS de la séquence de sauts ainsi que de la phase de la séquence lors du démarrage, lors de la configuration de l'appel. [15]

3.3.L'interface Radio de l'UMTS (UTRA/FDD)

3.3.1. Multiplexage WCDMA et Duplexage

L'interface radio de la technologie UMTS est appelée UTRA (*UMTS Terrestrial Radio Access*). Cette interface utilise la technique WCDMA basée sur l'étalement de spectre, ce qui signifie que l'information est envoyée sur une large bande avec une largeur de canal de 5MHz, permettant l'utilisation simultanée d'une même bande de fréquences par plusieurs utilisateurs. Deux modes de duplexages sont implémentés dans l'interface UTRA : le mode FDD et le mode TDD

Le mode FDD est le plus souhaitable dans les zones urbaines où une transmission symétrique est requise pour la voix et la vidéo. Ce mode opère dans les bandes 1920-1980MHz (sens montant) et 2110-2170 MHz (sens descendant). Les deux bandes sont séparées par un écart duplex de 190 MHz. [12]

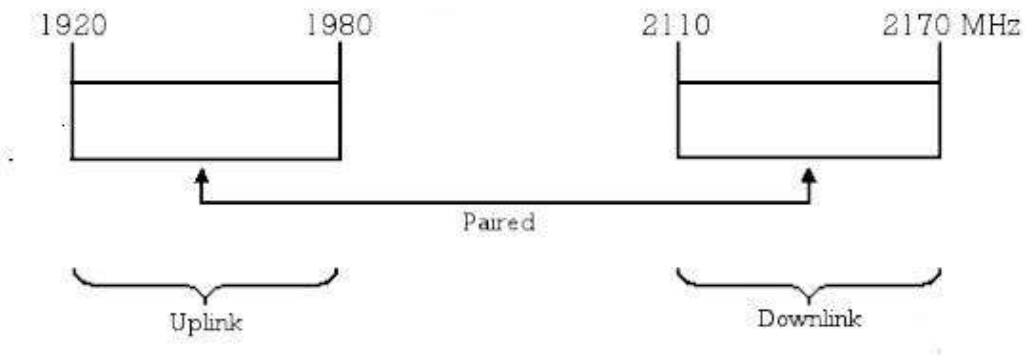


Figure 75: Les bandes de fréquences allouées à UMTS

Multiplexage CDMA : L'accès multiple par division de code est une technique de multiplexage qui permet à différents signaux d'occuper un seul canal de transmission. Il optimise l'utilisation de la bande passante disponible. La technologie CDMA est couramment utilisée dans les systèmes de téléphonie cellulaire travaillant dans la gamme UHF. Dans cette technique, un utilisateur a accès à toute la bande passante pendant toute la durée. Le principe de base est que différents codes CDMA sont utilisés pour distinguer les différents utilisateurs.

CDMA est la plate-forme commune sur laquelle les technologies 3G sont construites, en fournissant une meilleure capacité de communication de voix et de données, permettant à d'autres abonnés de se connecter à tout moment. Les techniques généralement utilisées sont la modulation à étalement de spectre en séquence directe, le saut de fréquence (Frequency Hopping) ou la détection CDMA mixte. Pour ces techniques, un signal s'étendant sur une large bande passante est généré. Un code appelé « code d'étalement » est utilisé pour effectuer cette action. En utilisant un groupe de codes, qui sont orthogonaux les uns aux autres, il est possible de sélectionner un signal avec un code donné en présence de nombreux autres signaux avec différents codes orthogonaux.

3.3.2. L'étalement de spectre

La technique d'étalement de spectre est un phénomène dans lequel un signal est étalé en multipliant chaque bit de ce signal par une séquence de bits appelée « chips », pour le convertir d'un signal à bande étroite en un signal large bande (Figure 76). Le nombre de chips utilisé pour chaque symbole s'appelle le facteur d'étalement SF (Spreading Factor).

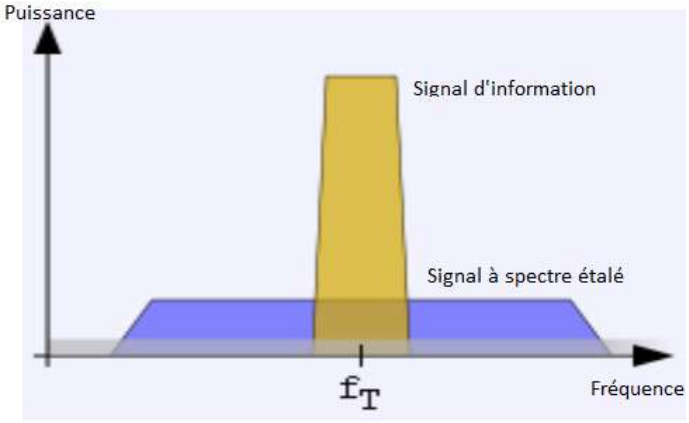


Figure 76: signal étalé

La multiplication avec la séquence de code qui est d'un débit plus élevé entraîne un spectre beaucoup plus large.

La multiplication de la séquence de données avec la séquence d'étalement est la première modulation. Ensuite, le signal est multiplié par la porteuse, ce qui représente la seconde modulation, la porteuse étant analogique, ce processus est illustré dans la Figure

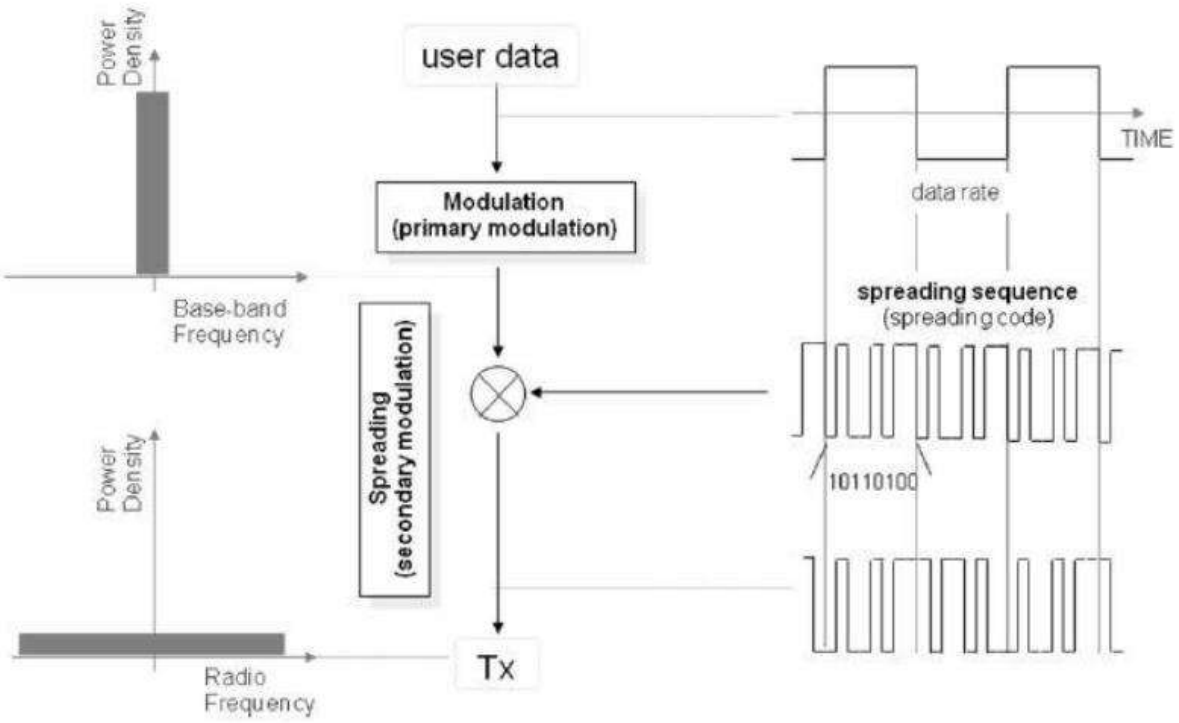


Figure 33: processus d'étalement du spectre [18]

Puisque plusieurs utilisateurs émettent et reçoivent des signaux simultanément, des codes d'étalement ont été définis pour séparer ces signaux. Les codes d'étalement se composent de deux codes : codes de canalisation et codes d'embrouillage [19].

3.3.3. Modulation

La modulation utilisée dans la technologie UMTS est la modulation BPSK (Binary phase shift keying) dans le sens montant, qui permet d'avoir deux états en codant un bit.Et la modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) dans le sens descendant qui permet d'avoir quatre états, et coder deux bits. Cette modulation permet une utilisation efficace mais non linéaire des amplificateurs de puissance (Figure 77).

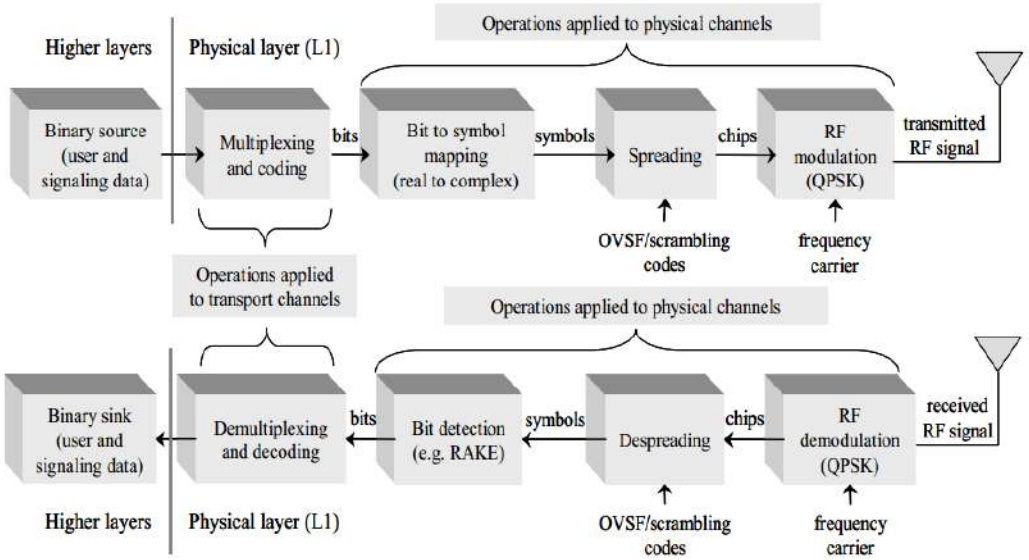


Figure 77: Simplified transmission chain in the UTRA/FDD physical layer [13]

3.4.L'interface Radio de LTE

L'interface radio LTE est basée sur la transmission multiple sur des porteuses orthogonales *OFDM*. Sur la voie montante, il s'agit d'une variante appelée SC-FDMA (Single Carrier– Frequency Division Multiplex Access) .

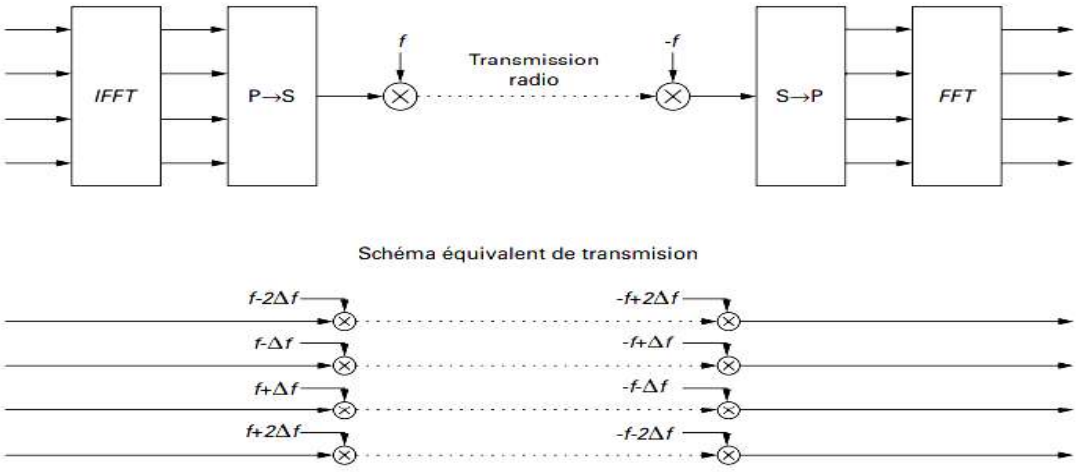


Figure 35: Principe de transmission en OFDM et schéma équivalent

Le principe de l'*OFDM* est de transmettre sur un très grand nombre de sous-porteuses en parallèle. Grâce à une utilisation astucieuse de la transformée de Fourier et à la recopie d'une partie des symboles transmis (principe du préfixe cyclique), il est possible de réaliser simplement un émetteur et un récepteur en utilisant une seule étape de transposition en fréquences. La transmission OFDM peut réellement être considérée comme une transmission sur des canaux parallèles indépendants et n'interférant pas (Figure). Cela est bien sûr seulement vrai dans un système idéal. Il est cependant possible de bien comprendre l'ensemble des mécanismes. [9]

3.4.1. Caractéristiques du signal LTE

Bande de fréquences et duplexage :

Le système LTE peut être déployé sur un grand nombre de bande de fréquences comme on peut le constater sur le tableau 2. Certaines bandes sont dites « appariées », c'est-à-dire qu'elles contiennent deux blocs distants d'au moins quelques MHz (l'écart dépend de la gamme de fréquence et il est en général d'autant plus grand que la fréquence est élevée).Il est possible d'y déployer un système FDD (Frequency Division Duplex). Les bandes ne contenant que des blocs uniques sont réservées pour le TDD (Time Division Duplex). [9]

Tableau 2: Principaux paramètres OFDM pour LTE [9]

Bande spectrale occupée.....(en MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Largeur d'une sous-porteuse (Δf) (en kHz)	15					
Nombre de sous-porteuses utilisées (*en* N_c)	72 + 1	180 + 1	300 + 1	600 + 1	900 + 1	1 200 + 1
Nombre de blocs de ressources	6	15	25	50	100	200
Taille de la FFT (*en N*)	128	256	512	1 024	1 536	2 048
Fréquence d'échantillonnage (*Nf*) .....(en MHz)	3,84/2	3,84	2 × 3,84	4 × 3,84	6 × 3,84	8 × 3,84
Taille d'un symbole sans préfixe cyclique ($T_u = 1/f$) .....(en µs)	66,67					
Préfixe cyclique, cas normal	5,21 µs pour le premier symbole et 4,67 µs ensuite					
Préfixe cyclique étendu.....(en µs)	16,67					

Paramétrage OFDM : Sur la voie descendante, la transmission LTE se fait en OFDM. Le nombre de sous-porteuses dépend de la largeur de bande dont dispose l'opérateur. En revanche, quelle que soit la configuration, chaque sous-porteuse occupe 15 kHz de bande. Le nombre dessous-porteuses utiles peut varier de 72 (avec une sous-porteuse centrale nulle supplémentaire sur la voie descendante) à 1 200suivant

la bande spectrale disponible (de 1,4 à 20 MHz).L'ensemble des configurations est représenté dans le **Tableau** . [9]

La transmission OFDM nécessite l'insertion d'un préfixe cyclique à chaque symbole OFDM. Le principe est de recopier la fin du symbole en début de transmission. La durée du préfixe cyclique doit être supérieure à l'étalement (dans le temps) maximal des retards. Dans les milieux les plus courants (urbains, semi-urbains), les retards sont de quelques microsecondes. En revanche, dans des milieux montagneux, on peut constater des retards supérieurs à 5 µs. Les recommandations ont donc prévu deux configurations :

Le préfixe cyclique normal qui dure 5,21 µs pour le premier symbole d'un slot et 4,69 µs pour les symboles suivants.

Le préfixe étendu qui dure 16,67 µs pour chaque symbole (**Figure 78**).Le préfixe du premier symbole est légèrement plus long, car il permet d'absorber de légers décalages de synchronisation sur la voie montante non compensés par le mécanisme d'avance en temps. [9]

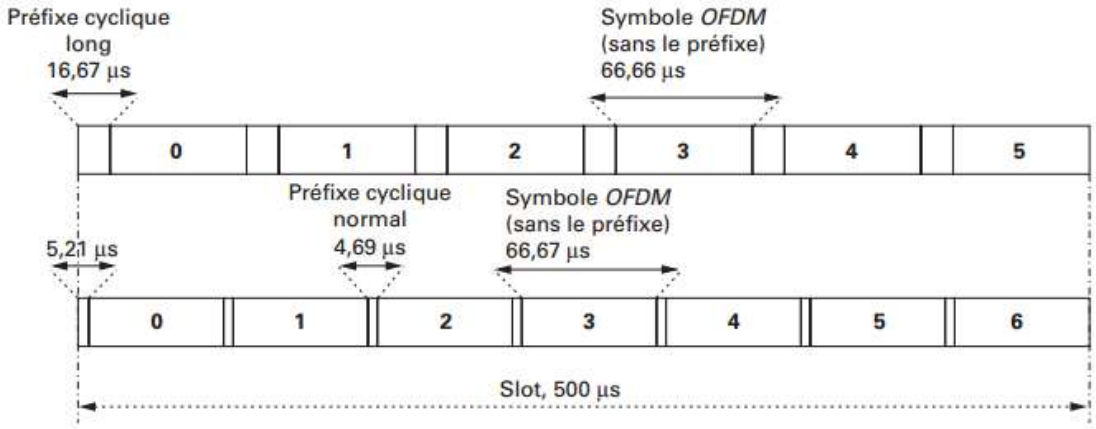


Figure 78: Préfixe cyclique normal et préfixe cyclique long en LTE [9]

3.4.2. Modulations

La modulation de base est la modulation de phase à 4 états (QPSK, Quaternary Phase Shift Keying) qui permet de transmettre 2 bits en un symbole. Si le rapport signal sur bruit au récepteur est suffisant, l'émetteur peut utiliser une modulation avec une constellation comportant plus de points : la 16-QAM (Quaternary Amplitude Modulation) qui permet de transmettre $\log_2(16) = 4$ bits en un symbole ou même de la 64-QAM dont un symbole contient $\log_2(64) = 6$ bits (Figure 79). Un élément de ressource (**Erreur !**

Source du renvoi introuvable.) peut contenir donc de 2à 6 bits (après application du codage correcteur d'erreur). [9]

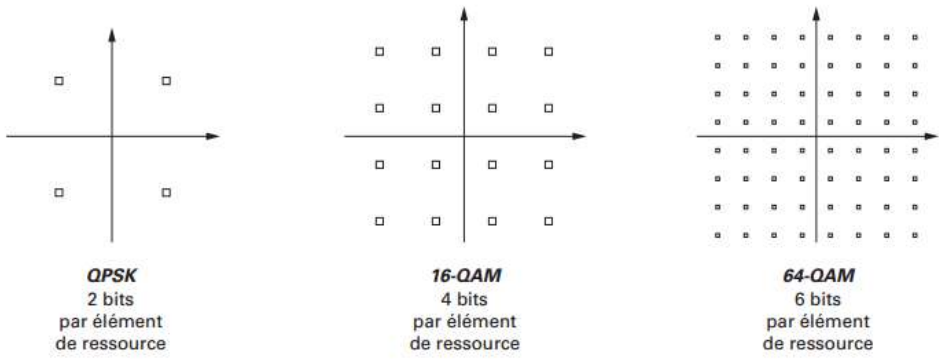


Figure 79: Modulations utilisées dans LTE

L'utilisation d'une modulation contenant de nombreux bits par symbole exige un rapport signal sur bruit important au récepteur. L'utilisation de la 16-QAM et de la 64-QAM est plutôt réservée à la transmission des données utilisateurs lorsque le terminal dispose d'un bon canal de transmission (c'est-à-dire, proche de la station de base). Pour la transmission du contrôle et de la signalisation, la modulation QPSK, plus robuste, est préférée. [9]

3.4.3. Systèmes à antennes multiples

Suivant le nombre d'antennes en entrée et en sortie du canal de transmission, on obtient plusieurs configurations possibles :

Tableau 3: – Différentes configurations pour les systèmes d'antennes à la station de base [9]

Configuration	Technique Nom usuel	Nombre de blocs de transports	Nombre de couches	Nombre d'antennes
Diversité de transmission	*Space Frequency Block Coding*	1	2 4	2 4
Formation de faisceaux	*Codebook-based precoding*	1	1	2 4
Multiplexage spatial	*SU-MIMO precoding*	2	2 2,3 ou 4	2 4

- Transmission SISO : La plus simple est la transmission SISO (Single Input Single Output) composée d'une antenne à l'émission et une à la réception.

- Transmission MIMO : La plus complexe est la transmission MIMO (Multiple Input Multiple Output), les configurations intermédiaires (MISO, SIMO) étant possibles et intéressantes
- Configurations SIMO et MISO : La configuration SIMO est utilisée depuis de nombreuses années car elle correspond à un système à diversité de réception.
- La configuration MISO : Peut correspondre, soit à une formation de faisceau (beam-forming), représenté dans la soit à de la diversité de transmission. Dans chacun des deux cas précédents, les mêmes données sont transmises sur les différentes antennes, mais le signal HF produit est spécifique à chaque antenne (par exemple, un déphasage du signal judicieux pour la formation de faisceau) [9]

La technique MIMO peut être utilisée :

- Pour de la diversité.
- Pour transmettre simultanément plusieurs données vers un même utilisateur
- Pour transmettre simultanément des données vers différents utilisateurs.

Signaux de référence :

Les techniques MIMO requièrent que le récepteur soit capable d'estimer le comportement du canal (principalement déterminer sur une sous-porteuse le déphasage et l'affaiblissement qu'apporte le canal de transmission).Cette estimation ne peut se faire que par l'émission de séquences connues par la station de base, appelées « signaux de référence » (RS, Reference Signals). [9]

3.4.4. Chaîne de transmission

Un bloc de données à l'entrée est appelé bloc de transport. On lui applique un code détecteur d'erreur, un code correcteur de type turbo et on décide d'une modulation particulière (Figure 80) [9].

Canaux de transport : En fonction de la qualité de la liaison radio, la station de base décide d'un format de transport, c'est-à-dire du type de modulation (QPSK, 16-QAM ou 64-QAM) et du taux de codage. Le processus de contrôle de la ressource radio décide du nombre de RB à allouer pour le flux considéré en fonction, non seulement des données de ce flux à transmettre, mais également de l'ensemble

des demandes de la cellule, voire des cellules voisines. Le traitement lié à l'ensemble de la chaîne de transmission est intégré dans la couche physique [9].

Code correcteur et code détecteur : À tout bloc de données, on rajoute un CRC (Cyclic Redundancy Check) de 24 bits (Figure 80). Ce dernier est une redondance qui permet de détecter les blocs qui contiennent encore des erreurs après application des algorithmes de correction d'erreur. La probabilité de non détection, c'est-à-dire la probabilité qu'un bloc soit considéré comme correct alors qu'il contient une erreur, vaut en première approximation où est la longueur du code détecteur. Comme, on constate que cette probabilité est très faible [9].

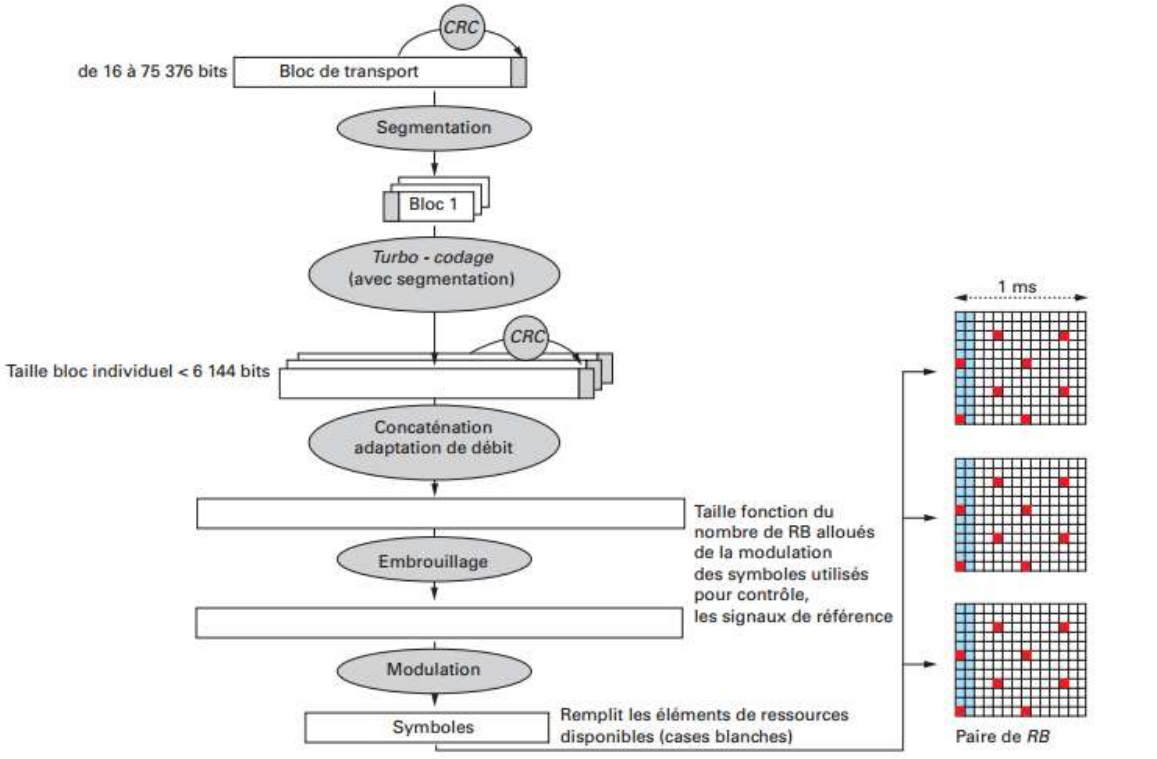


Figure 80: Chaîne de transmission LTE [9]

3.5.Conclusion

Dans ce chapitre on a vu une description globale des interfaces Radio des réseaux cellulaires les plus courants GSM, UMTS et LTE. On constatait dans les trois interfaces que la couche physique assure les fonctions de modulation, codage, multiplexage, synchronisation, qui sont primordiaux dans l'établissement d'une communication. Ainsi chacune des interfaces étudiées à ses propres caractéristiques.

Chapitre 4

Simulation de l’algorithme aveugle pour la goniométrie

4.1.Introduction

Les systèmes classiques de contrôle du spectre radioélectrique font recours à la sélection des différents canaux de fréquences par l’utilisateur d’une manière manuelle afin d’obtenir les relèvements en azimuts sur les émissions cibles.

Un tel choix présente un inconvénient majeur lorsqu’ on a présence d’un grand nombre d’émetteurs à surveiller et lorsqu’on a présence d’émissions illicites sur des canaux non utilisés ou non précisés par l’utilisateur. Ainsi les signaux pour de tels choix deviennent difficiles à distinguer par rapport aux bruits de propagation et aux intermodulations et bruits introduits par les équipements. En outre, ces systèmes classiques ont présentent une limitation par rapport aux signaux à évasion de fréquence.

Pour pallier ces inconvénients nous allons proposer dans ce chapitre d’automatiser le traitement d’une manière à obtenir les angles d’arrivées de toutes les émissions présentes dans la bande à surveiller en la découpant en sous-bandes à faibles bandes passantes, chose qui augmentera la probabilité d’interception pour les signaux à saut de fréquence et permettra d’avoir un contrôle beaucoup plus efficace du spectre radioélectrique.

Nous allons aussi implémenter une méthode automatisée permettant de détecter les signaux intrus dans une gamme de fréquences, et donner ses paramètres, y compris son angle d’arrivée.

4.2.Algorithme aveugle pour la goniométrie

Cet algorithme est basé sur l'estimation du vecteur propre dominant de la matrice de corrélation spatiale des signaux reçus. L'expression "aveugle" est utilisée pour désigner le fait que la nature spécifique du signal n'est pas connue a priori.

4.2.1. Traitement proposé

La simulation proposée va permettre la détection, et la goniométrie des signaux présents dans une bande de fréquence de ***25.6MHz***, Pour ce faire, cette dernière va être découpée en sous bandes de ***25 KHz*** par un banc de filtres, ces sous-bandes vont ensuite être traitées par l'algorithme aveugle (Figure 81).

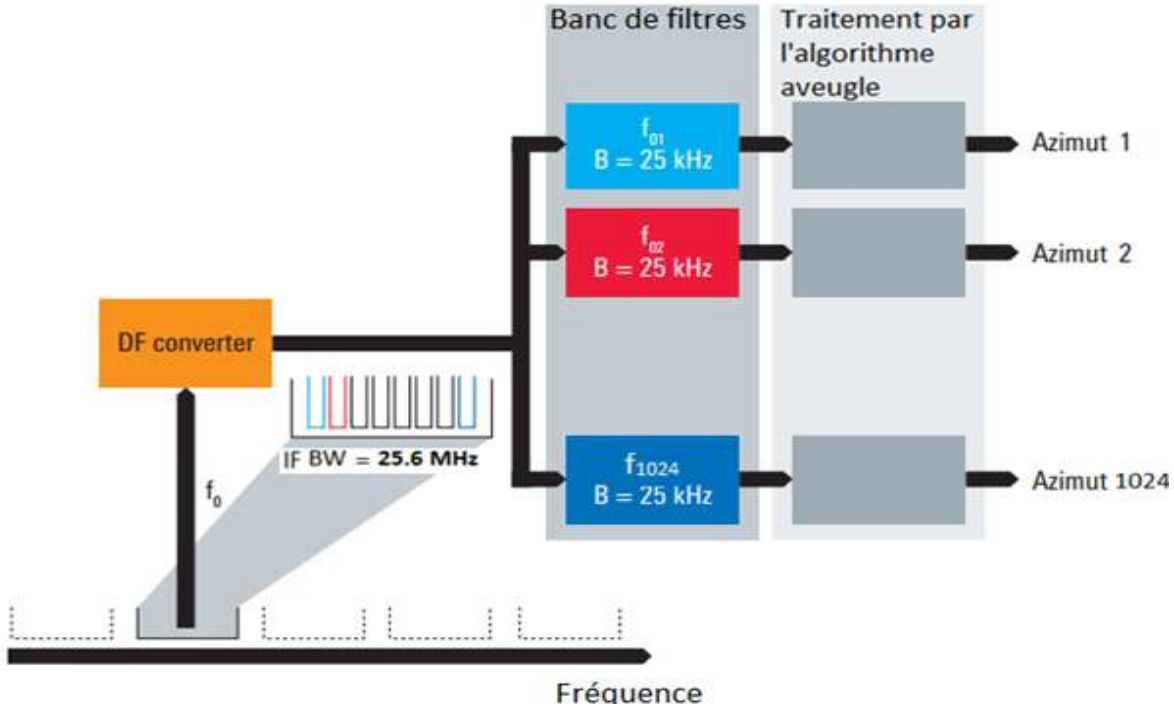


Figure 81: traitement des sous bandes et relèvements en azimut

Les relèvements en azimut vont être utilisés pour tracer le spectre angulaire sur toute la bande utile (*Figure*).

Pour que l'algorithme proposé permette d'obtenir des relèvements en azimut pour les signaux de nature impulsive et à saut de fréquence. Un traitement dans domaine temporel et un traitement dans le domaine fréquentiel sont envisagés.

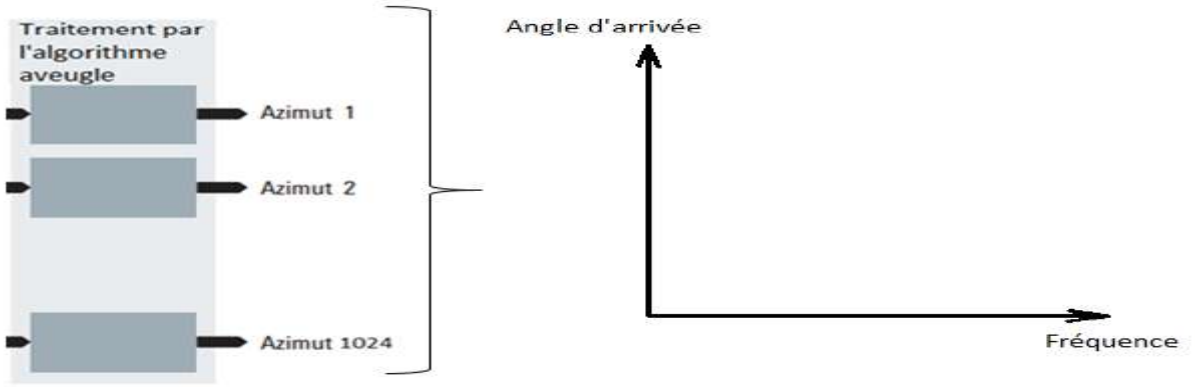


Figure 40: Spectre angulaire formé à partir des AOA

4.2.2. Processus d'obtention du spectre angulaire

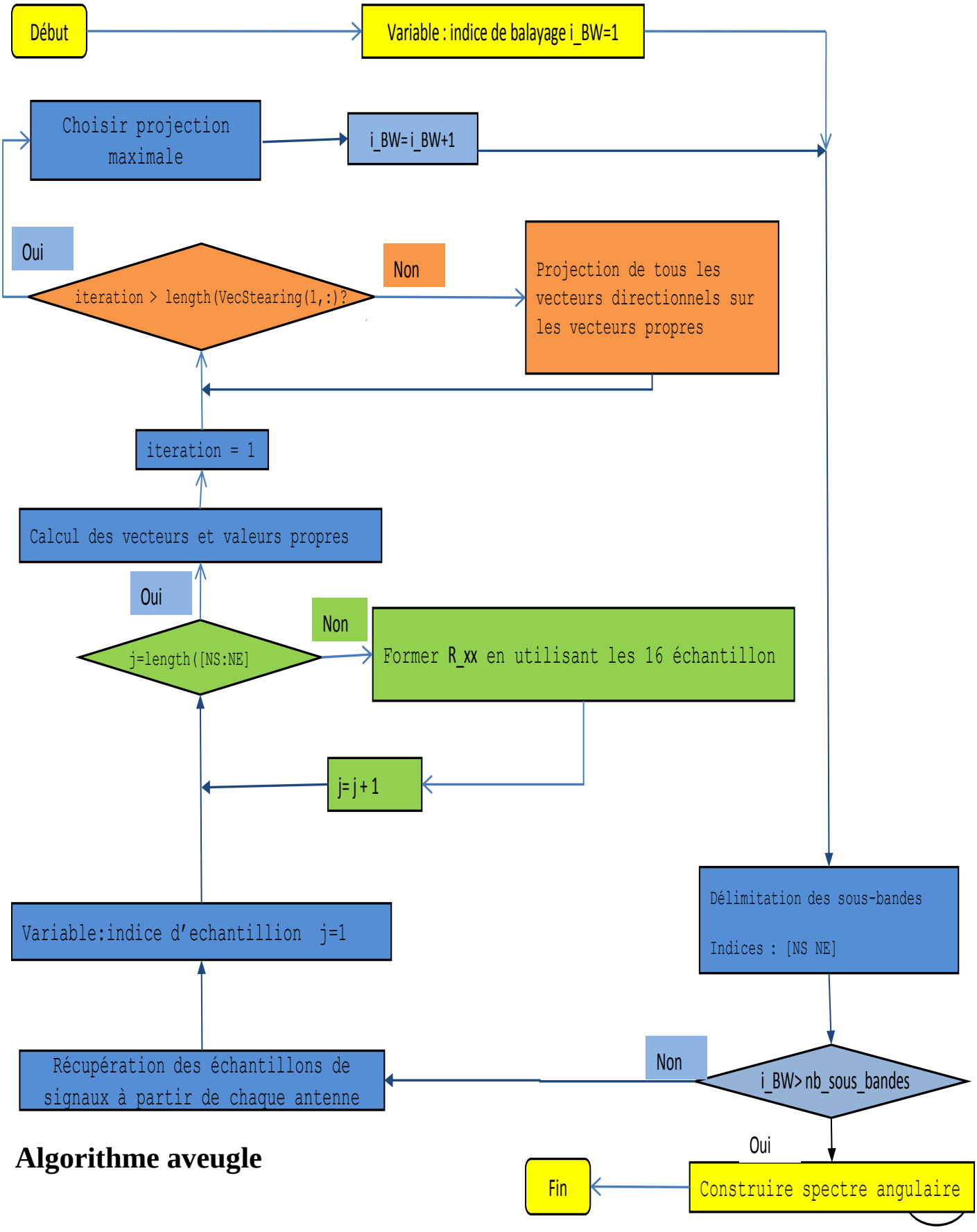
Calcul du spectre du signal à partir de l'antenne de référence : Le spectre des signaux captés par l'antenne de référence est calculé et tracé avec l'outil *Spectrum analyser* de *Matlab* sur un intervalle de fréquences $\left[F_c - \frac{F_s}{2}, F_c + \frac{F_s}{2}\right]$. Pour le cas étudié, on a pris à titre d'exemple $Fc = 500$ MHz

Balayage des sous bandes de 25 KHz : Les 1024 sous bandes sont parcourues selon les étapes suivantes pour obtenir le spectre angulaire :

Calcul de l'AOA pour chaque sous-bande de 25 KHz en utilisant une boucle « for » :

- Initialisation de l'indice de balayage (i_BW) à 1.
- Pour chaque itération on récupère les échantillons du signal contenu dans la sous- bande
- Formation du vecteur d'observation pour l'instant « k »
- Calcul de la matrice de covariance R_{xx}^{ON}
- Calcul des vecteurs et valeurs propres
- Sélection du vecteur propre avec valeur propre maximale
- Calcul de toutes les projections $V_{max}^{H} S(\varphi)$ avec $\varphi \in [0, 359]$

Construction du spectre angulaire : L'organigramme suivant fournit une illustration détaillée du processus qu'on vient d'expliquer.



Algorithme aveugle

4.2.3. Test et résultats

Les valeurs du SNR et de l'azimut représentent les entrées du programme, données par l'utilisateur, pour être récupérées et utilisées pour les traitements successifs.

Le spectre angulaire représente la sortie du programme, il est calculé par le processus proposé et affiché sous forme graphique.

Pour tester l'algorithme, on a généré quatre signaux (Figure) de types différents ayant les paramètres suivants, la fréquence centrale (F_c) est prise à 500MHz :

1er signal : Modulation QPSK $F_c(\text{QPSK}) = 10\text{MHZ},\ \text{BW}(\text{QPSK}) = 234\text{KHz}$

2eme signal: Modulation BPSK $F_c(\text{BPSK}) = 5\text{MHZ}, \text{BW}(\text{BPSK}) = 144\ \text{KHz}$

3eme signal: Modulation CDMA $F_c(\text{CDMA}) = 0\ \text{MHz}, \text{BW}(\text{CDMA}) = 3.2\ \text{MHz}$

4eme signal: FHSS $F_c(FHSS) = 8\ MHz, BW(FHSS) = 8.25\ MHz$

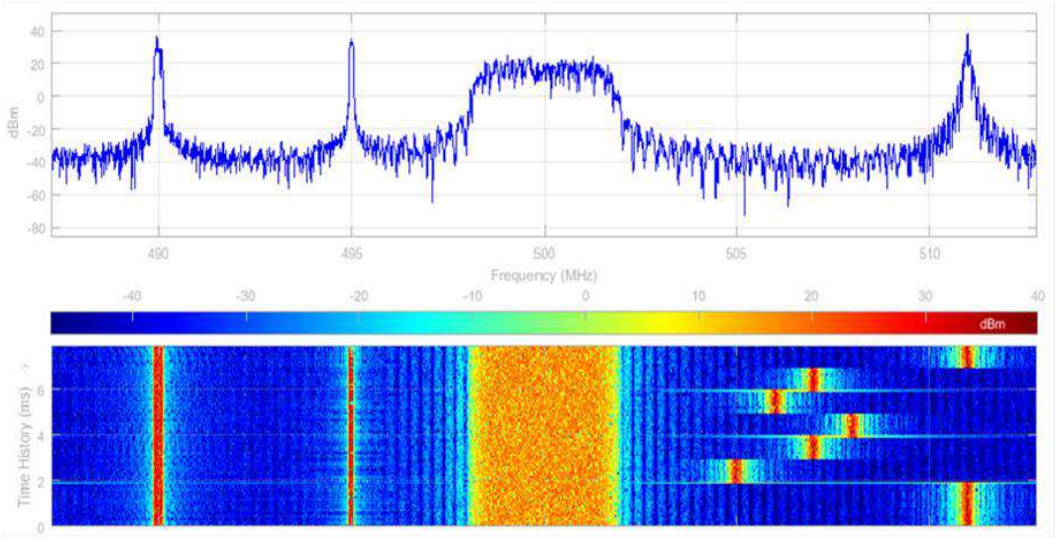


Figure 41: différents signaux générés

Pour les quatre signaux pris à titre d'exemple, Captés ensemble par le réseau d'antenne, on a obtenu le spectre angulaire bruité représenté sur la **Figure 82**.

Pour remédier aux bruits on a effectué un seuillage approprié pour obtenir des résultats plus clairs permettant de distinguer facilement les signaux par leurs angles d'arrivées (Figure 83).

Les valeurs des SNR1, SNR2, SNR3et SNR4 sont prises égales à **10** (à titre d'exemple)

Les résultats obtenus pour cet exemple sont représentés sur les figures qui suivent :

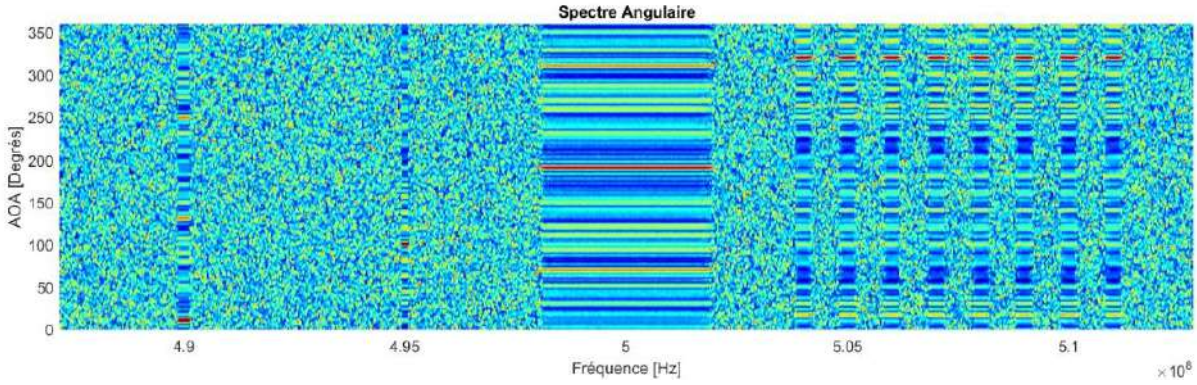


Figure 82: Spectre angulaire avec bruit

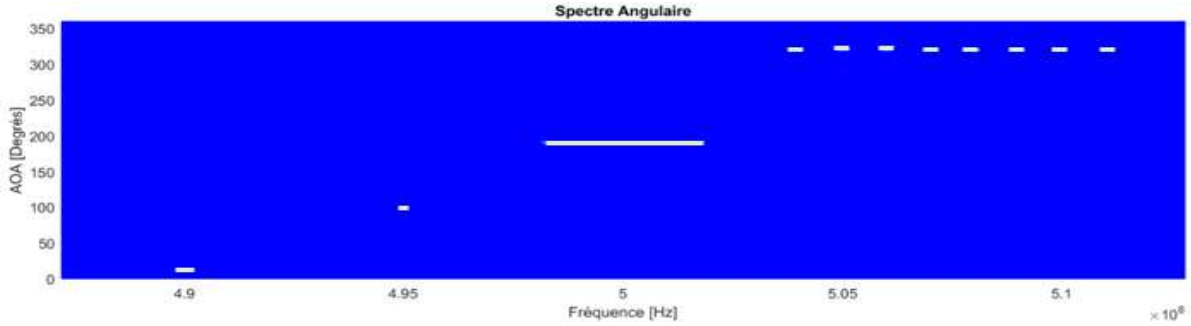


Figure 83: Spectre angulaire sans bruit

4.3. 2eme simulation : Automatic Violation Detection (AVD)

Lors de cette partie, nous allons implémenter une méthode automatisée permettant d'identifier les émetteurs autorisés fonctionnant avec des paramètres incorrects, ainsi que l'identification des émissions intruses.

Pour ce faire, nous allons traiter un cas où l'on va enregistrer les paramètres des émetteurs autorisés dans une base de données, on va utiliser les signaux de la première simulation dans un scénario ou l'on va mesurer leurs paramètres et comparer les mesures obtenues avec les paramètres contenus dans la base de donné , le scénario traité est illustré dans les figures **Figure 84** ,**Figure 85** et **Figure 85**. Si un signal ayant des paramètres différents de ceux enregistrés dans la base de donné, une alarme est déclenchée et un rapport est obtenu (Figure 88).

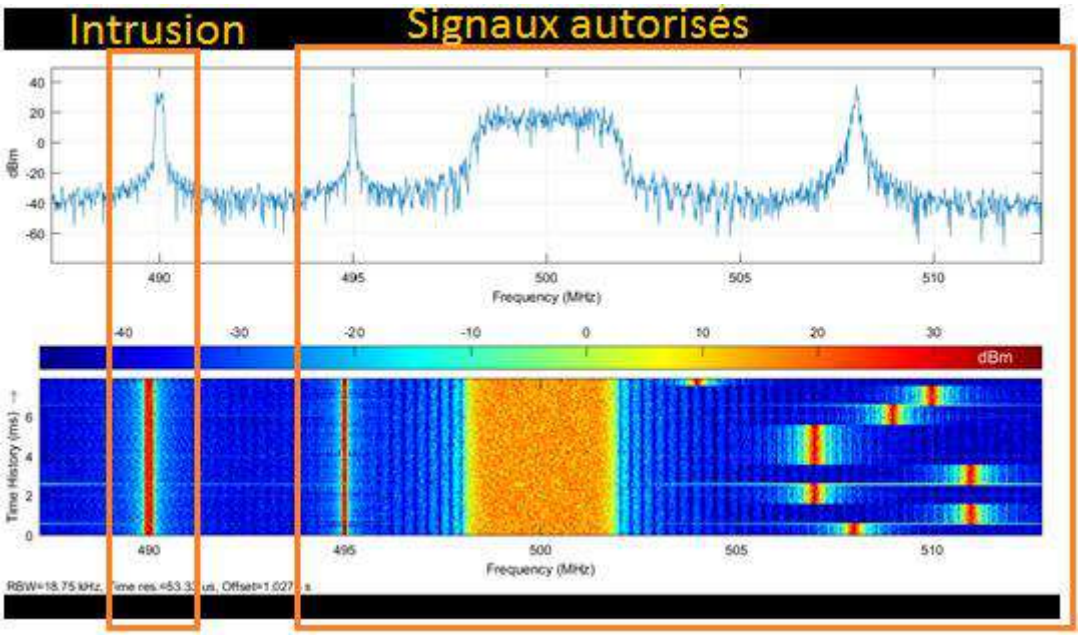


Figure 84: scénario étudié

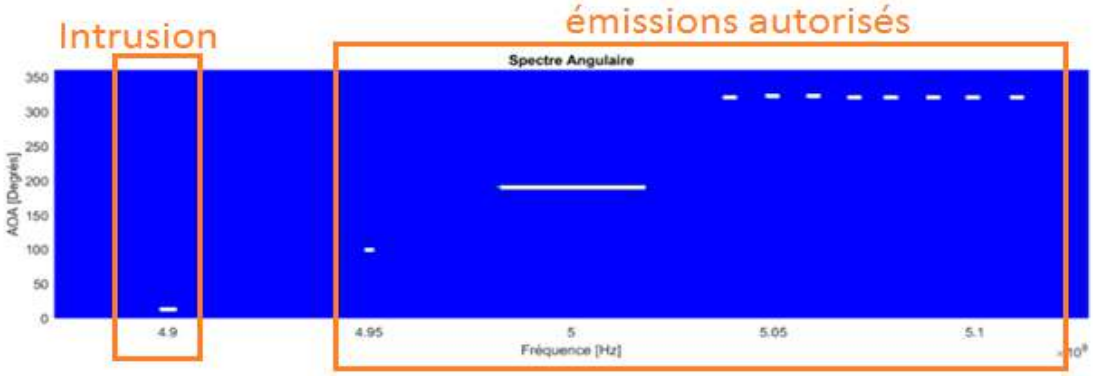


Figure 85: scénario étudié AOA

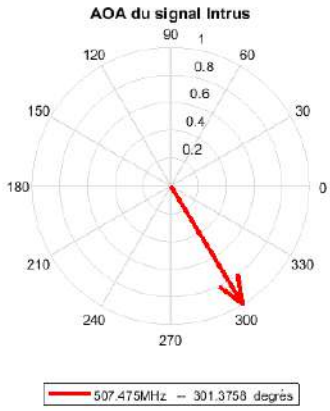


Figure 87.a: signal intrus

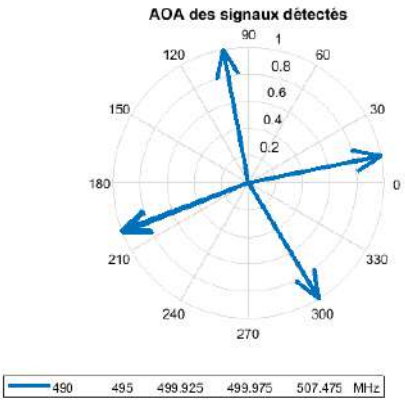


Figure 86.b: signaux détectés

```
Emetteurs_autorises =

  struct with fields:

    Fc: [495000000 500000000 508000000]
    BW: [144000 3460000 8000000]

Intrusion détectée !

Intrusion =

  struct with fields:

     Fc: 490000000
     BW: 225000
    AOA: 11.4592


Rapport =

  struct with fields:

           AOA: [11.4592 100.8406 191.3679 320.8564]
    Nb_Signaux: 4
            BW: [225000 125000 3650000 7225000]
            Fc: [490000000 495000000 500000000 507500000]
```

Figure 88: rapport intrusion détectée

4.4.Conclusion

Après avoir assimilé les concepts théoriques nécessaires sur la goniométrie , l'implémentation de l'algorithme aveugle d'une manière automatisée dans le logiciel Matlab et son expérimentation sur des signaux générés nous ont permis de mettre en évidence l'importance de l'automatisation des opérations de la goniométrie dans le contrôle du spectre radioélectrique.

Le découpage de la bande à surveiller en sous-bandes à faibles largeurs de bandes nous a permis d'automatiser le traitement, d'une manière à libérer les opérateurs des taches fastidieuses, chose qui rend le contrôle du spectre plus efficace.

L'opération de seuillage est importante pour éliminer les bruits qui apparaissent dans le spectre angulaire. La détection automatique des signaux intrus représente un procédé important vis-à-vis de l'efficacité du contrôle du spectre radioélectrique.

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur l'automatisation des opérations de contrôle du spectre radioélectrique, les différents concepts qui y sont associés, voir le processus d'estimation aveugle des angles d'arrivée des signaux présents dans une bande de fréquence. Des méthodes automatisées ayant permis de résoudre le problème d'automatisation de la goniométrie, de contrôle de la bande passante et de la fréquence centrale ont été mises en place pour améliorer l'efficacité de ce processus vis-à-vis des signaux de différentes natures, y compris ceux à faible probabilité d'interception issus de certains standards utilisés dans les technologies cellulaires.

À l'égard de la complexité des opérations de contrôle par les organismes appropriés, les mesures d'automatisation ayant été proposées permettront de libérer le personnel des taches fastidieuses utilisées actuellement.

Pour améliorer la détection des signaux, on a réalisé un seuillage, après une normalisation pour garder un seuil de détection fixe. Cependant, des meilleures perspectives pourront toujours être envisagées dans le futur: on prévoit une autre variante pour la détection de ces pics, en utilisant la technique *CFAR*, chose qui permettra de réduire l'effet des bruits et améliorer la probabilité de détection et de réduire la probabilité de fausses alarmes.

Bibliographie

Livres :

[1]: ‘’Manuel Contrôle du Spectre‘’ Union internationale des télécommunications, Edition 2011- Bureau des radiocommunications.

[2]: F.Delaveau, *Y.Livran* ‘’Techniques De l’Ingénieur l’expertise technique et scientifique de référence‘’ :

te6891, ‘’Radiosurveillance du spectre -Interception, réception et détection‘’,2012.

te6892, Radiosurveillance du spectre –Goniométrie et localisation-2012.

[3]: *A.Rembovsky, A. Ashikhmin, V. Kozmin, S. Smolskiy* ‘’ Radio Monitoring: Problems, Methods, and Equipment‘’ Edition Springer-2009.

[4]: *Rohde & Schwarz* ‘’ Direction Finders Introduction into Theory of Direction Finding Radiomonitoring & Radiolocation ‘’ Catalog 2012.

[5]: Agilent Techniques and Trends in Signal Monitoring, Frequency Management and Geolocation of Wireless Emitters- 2009-5990-3861EN.

[6]: *C.Zhizhang, G.Gopal; Y.Yiqiang* ‘’Introduction to Direction-of-Arrival Estimation ‘’2010 ARTCH House.

[7]: *A. Constantine, Balanis, I. Ioannides* ‘’Introduction to Smart Antennas‘’ 2007.

[8]: *I.Panayiotis, A.Constantine, Balanis* ‘’Uniform Circular Arrays for Smart Antennas‘’ 2005

[9]: *L. Xavier,* ‘’Principes de fonctionnement de l'interface radio LTE. Techniques de l’ingénieur l’expertise technique et scientifique de référence’’ Éditions T.I. te7374 -2013.

[10]: *T.Engin, F.Benjamin* ‘’Classical and Modern Direction Of Arrival Estimation‘’ Edition Elsevier Inc 2009.

[11]: *Rohde & Schwarz* ‘’Radiomonitoring & Radiolocation‘’ Catalog 2011/2012.

[12]: *P. Lescuyer* ‘’ UMTS: Origins, Architecture and the Standard‘’, Springer Science & Business Media, 2012.

[13]: *S.Javier, T. Mamadou* ‘’UMTS Copyright ‘’ 2007, ISTE Ltd.

[14]: *M. Rahnema* ‘’UMTS Network Planning, Optimization, and Inter-Operation with GSM‘’, John Wiley & Sons, 2008

[15]: *A. F. Molisch* ‘’Wireless Communications‘’, John Wiley & Sons, 2012.

[16]: *Narang* ‘’2G Mobile Networks‘’, Tata McGraw-Hill Education, 2006.

Webographie: (consultés le mois de juin 2017)

[17]: http://www.ahsystems.com/catalog/antenna-kits.php

[18]: https://www.tutorialspoint.com/cdma/multiple_access_methods.htm

[19]: https://www.complextoreal.com

Annexe 1

Démonstration de l'équation (2.2)

En se référant à la **Figure 63**, supposons qu'un réseau circulaire uniforme avec un rayon a et constitué de N antennes élémentaires distribuées uniformément, supposées être identiques et omnidirectionnelles, est situé sur le plan x-y. Un système de coordonnées sphérique est utilisé pour représenter les directions d'arrivée à partir des ondes planes incidentes. L'origine du système de coordonnées est située au centre du réseau. Les angles d'élévation $\theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$, sont mesurés à partir de l'axe zz', et les angles azimutaux $\phi \in [0,2\pi]$, sont mesurés dans le sens antihoraire à partir de l'axe xx' dans le plan xoy. La position angulaire du n^{ième} élément du réseau est donnée par la relation : (2.21)

$$\phi_n = 2\pi\left(\frac{n}{N}\right), \quad n = 1,2,\dots,N. \qquad (2.22)$$

L'onde plane à bande étroite de longueur d'onde λ et de nombre d'onde correspondant (k = 2π / λ) arrive à l'antenne avec un angle d'élévation θ et un angle azimutal ϕ. Le vecteur unitaire $\hat{a}_r$ est représenté en coordonnées cartésiennes par :

$$\hat{a}_r = \hat{a}_x \sin\theta\cos\phi + \hat{a}_y \sin\theta\sin\phi + \hat{a}_z \cos\theta \qquad (2.23)$$

Le vecteur unitaire $\hat{a}_{pn}$ de l'origine au n^{ième} élément est écrit comme suit :

$$\hat{a}_{pn} = \hat{a}_x \cos\phi_n + \hat{a}_y \sin\phi_n, \qquad n = 1,2,\dots,N. \qquad (2.24)$$

Le vecteur Δ_{rn} représente la distance différentielle, par laquelle le front d'onde planaire atteint le nième élément du réseau par rapport à l'origine, il est donnée par :

$$\Delta_{rn} = \hat{a}_r a \cos\Psi_n \qquad (2.25)$$

Étant donné que le front d'onde est entrant et non rayonnant vers l'extérieur, Ψ_n peut être exprimé comme suit :

$$\cos\Psi_n = \hat{a}_r \bullet \hat{a}_{pn}$$

$$= (\hat{a}_x \sin\theta\cos\phi + \hat{a}_y \sin\theta\sin\phi + \hat{a}_z \cos\theta)$$

$$\begin{aligned} &\bullet(\hat{a}_x \cos\phi_n + \hat{a}_y \sin\phi_n) \\ &= (\sin\theta\cos\phi\cos\phi_n + \sin\theta\sin\phi\sin\phi_n) \\ &= \sin\theta\,(\cos\phi\cos\phi_n + \sin\phi\sin\phi_n) \\ &= \sin\theta\cos(\phi - \phi_n), \quad n = 1,2,\dots,N. \end{aligned} \tag{2.26}$$

Et par conséquent, l'équation (2.5) devient :

$$\Delta_{rn} = \hat{a}_r a \sin\theta\cos(\phi - \phi_n), \quad n = 1,2,\dots,N. \tag{2.27}$$

Par ailleurs, en supposant que le front d'onde passe par l'origine à l'instant t = 0, il arrive au nième élément du réseau au temps relatif :

$$\tau_n = -\frac{a}{c}\sin\theta\cos(\phi - \phi_n), \quad n = 1,2,\dots,N, \tag{2.28}$$

Où c, est la vitesse de la lumière dans l'espace libre.

Les valeurs positives de τ_n indiquent que le front d'onde arrive au n^{ième} élément du réseau après passage par l'origine et les valeurs négatives indiquent le contraire.