

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° ordre :
N° série :

Faculté des Sciences et Technologies

Département d'automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme de

MASTER

Spécialité : Automatique

Par : - Habott Abdoullah

- Yahgouba Hadou

Thème

Les Antennes Intelligentes

Soutenu publiquement le 08/10/2020

| | | | |
|-------------------|-----|---------------|-----------|
| ZEITANI Ibrahim | MAA | Univ.Ghardaïa | Président |
| ARIF Mohamed | MAA | Univ.Ghardaïa | Examineur |
| LAAJAL Boumediene | MAA | Univ.Ghardaïa | Examineur |
| KADA Biteur | MAA | Univ.Ghardaïa | Encadreur |

Année universitaire 2019/2020

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui :

À mon cher père et ma chère mère

À mes frères et mes sœurs

À tous mes amis et tout ma famille de pré et de loin et spécialement à ma chère mère

Je n'oublie pas également mes amis mes collègue qui mon aide en craillant une ambiance agréable et amicale tout au long de ces années d'études.



Remerciement



*Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de
notre projet de fin d'étude de Master au Département de
Automatique et système de la
Faculté de Technologie de l'Université Ghardaïa
En premier lieu, nous tenons à exprimer notre gratitude à
notre Encadreur :*

***Mr. BITEUR KADA** pour son bienveillance et sa disponibilité.
Nous remercions les membres du jury, Monsieur
LAAJAL Boumediene ; ARIF Mohamed*

D'avoir l'amabilité de présider le jury, ZEITANI Ibrahim

Nous tenons également à adresser nos remerciements à

*D'avoir accepté d'examiner notre travail. Espérant qui le trouve correspondant à
leurs attentes*

Avec nos sincères remerciements.

Nous tenons particulièrement

À remercier Allah le tout puissant,

Ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.

*Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à tous les enseignants qui ont
contribué à*

Me donner une formation solide tout au long de mes années d'études.

§ Si on veut une chose on peut l'avoir §



Résumé

Le développement des techniques d'antennes mises en œuvre dans les systèmes de communications a rapidement soulevé le problème de l'encombrement et de la fiabilité des composants utilisés. En effet, une antenne tournante mécaniquement nécessite des mécanismes précis et d'entretien contraignant. L'apparition des antennes intelligentes (en particulier l'antenne adaptative) constituées d'un ensemble d'éléments capteurs a donc permis de s'affranchir des composants mécaniques jusqu'ici inévitables en les remplaçant par des méthodes calculatoires. Le principe de fonctionnement de l'antenne intelligente est la création d'un diagramme de rayonnement modifiable dynamiquement par des algorithmes de traitement numérique des signaux sophistiqué afin d'orienter le lobe principal du diagramme de rayonnement dans la direction du signal utile et mettre des nulles dans la direction du signal indésirable qui est l'interférent, et ainsi le canal de transmission peut être amélioré par la réduction du niveau des pollutions électromagnétiques et l'obtention d'un meilleur rendement énergétique.

ملخص

استحداث تقنيات الهوائية المستخدمة في أنظمة الاتصالات اثار بسرعة مشكلة الازدحام ومصادقية المكونات المستعملة في الواقع هوائي التدوير الميكانيكي يتطلب اليات دقيقة وصيانة ملزمة وقد سمح ظهور الهوائيات الذكية وخصوصا هوائي التكيف التي تضم مجموعة من العناصر استشعار من تجاوز المكونات الميكانيكية و التي لا يمكن حتى الان تجنبها من خلال استبدالها بطرق حسابية ان مبدأ عمل الهوائي الذكي هو خلق مخطط إشعاع قابل للتعديل ديناميكيا من خلال ادخال خوارزميات متطورة خاصة بالمعالجة الرقمية الاشارات لتوجيه الفص الرئيسي لمخطط الإشعاع في اتجاه الاشارة المطلوبة و وضع الصفر في اتجاه الاشارة غير المرغوب فيها التي هي تداخل وبذلك يمكن تحسين قناة الارسال عن طريق خفض مستوى التلوث الكهرومغناطيسي وتحقيق قدر اكبر من فعالية الطاقة

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction générale | 1 |
| CHAPITRE 1 | |
| 1 Les ondes Radio..... | 2 |
| 1.1 Introduction..... | 2 |
| 1.2 Les charges électriques | 2 |
| 1.3 Rayonnement en électromagnétisme..... | 3 |
| 1.3.1 Zone de proche et de champ lointain | 4 |
| 1.3.2 Equations de Maxwell..... | 5 |
| 1.3.3 Présentation des équations de Maxwell | 5 |
| 1.3.4 Électromagnétisme dans les milieux matériels diélectriques, non magnétiques, Linéaires, Homogènes, Isotropes (LHI)..... | 6 |
| 1.4 Les ondes..... | 7 |
| 1.4.1 Les types d'ondes..... | 7 |
| 1.4.1.1 L'onde transversale..... | 8 |
| 1.4.1.2 L'onde longitudinale | 8 |
| 1.4.1.3 L'onde mécanique..... | 9 |
| 1.4.1.4 L'onde électromagnétique..... | 9 |
| 1.4.1.5 Les ondes sonores et les décibels | 9 |
| 1.4.2 La vitesse du son | 10 |
| 1.5 Conclusion : | 11 |
| 2 Généralités sur les Antennes..... | 12 |
| 2.1 Introduction..... | 12 |
| 2.2 Une antenne omnidirectionnelle (isotrope)..... | 12 |
| 2.3 Diagramme de rayonnement | 13 |
| 2.4 La transmission d'information | 14 |
| 2.5 Le rôle des antennes Antenne d'émission..... | 14 |
| 2.6 Différents types d'antennes..... | 15 |
| 2.6.1 Boucle magnétique..... | 15 |
| 2.6.2 Antenne cornet | 16 |
| 2.6.3 9. Antenne à réflecteur parabolique | 16 |
| 2.6.4 Antennes plaquées..... | 17 |
| 2.7 Le rôle de la diffraction..... | 18 |
| 2.8 Classification des antennes en fonction du type de la source..... | 19 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.9 | Classification des antennes | 19 |
| 2.9.1 | Antennes sectorielles..... | 19 |
| 2.9.1.1 | Principe de l'antenne hertzienne..... | 20 |
| 2.9.1.2 | Utilisation contemporaine de l'antenne hertzienne..... | 21 |
| 2.9.1.3 | Gain de l'antenne | 21 |
| 2.9.2 | Antennes directives | 21 |
| 2.9.3 | Antennes à gain faible $G \leq 6\text{dB}$ | 22 |
| 2.9.4 | Antennes à gain élevé $G \geq 6\text{dBi}$ | 22 |
| 2.10 | Conclusion | 23 |
| 3 | Les antennes intelligentes | 24 |
| 3.1 | Introduction..... | 24 |
| 3.2 | Avantages généraux de l'antenne intelligente..... | 25 |
| 3.3 | Antennes intelligentes dans les systèmes de communication mobile | 26 |
| 3.3.1 | Réseau linéaire à gradient de phase : | 26 |
| 3.3.2 | RFID (<i>Radio Frequency Identification</i>)..... | 27 |
| 3.4 | Récepteur d'antenne intelligente :..... | 27 |
| 3.5 | Type des antennes intelligentes :..... | 28 |
| 3.6 | Comparaison entre les deux types de l'antenne intelligente | 29 |
| 3.6.1 | Antennes adaptatives..... | 29 |
| 3.7 | Architecture et fonctionnement de l'antenne intelligente | 30 |
| 3.7.1 | Système à commutation du faisceau | 31 |
| 3.7.2 | Système à commutation du faisceau | 32 |
| 3.7.3 | Filtrage adaptatif | 32 |
| 3.7.4 | Filtre de Wiener..... | 33 |
| 3.7.5 | Filtrage adaptatif au sens de Wiener | 33 |
| 3.8 | Critères d'évaluation de performance d'un filtre adaptatif :..... | 34 |
| 3.8.1 | Applications du filtrage adaptatif :..... | 34 |
| 3.9 | Conclusion : | 35 |
| 4 | Application..... | 38 |
| 4.1 | Introduction..... | 38 |
| 4.2 | Première partie :(Diagrammes de rayonnement) | 38 |
| 4.3 | Deuxième Partie :(Réseaux d'Antennes) | 42 |

Table de figures

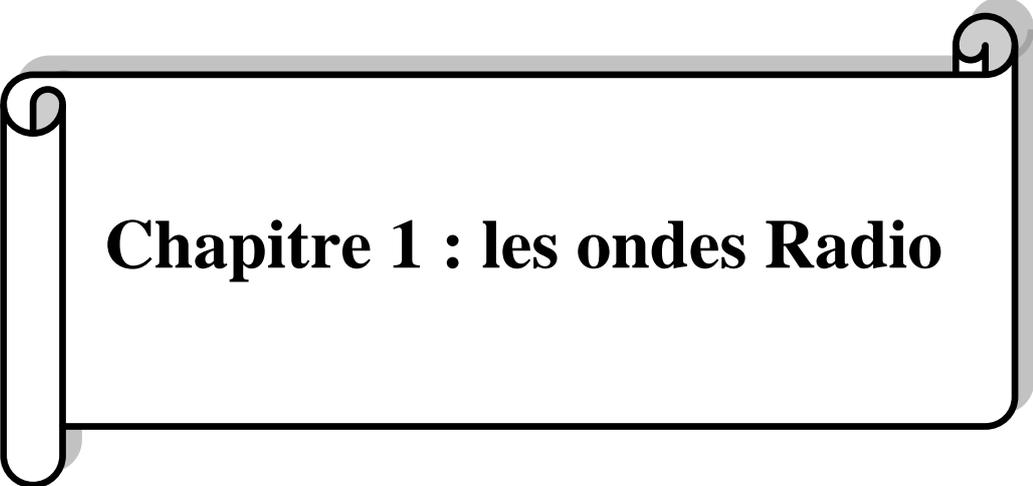
| | |
|---|----|
| figure 1-1 charge électrique | 3 |
| figure 1-2 Rayonnement électromagnétique | 4 |
| figure 1-3 Rayonnement électromagnétique produit par une antenne de longueur effective L_{eff} et parcourue par un courant sinusoïdal | 5 |
| figure 1-4 les ondes radio..... | 7 |
| figure 1-5 l'onde transversale..... | 8 |
| figure 1-6 l'onde longitudinale..... | 8 |
| figure 1-7 l'onde sonores | 10 |
| figure 2-1 Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne -diagramme cartésien. | 13 |
| figure 2-2 Spectre des ondes électromagnétiques | 14 |
| figure 2-3 Antenne dipolaire | 15 |
| figure 2-4 Boucle magnétique..... | 16 |
| figure 2-5 Antenne cornet | 16 |
| figure 2-6 Antenne à réflecteur parabolique | 17 |
| figure 2-7 Antenne plaqué..... | 18 |
| figure 2-8 Illustration du phénomène de diffraction | 18 |
| figure 2-9 Antennes sectorielle | 19 |
| figure 2-10 l'antenne hertzienne | 20 |
| figure 2-11 <i>Antenne cornet rectangulaire</i> | 21 |
| figure 2-12 Antenne cornet rectangulaire..... | 21 |
| figure 2-13 Antenne lentille ; Antenne à réflecteur au sol ; Antenne à réflecteur pour satellite | 22 |
| figure 2-14 Antenne SMOS de la bande X ; Antenne SIR-C dans l'étage de configuration de laboratoire | 22 |
| figure 2-15 Antenne à réflecteur (AstroMesh) d'INMARSAT-4 | 23 |
| figure 2-16 Réseaux d'antennes de SMOS SAT | 23 |
| figure 3-1 Schéma représentatif d'un réseau linéaire..... | 26 |
| figure 3-2 Antenne intelligente réceptrice..... | 28 |
| figure 3-3 Réseau d'antenne adaptative | 30 |
| figure 3-4 Schéma de blocs fonctionnels d'une antenne intelligente..... | 31 |
| figure 3-5 composants d'un système à faisceau commutable | 32 |
| figure 3-6 Filtre de Wiener..... | 33 |
| figure 3-7 Schéma de principe du filtrage adaptatif au sens de Wiener..... | 33 |

Introduction Générale

Depuis quelques décennies, on observe dans le domaine des télécommunications l'apparition de nouvelles technologies permettant de communiquer de manières différentes. Les transmissions sans fil sont en pleine augmentation avec la radio et la télévision numérique, bien sûr les téléphones mobiles GSM. Les ressources en canaux de transmission sont de plus en plus saturées, en particulier dans la bande de la téléphonie mobile et présentent une diffusion riche en trajet multiples. Toutefois les systèmes actuels sont déjà performants et la limite théorique donnée par la capacité reste toujours insuffisante pour les exigences du futur. Une solution à ces problèmes consiste en la combinaison (concentration) de toute l'énergie disponible à partir de l'émetteur désiré et la réjection à la réception de tous les signaux interférences des autres systèmes. Pour ce faire, il convient de développer des techniques de transmission dites MIMO-adaptatives (Multiple Input Multiple Output). Ces systèmes doivent être robustes, disponibles, autorisant des débits très importants tout en étant économes en ressources radioélectriques et cela dans des environnements de propagation complexes et fortement variables tels que les environnements mobiles multi-trajets. Les architectures, dites MIMO, ont été développées de manière significative par les laboratoires Bell en 1997. Elles permettent d'atteindre à la fois de très hautes efficacités spectrales et de lutter efficacement contre les évanouissements du signal. Nous allons étudier ici l'antenne intelligente. [1]

Notre projet de fin d'études s'articule en 4 chapitres :

Le premier chapitre introduit une généralité sur les ondes électromagnétiques, Le deuxième chapitre est consacré sur l'étude des généralités sur les antennes et une brève introduction sur les différentes techniques d'accès dans le domaine radiofréquence et Le troisième chapitre illustre les différents types d'Antennes Intelligentes et les filtres adaptatifs. Dans le dernier chapitre on a fait une application sous Matlab de différents types d'antennes en fonction de diagramme de rayonnement.



Chapitre 1 : les ondes Radio

1 Les ondes Radio

1.1 Introduction

On va étudier dans ce chapitre la définition de l'électromagnétisme et son rôle dans les domaines des antennes et nous allons entrer dans les équations de Maxwell et les précédents soulevées dans l'électromagnétisme et quel leur principal objectif et nous verrons aussi les électromagnétismes dans les milieux matériels diélectriques, non magnétiques, Linéaires, Homogènes, Isotropes. Est dans la dernière partie nous aborderons les ondes leur type et définition comment un son et approfondir les ondes électromagnétiques et les vitesses de son dans tous les domaines.

1.2 Les charges électriques

Les charges électriques au repos peuvent exercer des forces électriques entre elles, cette action à distance se fait par l'intermédiaire d'un champ électrique. Toute charge électrique Q immobile crée un champ électrique E dans l'espace environnant, qui décroît inversement avec le carré de la distance. [2]



$$e(r) = \frac{Q}{4\pi R^3} \quad (1) \quad e(r) = \frac{Q}{4\pi R^3} \quad (1)$$

De la même manière, toute circulation de courant (c'est-à-dire des charges en mouvement) à travers une interconnexion élémentaire est à l'origine d'un champ magnétique tournant autour de la ligne. Cette ligne exercera une force à distance sur toute autre interconnexion parcourue par un courant. [3]

$$e(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{dyr^3} j \wedge r \quad (2)$$

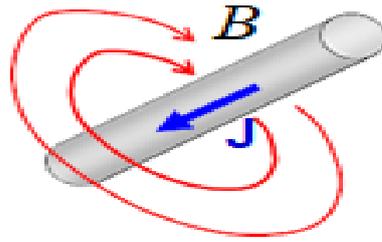


Figure 1-1 charge électrique

Les charges électriques et les courants constituent donc les sources élémentaires des champs électromagnétiques. Les deux cas précédents correspondent au cas où les charges sont immobiles (électrostatique) et les courants continus (magnétostatiques), qui conduisent à des champs constants dans le temps. Cependant, l'action d'une charge ou d'un courant n'est pas instantanée et est retardée par un temps $t = r/c$, où c est la vitesse de la lumière. Ainsi, tout mouvement de charges ou toute variation de courant induira une variation de champ électrique ou magnétique en un point donné de l'espace après un temps de retard donné.

Bien qu'en électrostatique et en magnétostatique les champs électriques et magnétiques soient indépendants, cela n'est plus le cas dès que la quantité de charge ou le courant varie. Les champs électriques et magnétiques sont alors liés. On parle alors de champ électromagnétique. Par exemple, dans un circuit électrique soumis à un champ magnétique, un courant se mettra à circuler en raison de l'apparition d'une force électromotrice, elle-même liée au champ électrique induit par la variation de champ magnétique (loi de Faraday) [4]

1.3 Rayonnement en électromagnétisme

Alors comment une antenne fait-elle pour rayonner ? Intuitivement, on sent qu'il faut qu'il y ait un déséquilibre dans la distribution de charges et les courants parcourant l'antenne, par exemple produit par toute variation temporelle du courant ou toute discontinuité dans l'antenne conduisant à une accumulation de charges. Ceci pour empêcher l'annulation de la contribution de chaque charge et de chaque élément de courant de l'antenne. Dans l'exemple suivant. Un courant continu se met à parcourir une petite boucle carrée à $t = 0$. Bien que les contributions des 2 côtés de la boucle (notés éléments 1 et 2) soient identiques en amplitude et de signe inverse, la contribution de l'élément 1 de

l'antenne arrive un peu avant celle de l'élément 2 (ou les contributions des 2 éléments sont déphasés), permettant la création d'un rayonnement électromagnétique pendant un temps très bref. Si maintenant un courant variable se met à parcourir la boucle, un rayonnement électromagnétique sera produit continuellement. [4]

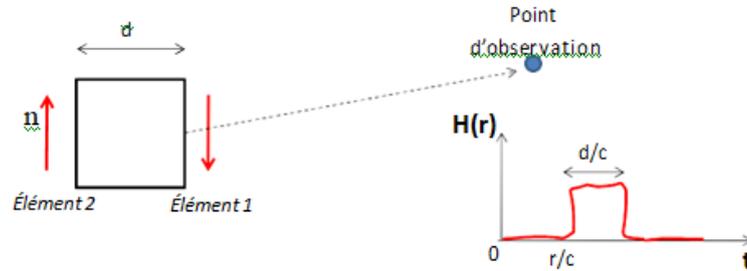


Figure 1-2 Rayonnement électromagnétique

1.3.1 Zone de proche et de champ lointain

Dans le raisonnement précédent, on considère que la taille de l'antenne est petite devant la distance R la séparant du point d'observation. La contribution de chaque partie de l'antenne a alors à peu près la même amplitude. Supposons maintenant que le point d'observation soit placé près de l'antenne, de telle manière à ce que la partie de l'antenne la plus proche fournisse la plus grande contribution aux champs électriques et magnétiques. Ceux-ci résultent de la différence de distance entre chaque partie de l'antenne. Le point d'observation est placé en zone dite de champ proche. Lorsqu'on parle de rayonnement, le point d'observation est placé en champ lointain, le rayonnement est dû à la différence de phase des champs électriques et magnétiques produits par chaque partie de l'antenne [4]

La figure présente de manière générale le champ électromagnétique produit par une antenne parcourue par un courant sinusoïdal. Celui-ci se propage à la vitesse de la lumière, son amplitude décroît avec la distance et sa phase varie avec la distance en fonction d'une constante de phase ou d'onde β . [5]

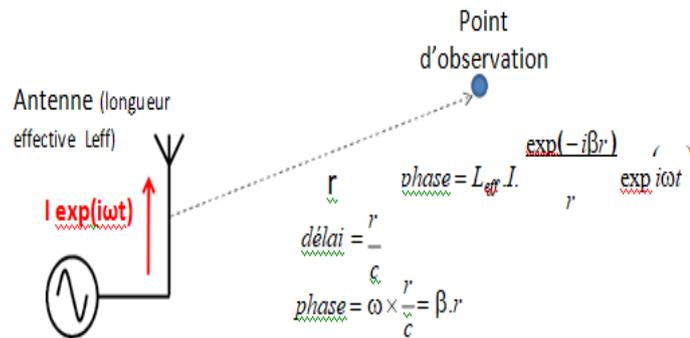


Figure 1-3 Rayonnement électromagnétique produit par une antenne de longueur effective L_{eff} et parcourue par un courant sinusoïdal

1.3.2 Equations de Maxwell

« Tout l'électromagnétisme est contenu dans les équations de Maxwell » [Feynman]. La présentation des équations de Maxwell permet de donner un cadre un peu plus mathématique à la discussion précédente. Pour plus de détails sur l'art de résoudre ces équations, reportez-vous à un ouvrage d'électromagnétisme.

1.3.3 Présentation des équations de Maxwell

La répartition des champs électriques et magnétiques dans l'espace produite par une distribution donnée de charges et de courants peut être déterminée en résolvant les équations de Maxwell. En outre, celles-ci permettent de déterminer comment l'onde électromagnétique se propage dans l'espace. Pour un milieu homogène et isotrope (cas général de la propagation en espace libre ou guidée), celles-ci sont données par les équations 3 à 7.

| | |
|------------------------------|---|
| Equation de maxwell gauss | $divE = \frac{\rho}{\epsilon}$ Equation 3 |
| equation de maxwell thompson | $divB = 0$ Equation 4 |
| Equation de maxwell faraday | $rotE = -u \frac{dH}{dt}$ Equation 5 |
| Equation de Maxwell Ampère | $rotH = \sigma E + \epsilon \frac{dE}{dt}$ Equation 6 |

Tableau : équation de maxwell

- ρ : densité volumique de charge
- ϵ : permittivité électrique (F/m). A noter ϵ_0 : permittivité diélectrique dans le vide (= 8.85 et ϵ_r : permittivité électrique relative telle que $\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r$
- μ : perméabilité magnétique (H/m). A noter μ_0 : permittivité diélectrique dans le

vide ($= 4\pi \cdot 10^{-7}$) et μ_r : permittivité magnétique relative telle que $\mu = \mu_0 \times \mu_r$

L'équation de Maxwell-Gauss (issue du théorème de Gauss) indique que toute distribution de charges dans l'espace conduit à l'apparition d'un champ électrique, de telle sorte que pour tout volume contenant ces charges, le flux du champ électrique sortant de cette surface est proportionnel à la somme de toutes les charges. [6]

L'équation de Maxwell-Faraday est issue de la loi de Faraday et décrit le phénomène d'induction d'une force électromotrice par un champ magnétique variable. Le flux d'un champ magnétique variable à travers toute surface incluse à l'intérieur d'un contour fermé donne naissance à une force électromotrice. L'équation de Maxwell-Ampère permet de relier le champ magnétique au courant circulant dans un circuit. Elle est issue de la loi d'Ampère $\text{rot } H = I_c$

1.3.4 Électromagnétisme dans les milieux matériels diélectriques, non magnétiques, Linéaires, Homogènes, Isotropes (LHI)

La polarisation d'un diélectrique apparaît dans les milieux qui comprennent des charges électriques dites libres. Dans un diélectrique parfait, il n'existe pas de charges électriques libres ; il ne présente donc aucune polarisation. En particulier, un champ électrique appliqué ne provoque pas de courant électrique.

Mais les charges électriques localisées ou libres sont susceptibles de se déplacer autour des atomes ou de vibrer sous l'influence d'un champ électrique : il y a alors apparition d'une polarisation. Cependant, les porteurs de charges (électrons des atomes) peuvent se déplacer autour des atomes sous l'effet d'un champ électrique, ce qui entraîne une polarisation locale de la matière.

La polarisation est une grandeur physique macroscopique utilisée dans l'étude des propriétés des matériaux diélectriques. Elle désigne la densité de dipôles électriques. Son unité dans le Système international est le C/m^2 . Ce concept a été introduit par Faraday alors qu'il étudiait le comportement des isolants électriques dans des champs électrostatique [7]

1.4 Les ondes

Une onde modifie localement et temporairement les propriétés d'un milieu. Par exemple, lorsqu'on lance un caillou dans l'eau, la surface de l'eau est modifiée et des ondulations apparaissent à sa surface. Lors d'un tremblement de terre, la croûte terrestre transmet les vibrations du séisme. Lorsqu'on pince une corde de guitare, on peut la voir vibrer. Toutes ces perturbations sont des exemples perceptibles d'onde.

Une onde ne transporte que de l'énergie d'une zone vers une autre ; elle ne transporte pas de matière. Par exemple, dans le schéma ci-dessous, on constate que la bille bleue demeure au même endroit après le passage de l'onde ; elle ne fait que monter et descendre en fonction du rythme de l'onde



Figure 1-4 les ondes radio

Les ondes peuvent être très différentes les unes des autres. Selon leurs caractéristiques, le milieu dans lequel elles se propagent ainsi que leur type, elles peuvent être diverses. [8]

1.4.1 Les types d'ondes

On peut distinguer les ondes selon leur façon de se propager ou encore en fonction du milieu nécessaire à leur propagation. Deux types d'ondes dépendent du type de propagation.

- L'onde transversale
- L'onde longitudinale

Selon le milieu de propagation nécessaire à la transmission de l'onde, on distingue deux types d'ondes :

1. L'onde mécanique
2. L'onde électromagnétique

1.4.1.1 L'onde transversale

Une onde transversale est une onde qui se propage perpendiculairement au déplacement du milieu, c'est-à-dire qu'elle monte et descend.

Le mouvement des vagues représente la trajectoire d'une onde transversale. En effet, certaines ondes mécaniques comme les vagues et les secousses sismiques sont des ondes transversales. Les ondes électromagnétiques, dont la lumière fait partie, sont aussi des ondes transversales.[9]

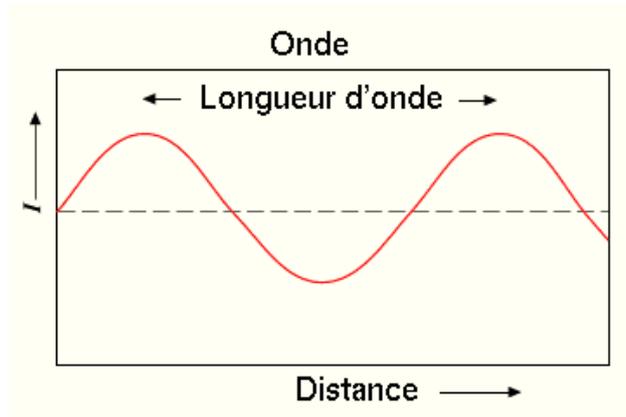


Figure 1-5 l'onde transversale

1.4.1.2 L'onde longitudinale

Une onde longitudinale est une onde qui se propage parallèlement au déplacement du milieu, c'est-à-dire qu'elle se comprime et s'étire. Les ondes sonores, qui sont des ondes mécaniques, correspondent à des ondes longitudinales.

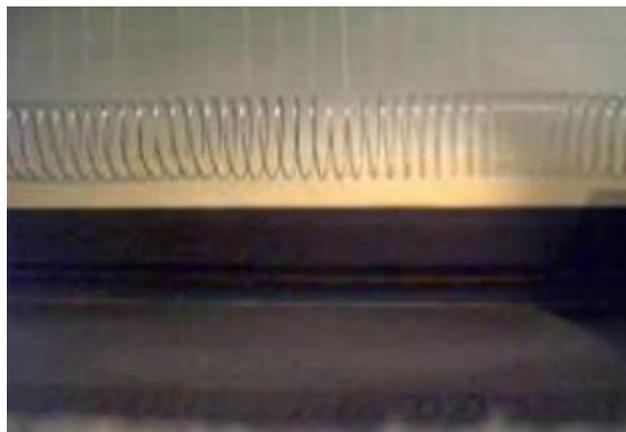


Figure 1-6 l'onde longitudinale

1.4.1.3 L'onde mécanique

Une onde mécanique est une onde qui a besoin d'un milieu matériel pour se propager. Les vagues, le son et les ondes sismiques sont des types d'ondes mécaniques.

Les ondes mécaniques ont besoin d'un milieu matériel (liquide, solide ou gazeux) pour se propager. Par exemple, l'eau sert à transporter les vagues, l'air transporte les sons et les ondes sismiques se déplacent dans le sol.

Les ondes mécaniques ont besoin d'un milieu matériel (liquide, solide ou gazeux) pour se propager. Par exemple, l'eau sert à transporter les vagues, l'air transporte les sons et les ondes sismiques se déplacent dans le sol.

1.4.1.4 L'onde électromagnétique

Une onde électromagnétique est une onde qui se propage autant dans le vide que dans un milieu matériel. Les ondes radio, les ondes lumineuses, les rayons X sont des exemples d'onde électromagnétique.

L'ensemble des ondes électromagnétiques fait partie du spectre électromagnétique. La lumière visible ne constitue qu'une partie de ce spectre. Ces ondes, puisqu'elles sont capables de se déplacer dans le vide, expliquent pourquoi les rayons du Soleil peuvent parvenir jusqu'à la surface de Terre en voyageant dans le vide interstellaire. Dans le vide, la vitesse des ondes électromagnétiques est de 300 000 km/s [10]

1.4.1.5 Les ondes sonores et les décibels

Le son est une onde que l'oreille peut détecter. En effet, les sons que nous entendons sont généralement produits par les vibrations de l'air qui se répercutent sur le tympan et le font vibrer à son tour.

Par exemple, lorsqu'on frappe sur la surface d'un tambour, la membrane vibre. Lorsque la membrane monte, elle pousse les particules d'air qui se trouvent près du tambour. Elles se rapprochent alors ce qui crée une zone de compression. À l'inverse, lorsque la membrane descend, les particules s'éloignent les unes des autres ce qui crée une zone de raréfaction. C'est par ces variations de pression que l'onde sonore peut se propager. Il est important de se souvenir que seule l'onde se propage ; les particules d'air se déplacent très peu dans un mouvement de va-et-vient.

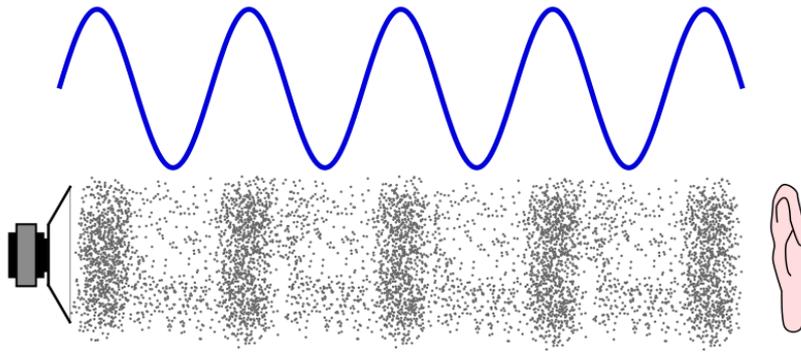


figure 1-7 l'onde sonores

1.4.2 La vitesse du son

Puisque le son est une onde mécanique, il a besoin d'un support matériel pour pouvoir se propager. Ainsi, les ondes sonores se propagent aussi bien dans les solides et dans les liquides que dans les gaz (comme l'air ambiant). Il est donc impossible au son de se déplacer dans le vide. La vitesse de propagation du son dépend du milieu dans lequel l'onde sonore se propage [11]

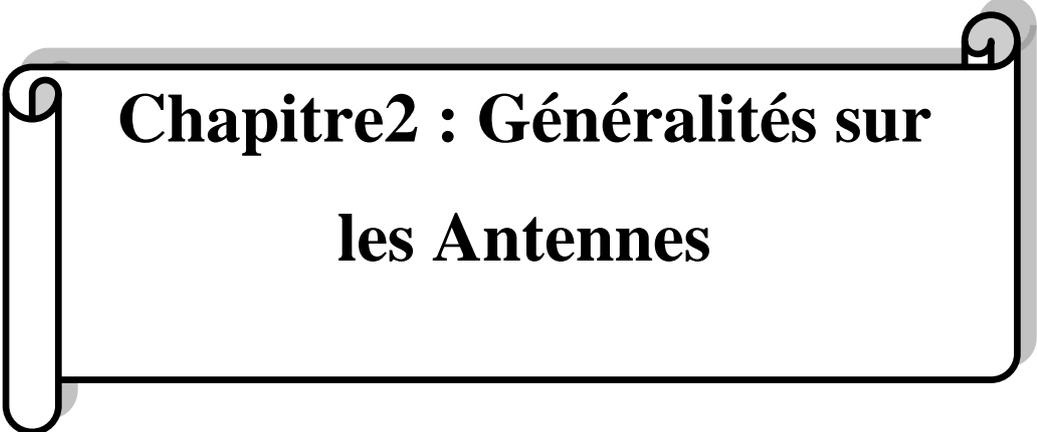
| Milieu | Vitesse du son m/s | Vitesse du son km/h |
|------------------|--------------------|---------------------|
| Air | 346 | 1246 |
| Eau | 1490 | 5346 |
| Plastique | 1800 | 6480 |
| Bois | 4000 | 14400 |
| Acier | 5200 | 18720 |

1.5 Conclusion :

Les électromagnétiques et les ondes ont toujours existé des phénomènes normaux terrestre et atmosphérique, et nous n'avons jamais été affecté par le passé. Or, l'arrivée de la technologie toujours grandissante a développé quelques inquiétudes.

Les appareils tels le téléphone, le four à micro-onde, le réseau sans fils sont des inventions récentes, qui ont tout au plus 40 ans d'existence... Cependant, ce n'est que récemment que des problèmes ont commencé à apparaître

Des pathologies nouvelles, des problèmes de santé accrus... cela a mis la communauté de scientifique en alerte.



**Chapitre2 : Généralités sur
les Antennes**

2 Généralités sur les Antennes

2.1 Introduction

Les premières antennes sont apparues à la fin du XIXe siècle, à une phase où les recherches dans les domaines électromagnétiques et électronique ont connu des développements remarquables.

Le britannique James Maxwell, en 1870, réalise de très importants progrès lors de ses études des ondes électromagnétiques en démontrant que celles-ci voyagent aussi bien dans le vide que dans la matière. Cela a permis de réaliser les premières expériences de la radio (transmission sans fil) en 1895, par le physicien Marconi, lauréat du prix Nobel de physique en 1909 « en reconnaissance de ses contributions au développement de la télégraphie sans fil ». [12]

Ainsi, le développement de ces réseaux sans fil nécessite des avancées technologiques au niveau des composants électroniques, des logiciels informatiques, des techniques de codage ou encore des antennes. Les antennes est un des points clés des réseaux sans fil puisque cet élément est un facteur clé de la chaîne permettant l'émission, la transmission et la réception du signal et donc de l'information contenue dans celui-ci. L'antenne utilisée pour station de communication doit être adaptée à chaque liaison en fonction de la couverture souhaitée. [13] Une antenne sert à convertir une puissance électrique en une puissance rayonnée, c'est-à-dire transportée par une onde électromagnétique, qui peut se propager dans toutes les directions de l'espace. Les directions dans lesquelles cette puissance va dépendre des caractéristiques de l'antenne. Commençons par exprimer la puissance rayonnée par une antenne quelconque, dont le centre est placé au centre d'un repère sphérique et connectée à une source qui lui fournit une puissance électrique.

2.2 Une antenne omnidirectionnelle (isotrope)

Une antenne isotrope est une source ponctuelle qui rayonne une onde sphérique, c'est-à-dire de manière constante dans toutes les directions de l'espace la puissance PA fournie par l'alimentation, sans pertes et d'une propagation dans un milieu homogène et isotrope. Puissance rayonnée par unité d'angle solide, Puissance rayonnée par unité de surface :

A partir de la mesure de la puissance rayonnée, il est possible de déterminer la valeur du champ électrique. En espace libre et en champ lointain, la puissance transportée par l'onde est

donnée par le vecteur de Poynting et les champs E et H sont perpendiculaires, en phase et reliés par l'impédance d'onde. On peut en déduire la relation suivante

2.3 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0 , φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique. [13]

On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$, qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Celui-ci peut se représenter sous différentes formes. En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta = 90^\circ$) et verticaux ($\varphi = \text{constante}$), ou bien dans les plans E et H.

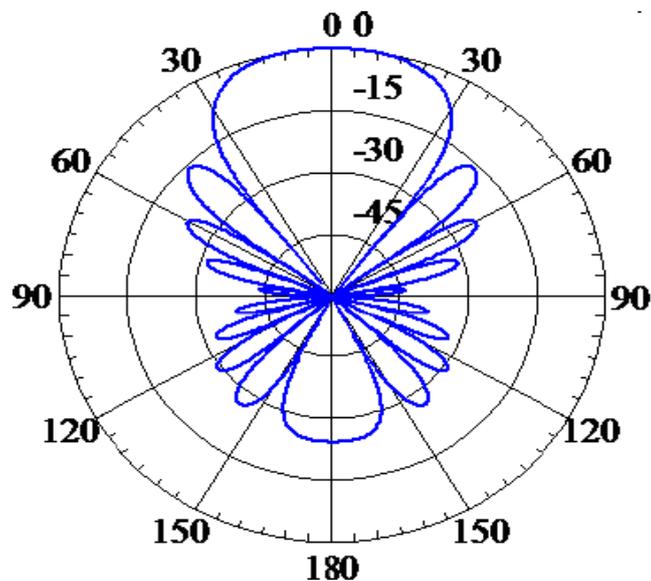


Figure 2-1 Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne -diagramme cartésien. [14]

2.4 La transmission d'information

La transmission d'information s'effectue généralement grâce à une onde porteuse, caractérisée par sa fréquence. C'est une onde sinusoïdale. Sa modulation par un signal de plus basse fréquence représente l'information à transmettre. Nous n'aborderons pas ici les différents types de modulations existant qui peuvent être analogiques ou numériques. Les ondes porteuses sont de différentes natures. Ce sont les caractéristiques du système qui permettent de choisir le type de transmission. Les ondes les plus utilisées pour la transmission sont les ondes acoustiques et les ondes électromagnétiques. Nous ne parlerons, dans cet ouvrage, que de ce dernier type. Bien qu'une onde électromagnétique n'ait besoin d'aucun support pour se propager, il se trouve que, dans son utilisation pour la transmission d'information, elle se propage à travers un milieu. Les différents milieux dans lesquels s'effectue la propagation d'ondes électromagnétiques sont : – les conducteurs (transmission filaire), – la silice (transmissions par fibres optiques), – l'air (transmissions hertziennes).

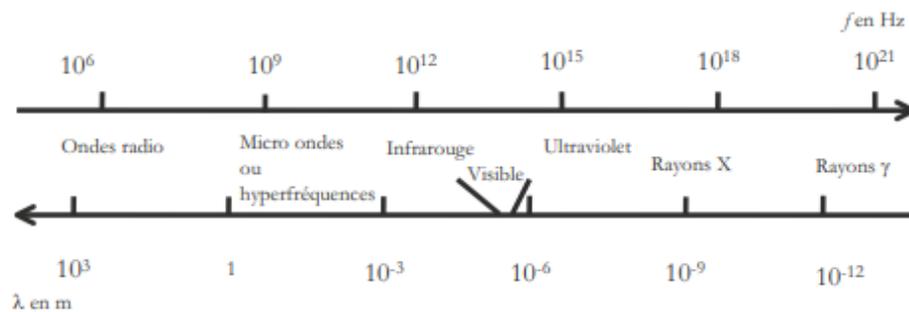


figure 2-2 Spectre des ondes électromagnétiques [15]

2.5 Le rôle des antennes Antenne d'émission

Afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur. Antenne de réception De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Elle joue le même rôle qu'un télescope qui capte la lumière issue des étoiles et la transforme. Réciprocité Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité qui sera démontré plus loin. Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne

sont pas réciproques. Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart des cas [16]

2.6 Différents types d'antennes

Afin de comprendre comment s'effectue cette transformation entre la puissance guidée et la puissance rayonnée, nous allons présenter un certain nombre d'antennes. Elles sont classées ici selon un ordre qui suit approximativement leur chronologie d'apparition. Il n'est pas question dans ce paragraphe de présenter tous les types d'antennes, mais d'en introduire certains des plus utilisés. En conclusion, nous aboutirons à un classement des antennes selon le type de la source rayonnante qui apparaîtra soit comme un courant électrique, soit comme une surface caractérisée par un champ électrique. Antenne dipolaire L'antenne dipolaire est constituée de deux fils alignés, très courts et reliés chacun à deux fils parallèles et très proches constituant une ligne bifilaire. En émission, cette ligne est reliée à un générateur alternatif, caractérisé par sa fréquence et son impédance interne. À la réception, la ligne bifilaire est branchée sur un récepteur [17]

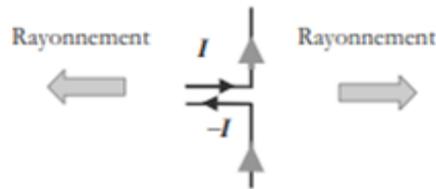


figure 2-3 Antenne dipolaire

2.6.1 Boucle magnétique

La boucle magnétique est constituée d'un fil conducteur ayant une forme qui permet le retour du fil sur lui-même. La boucle est ainsi branchée sur une ligne bifilaire reliée au générateur. Le rayonnement, à grande distance, est maximal dans le plan de la boucle et s'effectue de façon radiale. Le courant circulant dans le fil crée un champ magnétique qui se propage. Sa variation engendre le champ électrique associé, d'où le rayonnement électromagnétique associé. En champ lointain, les boucles magnétiques ont été très utilisées pour les récepteurs de grandes ondes radio sous forme d'un cadre sur lequel étaient enroulées plusieurs spires de fil. En champ proche, on les utilise dans tous les dispositifs RFID (identification radio

fréquence). Les cartes à puce sans contact sont munies de ce type d'antenne, incluse dans le support plastique. Les détecteurs d'objets métalliques sont aussi des boucles magnétiques sensibles au champ magnétique [18]

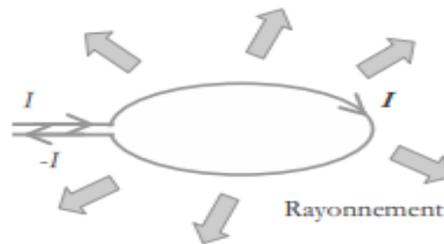


figure 2-4 Boucle magnétique

2.6.2 Antenne cornet

Un dispositif très utilisé pour la propagation d'ondes guidées est le guide d'onde rectangulaire. Sa qualité de transmission est excellente. Pour cette raison, il est utilisé en haute en fréquence. Son utilisation est très répandue en hyperfréquences. Le transformateur de puissance électromagnétique guidée en puissance rayonnée est l'antenne cornet. Sa forme permet de passer graduellement des dimensions du guide d'onde à l'espace libre. L'onde est ainsi naturellement projetée dans l'espace libre. C'est le même principe que le cornet acoustique. Les transitions présentent des formes variées : linéaires, exponentielles... Le cornet sert de dispositif d'adaptation entre l'impédance du cornet et celle du vide. De façon très naturelle, le rayonnement a lieu dans l'axe du guide d'onde. Cette antenne est plus directive que les précédentes, dans la mesure où la puissance n'est émise que dans une région de l'espace limitée [19]



figure 2-5 Antenne cornet

2.6.3 Antenne à réflecteur parabolique

Antenne à réflecteur parabolique. L'antenne à réflecteur est constituée de la source d'émission associée à une partie métallique réfléchissante, souvent de forme parabolique la source, placée au foyer de la parabole envoie l'onde vers le réflecteur parabolique. Selon la propriété bien

connue de la parabole, tous les rayons sont réfléchis parallèlement. Ce type d'antenne est utilisé pour viser dans une direction très précise, puisque tous les rayons passant par le foyer sortent parallèles. Par décalage de la source dans le plan focal, les rayons parallèles à la sortie du réflecteur, peuvent présenter une inclinaison par rapport à l'axe de la parabole. Ces antennes permettent de recevoir un signal d'un satellite, placé à très grande distance. Les antennes de ce type sont très répandues pour la réception de la télévision. Leur orientation est choisie de façon à viser un satellite particulier. Afin d'éviter les perturbations par la pluie ou la neige, ces antennes sont souvent recouvertes d'un radôme. C'est le cas des antennes très exposées aux conditions climatiques, utilisées pour les transmissions hertziennes. Elles sont reconnaissables par leur forme, parabolique à l'arrière et conique à l'avant du fait de la forme du radôme qui protège la source, placée au foyer

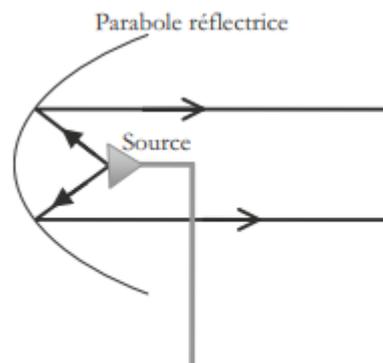


figure 2-6 Antenne à réflecteur parabolique

2.6.4 Antennes plaquées

L'antenne plaquée, appelée aussi antenne patch est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents. Elle est constituée d'un diélectrique, possédant un plan de masse métallique sur une face. Sur l'autre face, une gravure métallique permet de supporter des courants de surface qui créent le rayonnement électromagnétique. Les courants sont amenés du générateur à l'antenne par une ligne micro ruban [20]

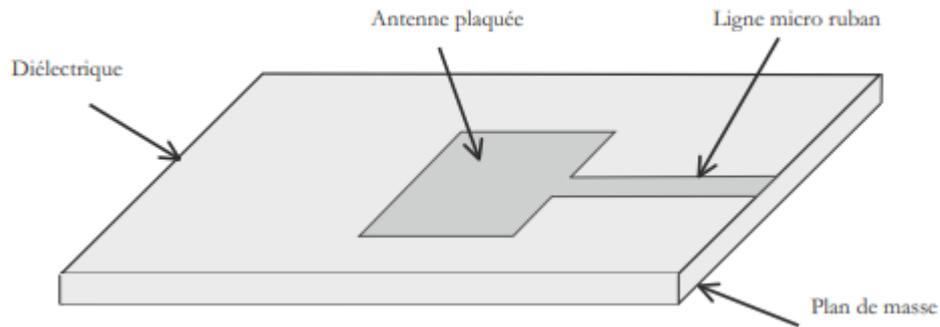


figure 2-7 Antenne plaqué

2.7 Le rôle de la diffraction

Le principe de fonctionnement des antennes repose sur le phénomène de diffraction. Dans la suite de cet ouvrage, nous en verrons les différents aspects théoriques. Il résulte de ce point que c'est la forme du dispositif diffractant qui détermine les caractéristiques du rayonnement. Les antennes ont des dimensions qui sont du même ordre de grandeur que celui de la longueur d'onde rayonnée. La diffraction est un phénomène lié au caractère ondulatoire d'une grandeur. En électromagnétisme, la diffraction joue sur le champ électromagnétique. L'expérience simple mettant en évidence ce phénomène est celui d'une onde plane qui interagit avec une ouverture percée dans un écran. Si la dimension du trou est nettement plus grande que la longueur d'onde, l'onde électromagnétique va passer sans perturbation apparente. Donc elle suit une trajectoire rectiligne. Si, au contraire, la dimension de l'ouverture est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, le phénomène de diffraction se manifeste par le fait que la répartition de la puissance s'étale autour de la direction d'incidence, après passage à travers [21].

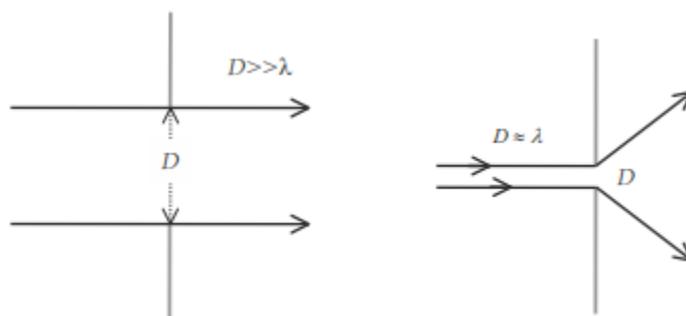


figure 2-8 Illustration du phénomène de diffraction

2.8 Classification des antennes en fonction du type de la source

Il existe de nombreuses façons de classer les antennes. Nous en proposons certaines dans cet ouvrage. Une première classification repose sur le type de la source rayonnante. En effet, parmi les différentes antennes décrites dans ce chapitre, il est évident pour certaines que la source du rayonnement est constituée de courants (dipôle, boucle, antenne planaire). Ces courants sont soit linéiques, soit surfaciques. L'interprétation du rayonnement est alors aisée : les courants variables vont créer un rayonnement dans tout l'espace selon leur répartition. Comment alors interpréter le rayonnement d'un cornet ? Certes, il existe des courants surfaciques sur les parois du cornet qui permettraient de calculer le champ rayonné. On préfère un autre point de vue qui est celui de dire que, sur la surface de sortie du cornet, il existe un champ électrique dont la répartition impose la forme du champ rayonné dans tout l'espace. On parle alors de surface rayonnante. On distingue alors : – le rayonnement par les courants, – le rayonnement par les ouvertures [22]

2.9 Classification des antennes

Selon leur diagramme de rayonnement Les mesures des diagrammes de rayonnement des antennes s'achèvent en espace libre ou en chambre à échoïque. Suivant l'allure des diagrammes de rayonnement, on spécifie trois types d'antennes les plus connue

2.9.1 Antennes sectorielles

Ce qui ne va pas avec ce type d'antenne, c'est que l'angle de transmission est étroit environs 120 degrés, donc pour couvrir un angle 360 degrés il faut au moins trois antennes. Ce type d'antenne donne une longue distance d'émission en fonction de l'angle de couverture. Si le signal est focalisé dans un angle de couverture faible la distance de transmission sera grande et la transmission de données sera rapide [23]



figure 2-9 Antennes sectorielle

2.9.1.1 Principe de l'antenne hertzienne (sectorielles)

Une antenne radioélectrique permet de convertir des grandeurs électriques existantes au sein d'un conducteur ou d'une ligne de transmission en grandeurs électromagnétiques dans l'espace. Cette fonctionnalité est double, car elle autorise à la fois le double processus d'émission et de réception. Dans le premier cas, la puissance électrique est transformée en puissance électromagnétique, inversement dans le second cas. Heinrich Hertz, en 1888, fait cette découverte et concrétise la théorie de Maxwell. Pour obtenir ce résultat, il utilise des antennes doublet et installe un dipôle émetteur au foyer d'un réflecteur parabolique. C'est Marconi qui baptisa le dispositif « antenne », l'inventeur allemand léguant son nom aux ondes repérées émises et transmises. [24]

Les principaux paramètres d'une antenne hertzienne sont les fréquences d'utilisation, le diagramme de rayonnement, l'impédance d'antenne, la polarisation, le rendement, la puissance maximale tolérée en émission et l'encombrement mécanique.

Enfin, le calcul des champs nécessite des formules mathématiques précises. Par exemple, pour déterminer l'amplitude du champ électrique lors de l'émission, il est nécessaire d'intégrer le nombre imaginaire, l'intensité du courant alternatif, la permittivité diélectrique du vide, la vitesse de la lumière dans le vide, la distance entre le dipôle et le point où le champ est évalué, le nombre d'ondes, la longueur d'onde et la pulsation.[25]



Figure 2-10 l'antenne hertzienne

2.9.1.2 Utilisation contemporaine de l'antenne hertzienne

Une antenne hertzienne est désormais utilisée pour émettre ou capter des ondes électromagnétiques dans des domaines tels que la radio ou la télévision. Les antennes sont généralement placées à un endroit relativement dégagé. Les antennes émettrices en radio par exemple sont des conducteurs métalliques de grande taille dans lesquels passent des courants à très haute fréquence. Il est généralement préférable de les installer à un endroit isolé et assez haut pour avoir une portée assez importante. [26]

2.9.1.3 Gain de l'antenne

Dans le calcul d'une liaison, le gain est la caractéristique la plus importante d'une antenne. Il est défini comme étant le rapport de la puissance rayonnée par l'antenne, dans une direction, par unité d'angle solide, sur la puissance rayonnée par une antenne de référence par unité d'angle solide. [27]

2.9.2 Antennes directives

Une antenne directive est donc une antenne qui rayonne dans une (ou plusieurs) directions privilégiées. Les antennes directives sont utilisées lorsque l'on veut couvrir une zone importante, par exemple pour la téléphonie mobile ou pour la radiodiffusion. Il existe plusieurs types d'antennes directives spatiales tels que : les Antennes à ouverture rayonnante et système focalisant Les cornets font partie des antennes à ouverture rayonnante et les antennes à réflecteur ou à lentille sont des antennes à système focalisant. [28]



figure 2-11 *Antenne cornet rectangulaire*



figure 2-12 Antenne cornet rectangulaire

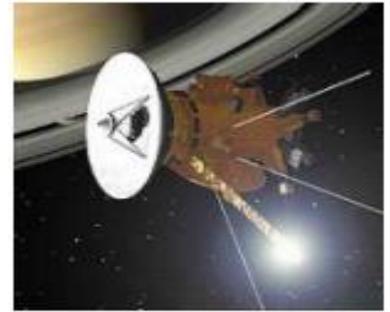


figure 2-13 Antenne lentille ; Antenne à réflecteur au sol ; Antenne à réflecteur pour satellite

2.9.3 Antennes à gain faible $G \leq 6\text{dB}$

L'antenne patch est une pastille métallique à la surface d'un substrat diélectrique dont la face inférieure est métallisée, L'antenne patch est le meilleur choix dans les véhicules, les avions et les petits satellites. Ce type d'antenne est utilisé dans les navigateurs du satellite, récepteur GPS [29]



figure 2-14 Antenne SMOS de la bande X ; Antenne SIR-C dans l'étage de configuration de laboratoire

2.9.4 Antennes à gain élevé $G \geq 6\text{dBi}$

Les antennes à réflecteur parabolique et les réseaux d'antennes patchs et les antennes destinés pour les applications de l'espace lointain par exemple les antennes Cassini sont des antennes à gain élevé [30]



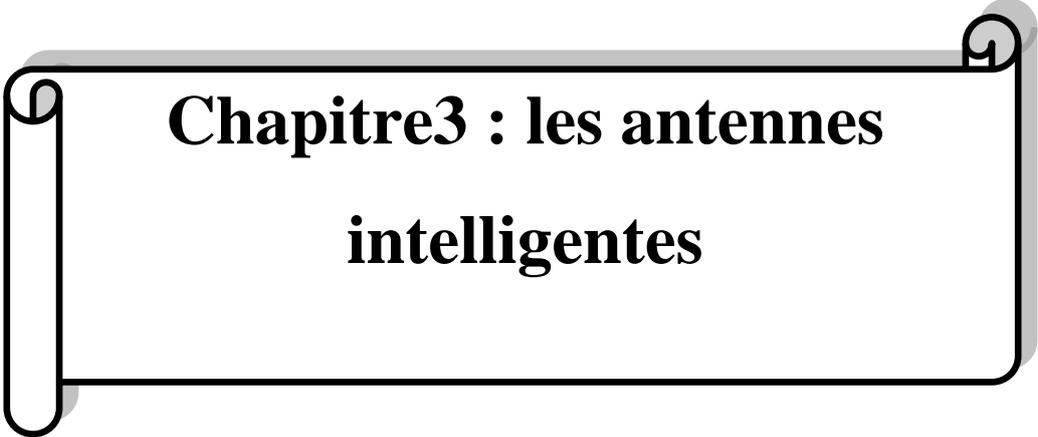
figure 2-15 Antenne à réflecteur (AstroMesh) d'INMARSAT-4



figure 2-16 Réseaux d'antennes de SMOS SAT

2.10 Conclusion

Dans le présent chapitre on a présenté les généralités des antennes employées dans plusieurs applications grâce à ses bonnes performances et caractéristiques. Leurs techniques d'alimentation de ce type d'antenne et ses avantages et inconvénients ont été présentées. De plus, les différents types des antennes et ces classifications techniques et d'analyse la transformation des informations par les antennes a été décrite.



**Chapitre3 : les antennes
intelligentes**

3 Les antennes intelligentes

3.1 Introduction

Une antenne intelligente est une structure antennaire composée de plusieurs éléments d'antennes directionnels où le signal de ces éléments est traité d'une manière adaptative afin d'exploiter le domaine spatial du canal radio- mobile. La technologie d'antenne intelligente peut considérablement améliorer les performances et l'économie du système sans fil pour un ensemble de potentiels utilisateurs. Elle permet aux opérateurs de réseaux cellulaires et de boucle locale sans fil de réaliser une augmentation significative dans la qualité du signal, la capacité du réseau, et la couverture. En réalité, les antennes ne sont pas intelligentes mais plutôt leurs systèmes qui sont intelligents. En général, un système d'antenne intelligente combine un réseau d'antennes avec une capacité de traitement numérique de signal pour transmettre et recevoir d'une manière adaptative et spatialement sensible. Autrement dit, un tel système capable à modifier automatiquement la direction des diagrammes de rayonnement en fonction de l'environnement du signal. Ceci peut augmenter considérablement les caractéristiques de performance (comme la capacité) d'un système sans fil. Il s'agit d'une nouvelle et prometteuse technologie dans le domaine des communications sans fil et mobiles dans lequel la capacité et les performances sont généralement limitées par deux grands handicaps qui sont les multi-trajets et les interférences du Co-canal. Le trajet multiple est une condition qui survient lorsqu'un signal transmis subit une réflexion à partir de divers obstacles dans l'environnement. [31] Cela donne lieu à des multiples signaux en provenance de différentes directions au niveau du récepteur. Les antennes intelligentes (aussi connu comme les antennes réseau adaptatif et les multi-antennes) sont des réseaux d'antennes avec des algorithmes intelligents de traitement du signal intégrés pour identifier une signature de signal spatial telle que la direction d'arrivée du signal qui est utilisée pour calculer les vecteurs de formation du faisceau, ou pour suivre et localiser le faisceau de l'antenne sur les cibles mobiles. Les techniques d'antennes intelligentes sont utilisées notamment dans le traitement du signal acoustique, les radars, la radioastronomie et les radiotélescopes, et la plupart du temps dans des systèmes cellulaires comme WCDMA et UMTS. Une antenne intelligente est un système antennaire de communication numérique sans fil profitant de l'avantage de l'effet de la diversité au niveau de la source (émetteur), au niveau de la destination (récepteur), ou aux deux niveaux. L'effet de diversité implique la transmission et / ou la réception des multiples ondes radio fréquence (RF) pour augmenter la vitesse de données et réduire le taux

d'erreur. Le résultat est un signal de mauvaise qualité au niveau du récepteur en raison du décalage de la phase. L'interférence du Co-canal est une interférence entre deux signaux qui fonctionnent à la même fréquence. Une antenne intelligente permet d'assurer une plus grande capacité dans les réseaux sans fil en réduisant efficacement les multi-trajets et les interférences du Co-canal. Ceci est obtenu en concentrant le rayonnement uniquement dans la direction souhaitée et en s'ajustant selon l'évolution des conditions de transmission ou l'environnement des signaux [32]

3.2 Avantages généraux de l'antenne intelligente

Les avantages de l'utilisation des antennes intelligentes sont multiples et peuvent être récapitulés et regroupés en ce qui suit :

- Annulation des brouillages Co-canal, et donc une augmentation du rapport signal à interférent (RSI). L'annulation dans les directions des interférents est réalisée en formant des zéros dans le diagramme de rayonnement (formation de voies)
- Augmentation de la portée grâce au gain obtenu sur le rapport signal à bruit (RSB). Le lobe principal de l'antenne est orienté dans la direction du mobile, une localisation du mobile dans l'espace est donc nécessaire (d'où le terme "antenne intelligente").
- Limitation de la dispersion des retards en réduisant l'effet des trajets multiples : augmentation des débits, diminution de la complexité de l'égaliseur dans la chaîne de réception.
- Augmentation de la capacité :
 - Dans les systèmes cellulaires, l'annulation des interférences Co-canal permet une réutilisation plus importante des fréquences (diminution du nombre de cellules par motif).
 - Technique d'Accès Multiple par Répartition Spatiale (AMRS ou SDMA : Spatial Division Multiple Access), dans une même cellule, plusieurs utilisateurs qui occupent le même canal (temps, fréquence ou code) peuvent être séparés spatialement par l'antenne à condition que leurs écarts angulaires soient suffisants.
- Meilleurs services : l'utilisation des systèmes à antenne intelligente permet au réseau d'avoir l'accès aux informations spatiales sur les utilisateurs. Cette information peut être envoyée pour évaluer la position des utilisateurs avec beaucoup plus de précision que dans le réseau existant. Ceci peut être appliqué dans des services comme ceux des appels d'urgence.

- 6. Dépenses réduites à cause du rendement de la puissance fournie par le système à antenne intelligente en combinant les entrées des multiples éléments pour optimiser le gain disponible vers l'utilisateur, et qui résulte dans les *coûts réduits d'amplificateur et la faible consommation d'énergie.
- Meilleure sécurité Dans une société qui est de plus en plus dépendante de la conduite des affaires et de la transmission de renseignements personnels, la sécurité est une question importante. L'utilisation des systèmes à antenne intelligente diminue le risque de tapement de connexion. L'intrus doit être situé dans le même sens que l'utilisateur comme on le voit à partir de la station de base.
- Compatibilité : La technologie d'antenne intelligente peut être appliquée à différentes techniques d'accès multiples, telles que TDMA, FDMA et CDMA. Elle est compatible avec presque toutes les méthodes de modulation et des bandes passantes [33]

3.3 Antennes intelligentes dans les systèmes de communication mobile

3.3.1 Réseau linéaire à gradient de phase :

Un réseau linéaire uniforme est la géométrie le plus fréquemment utilisée dans la conception des antennes réseaux. La (Figure III.4) représente un réseau formé de N antennes alignées et séparées par une distance d (distance entre deux éléments). Les éléments sont excités uniformément avec un gradient de phase progressive $\Delta\varphi$

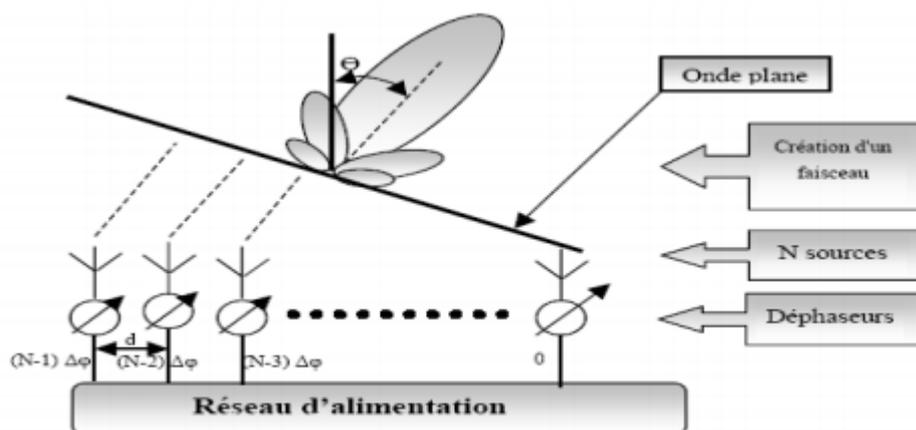


figure 3-1 Schéma représentatif d'un réseau linéaire. [34]

3.3.2 RFID (*Radio Frequency Identification*)

Le sigle RFID signifie *Radio Frequency Identification*, comprenez radio-identification. Il désigne une méthode utilisée pour stocker et récupérer des données à distance en utilisant des balises métalliques, les « Tags RFID ». Ces balises, qui peuvent être collées ou incorporées dans des produits, réagissent aux ondes radio et transmettent des informations à distance. Cette technologie pourrait, à terme, remplacer les codes-barres. Mais sa redoutable efficacité pose des problèmes d'éthique et de confidentialité.

La technologie RFID est utilisée même si c'est au début, de façon confidentielle, pour des applications militaires depuis la seconde guerre mondiale. Mais ce n'est qu'à partir des années 2000 qu'elle se popularise. Dans le secteur de la logistique, elle participe à la traçabilité des produits de l'entrepôt au magasin. Ensuite, elle se transforme en système antivol et en moyen d'identification des produits en caisse. Dans les bibliothèques, la RFID aide à identifier les livres. Et on la trouve aussi sur les passeports, sur les cartes d'accès aux transports en commun et même dans les puces qui servent à identifier nos chiens et nos chats. Plus récemment, elle a permis d'imaginer la commercialisation d'objets communicants.

3.4 Récepteur d'antenne intelligente :

La Figure représente schématiquement les éléments de la partie réceptrice d'antenne intelligente. Le réseau d'antennes contient M éléments. Les M signaux sont combinés dans un signal unique, qui est l'entrée aux restes des récepteurs (décodeur de canal, ..., etc.). La Figure montre aussi que la partie réceptrice d'antennes intelligentes se compose de quatre unités. En plus des antennes elles-mêmes ; elle contient une unité radio, unité de formation de faisceau et une unité de traitement de signal. L'unité radio se compose des chaînes de conversion pour les liaisons descendantes et des convertisseurs complexes analogique/numérique (A/N). Il doit y avoir M chaînes de conversion, une pour chaque élément. L'unité de traitement de signal est basée sur le signal reçu, elle calcule le vecteur de pondérations complexes : w_1, \dots, w_n avec lesquels le signal reçu de chacun des éléments sera multiplier. Ce vecteur de pondérations génère le diagramme de rayonnement d'antennes dans la direction de la liaison montante. Le vecteur de pondérations peut être optimisé par deux critères : le maximum du signal reçu de l'utilisateur désiré (antennes à faisceaux commuté) ou le maximum de SINR par la suppression du signal des sources d'interférences (antennes adaptatives). [35]

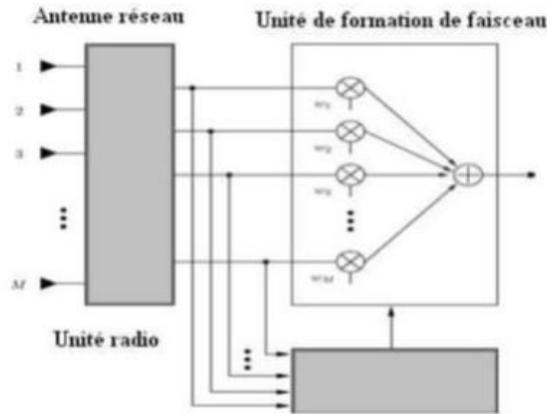


figure 3-2 Antenne intelligente réceptrice

3.5 Type des antennes intelligentes :

Fondamentalement, il y a deux principaux types des antennes intelligentes : Une antenne intelligente à faisceau commutable : ce type utilise des circuits analogiques (commutateurs) pour modifier la phase et l'amplitude des excitations des éléments du réseau. Il est le plus simple du point de vue du traitement de signal et de la complexité du circuit. Une antenne intelligente à réseau adaptatif : ce type est numérique dans sa grande partie. Il sert à ajuster en temps réel son diagramme de rayonnement en fonction du changement spatial du rapport signal à bruit, ou le rapport signal à interférences. Avec la présence d'une interférence de faible niveau, les deux types d'antennes intelligentes fournissent des gains significatifs par rapport aux systèmes constitués par des antennes conventionnelles. Cependant, quand une interférence de niveau élevé est présente, la capacité de la rejeter est beaucoup plus garantie par l'antenne à réseau adaptatif que par l'antenne à faisceau commutable ou l'antenne conventionnelle [36] Le terme d'antenne intelligente ne concerne plus seulement les antennes à faisceaux commutables et les antennes adaptatives, cette définition s'est généralisée et englobe les techniques multi-antennes appelées aussi diversité d'antenne Dans ces techniques, le critère de classification est basé sur le nombre des entrées (les antennes émettrices) et des sorties (les antennes réceptrices) qui est employé par le système. Selon cette classification les trois catégories possibles sont :

- SIMO (Single Input – Multiple Output) ; une seule antenne est utilisée à l'émission et des antennes multiples sont utilisées à la réception.

- MISO (Multiple Input – Single Output) ; des antennes multiples sont utilisées par l'émetteur et une seule antenne est utilisée par le récepteur.

- MIMO (Multiple Input – Multiple Output) ; des antennes multiples sont utilisées à l'émission et aussi à la réception.

3.6 Comparaison entre les deux types de l'antenne intelligente

Les antennes adaptatives peuvent être définies comme des antennes réseaux avec traitement du signal pouvant modifier leur diagramme de rayonnement de façon dynamique pour s'adapter au bruit, au brouillage et à la propagation par trajets multiples. Elles sont utilisées pour améliorer le rapport signal/bruit brouillage (SINR) à la réception et peuvent également être considérées comme des antennes à faisceaux modelés pour l'émission. De même, les systèmes à commutation de faisceaux utilisent un certain nombre de faisceaux fixes sur le site de l'antenne. Le récepteur sélectionne le faisceau qui renforce le plus l'intensité du signal et limite le plus les brouillages. Les systèmes à commutation de faisceaux ne peuvent pas être aussi performants que les systèmes adaptatifs mais ils sont beaucoup moins complexes et beaucoup plus faciles à moderniser. Enfin, les antennes adaptatives sont définies comme des systèmes qui peuvent associer des technologies d'antennes adaptatives et des technologies de faisceaux commutés. [37] Il est nécessaire de noter que plusieurs références existant dans la littérature considèrent souvent que l'antenne intelligente est une antenne adaptative, sachant qu'en réalité cette dernière n'est plus qu'un seul type de l'antenne intelligente. Cela signifie que l'antenne adaptative est plus intelligente que l'antenne à faisceau commutable.

3.6.1 Antennes adaptatives

Les antennes adaptatives font l'objet d'un effort de recherche important, Primitivement développées, elles ont depuis environ deux décennies faites leurs apparitions dans le domaine des radiocommunications fixes et mobiles. Un réseau d'antennes adaptatives est un ensemble d'éléments d'antenne qui s'adapte constamment à l'environnement radio au fur et à mesure de ses changements. Chaque antenne de réseau est associée à un coefficient de pondérations qui est mis à jour de manière adaptative, de sorte que son gain dans une direction particulière soit maximisé, tandis que dans une direction correspondant aux signaux interférences est réduit au minimum ; Afin d'améliorer le SNR du signal désiré. Ce procédé est également connu comme « adaptatif beamforming ».

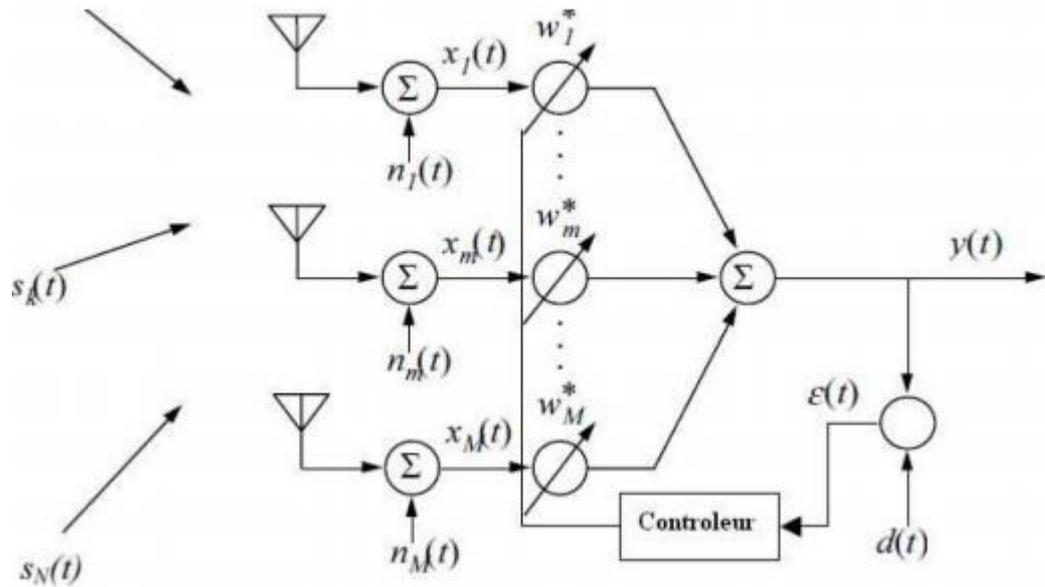


figure 3-3 Réseau d'antenne adaptative [38]

3.7 Architecture et fonctionnement de l'antenne intelligente

Les antennes intelligentes sont le fruit de l'union entre les réseaux d'antennes et le traitement du signal en vue de former d'une façon désirable, orienter, et contrôler un diagramme de rayonnement. Cela revient fondamentalement à deux fonctions qui sont ; la détection de la position angulaire des sources et la formation du faisceau de l'antenne dans les directions privilégiées. Le chapitre 3 et le chapitre 4 de cette thèse seront consacrés à donner plus de détail sur ces deux fonctions en étudiant principalement les algorithmes spéciaux pour chacune d'elles. L'architecture de l'antenne intelligente est composée fondamentalement de trois parties :

1. Un réseau d'antennes ; un ensemble d'antennes disposées régulièrement selon une configuration linéaire, circulaire, ou planaire pour capter de différentes directions les signaux entrant et déterminer leur nombre.
2. Un estimateur de directions d'arrivées ; ce bloc estime et classe les angles ou bien les directions d'arrivées en identifiant les signaux venant originalement du bon utilisateur et ceux venant des interférents.
3. Un bloc formateur de voie (beamformer) ; ce bloc forme le diagramme de rayonnement de l'antenne intelligente en orientant son lobe principal vers la direction du bon utilisateur, et au même temps minimisant l'influence des signaux d'interférences et de bruit. La figure4 montre les blocs fonctionnels de base d'une antenne intelligente. [39]

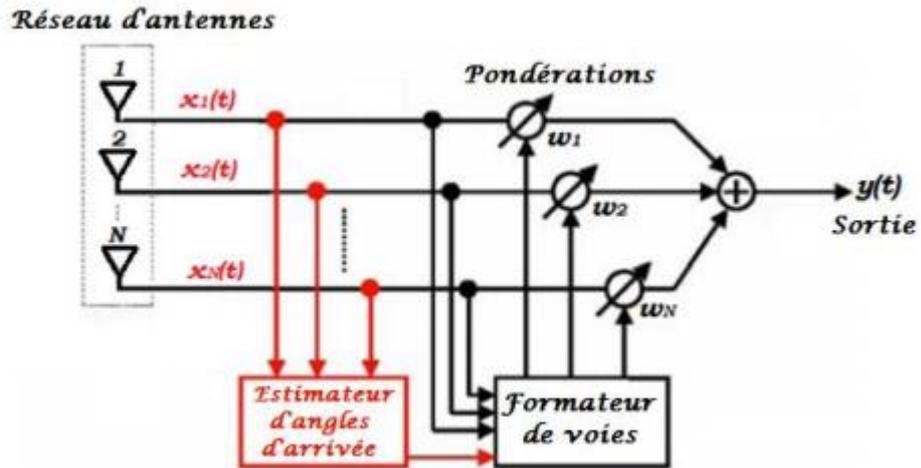


figure 3-4 Schéma de blocs fonctionnels d'une antenne intelligente

3.7.1 Système à commutation du faisceau

Ce type d'antenne intelligente est nommé faisceau commuté, réseau à faisceau commutable ou encore système à commutation du faisceau : Technologie des antennes intelligentes Ce système basé sur les techniques fixes de formation de faisceaux est considéré comme une extension de la méthode de sectorisation cellulaire actuelle dans laquelle un site de cellules comprend par exemples trois macro-secteurs de 120 degrés. Ces derniers sont divisés par le système en plusieurs micro-secteurs chacun contenant un diagramme de rayonnement prédéterminé. Lorsque l'utilisateur entre dans la zone de couverture du système, l'antenne détermine dans quel secteur se situe l'utilisateur et commute sur le faisceau correspondant. En effet, l'antenne forme multiples faisceaux fixes ayant une sensibilité maximale dans des directions particulières. Quand l'antenne détecte la puissance des signaux, elle sélectionne le micro- secteur contenant le signal le plus puissant. Pendant un déplacement du l'utilisateur désiré, le système écoute la puissance de son signal et la commute continuellement vers d'autres micro- secteurs fixes quand c'est nécessaire en gardant le niveau maximal du signal, montre les composants d'un système à faisceau commutable et les lobes de son diagramme de rayonnement.[40]

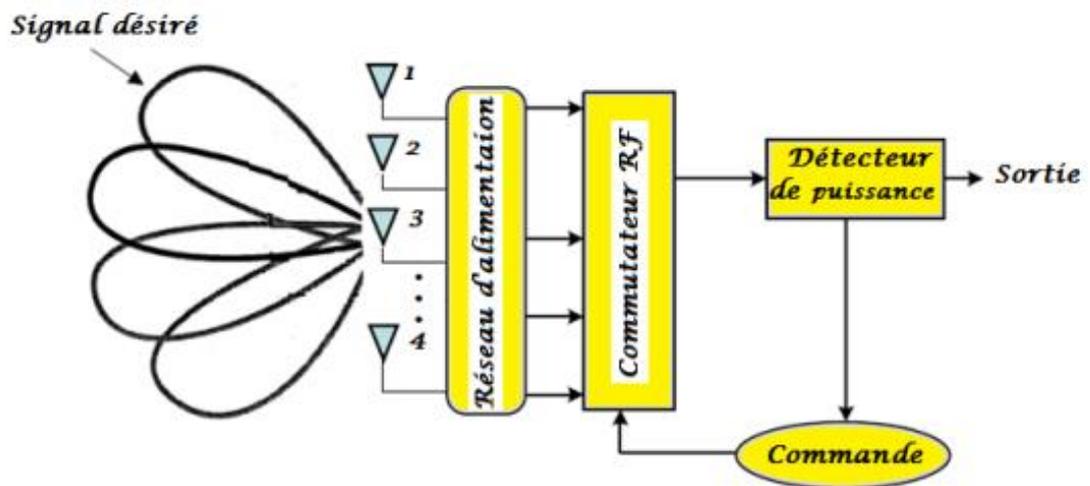


figure 3-5 composants d'un système à faisceau commutable

3.7.2 Système à commutation du faisceau

Les antennes à faisceaux commutés sont des antennes directrices déployées aux stations de base d'une cellule. Elles ont uniquement une fonction de commutation de base entre les antennes directionnelles séparées ou des faisceaux prédéfinis d'un réseau. Ce système donne les meilleures performances, habituellement en termes de puissance reçue. Les sorties des divers éléments sont prélevées périodiquement pour établir ce qui a le meilleur faisceau de réception. En raison de la directivité plus élevée comparée à une antenne conventionnelle, un certain gain est réalisé. [41]

3.7.3 Filtrage adaptatif

Les filtres tels que nous les avons vus jusqu'à présent sont en général utilisés dans des applications où on connaît la bande de fréquence utile ainsi que la fréquence principale. Ces filtres servent à améliorer le rapport signal sur bruit sous l'hypothèse où la bande de fréquence du bruit est supérieure à celle du signal. Dans ce cas, un filtre passe-bande centré sur la fréquence principale du signal permettra d'extraire le signal. Les filtres de Wiener développés à partir de concepts temporels et non fréquentiels sont conçus pour minimiser l'erreur quadratique moyenne entre leur sortie et une sortie désirée. Ils sont dits optimum au sens du critère de l'erreur quadratique moyenne et nous verrons que dans ce cas les coefficients du filtres sont liés à la fonction d'auto corrélation du signal d'entrée et à l'inter corrélation entre les signaux d'entrée et de sortie désirée.[42] Quand les fonctions d'auto et d'inter corrélation ne sont pas connues (cas le plus courant), alors on va approcher le filtre optimal de Wiener en utilisant une boucle de retour et un

algorithme de minimisation : c'est ce que l'on appelle le filtrage adaptatif. Dans ce cas, on remplacera la connaissance des fonctions de corrélation par une phase d'apprentissage permettant de modifier itérativement la réponse impulsionnelle du filtre.

3.7.4 Filtre de Wiener

Les filtres de Wiener développés à partir de concepts temporels et non fréquentiels sont conçus pour minimiser l'erreur quadratique moyenne entre leur sortie et une sortie désirée. Ils sont dits optimums au sens du critère de l'erreur quadratique moyenne et nous verrons que dans ce cas les coefficients des filtres sont liés à la fonction d'auto corrélation du signal d'entrée et à l'inter corrélation entre les signaux d'entrée et de sortie désirée [43]

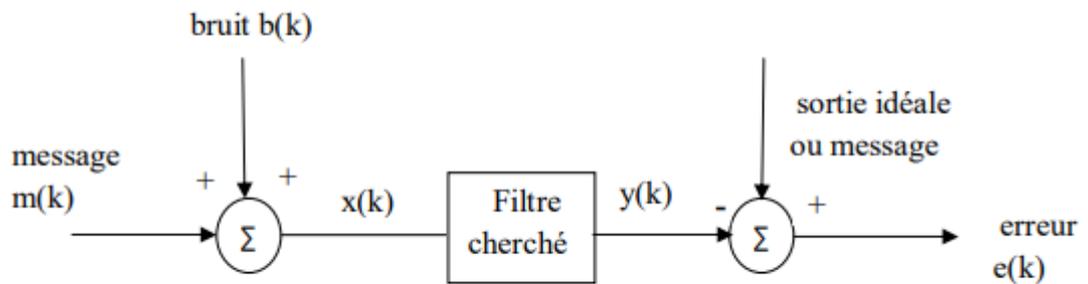


figure 3-6 Filtre de Wiener

3.7.5 Filtrage adaptatif au sens de Wiener

Principe général Nous allons introduire le principe du filtrage adaptatif en étudiant l'un des premiers systèmes conçus dans ce sens ; le filtrage adaptatif au sens de Wiener. Le principe de synthèse du filtre est supposé ici que le signal qu'on souhaite estimer, $d(k)$, est corrélé à un second signal $x(k)$. Le problème peut être posé de manière générale selon le schéma de la figure ci-dessous :

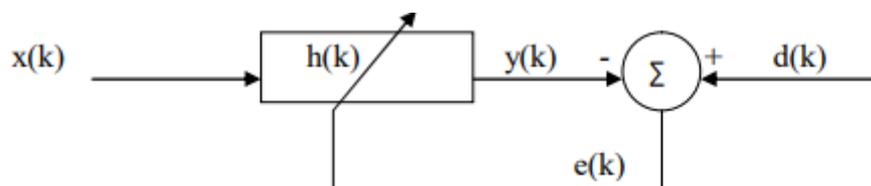


figure 3-7 Schéma de principe du filtrage adaptatif au sens de Wiener [44]

3.8 Critères d'évaluation de performance d'un filtre adaptatif :

Taux de convergence : Dans un système adaptatif, une convergence rapide vers la solution optimale est un critère désiré. Cependant, une convergence ne peut être considéré seul mais en conjonction avec d'autre critère. Par conséquent, il faut retenir que la convergence rapide : ne veut pas forcément dire meilleure solution. Est recommandé pour des applications à haute fréquence (radiocommunications mobiles, téléphone portable (GSM), télévision numérique à haute définition ou HDTV et Asymptotic Digital Subscriber line ou ADSL). Est un critère important pour évaluer la performance d'un algorithme.

- Erreur quadratique moyenne minimale (Minimum Mean Square Error, MMSE) : Indique dans quelle mesure le système est apte à exécuter sa tâche de filtrage. Une MMSE faible indique que le système adaptatif a « *précisément* » convergé vers la solution désirée. Les paramètres qui peuvent affecter ce critère sont, mais ne se limitent pas à : l'ordre du système adaptatif, l'erreur de quantification et le bruit de mesure. L'erreur quadratique moyenne excédante (excédante MSE) est définie comme étant la différence entre l'erreur quadratique moyenne (MSE) réelle à la sortie du filtre adaptatif et ce qu'elle devrait être si les coefficients du filtre adaptatif étaient maintenus à leurs valeurs optimales.
- L'erreur d'ajustement (misadjustment) dépend essentiellement de : Bruit du gradient, La sensibilité des coefficients à l'effet de quantification (distorsion), L'ordre du filtre adaptatif, L'amplitude (grandeur) du bruit de la mesure.
- Précision de l'estimation des paramètres du filtre : La précision de l'estimation des coefficients du filtre est plutôt importante dans la mesure où elle permet des conditions acceptables de l'erreur d'ajustement. [45]

3.8.1 Applications du filtrage adaptatif :

Le filtrage adaptatif est un outil puissant en traitement du signal, communications numériques, et contrôle automatique. Les applications sont diverses mais présentent les caractéristiques suivantes : on dispose d'une entrée $x(n)$ ainsi que de la réponse désirée (référence) $d(n)$ et l'erreur $e(n)$, qui est la différence entre $d(n)$ et la sortie du filtre $y(n)$, sert à contrôler (adapter) les valeurs des coefficients du filtre. Ce qui différencie essentiellement les applications provient de la façon de définir la réponse désirée $d(n)$.

On peut distinguer quatre grandes classes d'applications :

- l'identification de systèmes,
- la prédiction,
- la modélisation inverse,
- l'annulation d'interférences [46]

3.9 Conclusion :

Ce chapitre décrit brièvement les principaux concepts liés à notre étude. Une présentation du concept des antennes intelligentes : structure, types, avantages et une mise au point sur les différentes méthodes actuelles de traitement d'antennes intelligentes. Enfin, nous avons décrit les différentes techniques. Le filtrage adaptatif est une part importante du traitement des signaux aléatoires. L'évolution des processeurs de traitement du signal a rendu son réalisation aisée, et son permet d'agir sur des signaux rapides, à large spectre. Son principal intérêt consiste à éliminer un bruit dont les caractéristiques évoluent dans le temps par des déférentes algorithmique.



Chapitre 4 : Application

4 Application

4.1 Introduction

Les interfaces graphiques permettent de contrôler des applications logicielles avec des commandes de type pointer-cliquer. Avec une interface de ce type, l'utilisateur n'a pas besoin de connaître un langage ni de saisir des commandes pour se servir de l'application.

Une interface graphique comprend des menus, des boutons, des "ascenseurs", des cases à cocher, des listes de choix, des zones de texte.

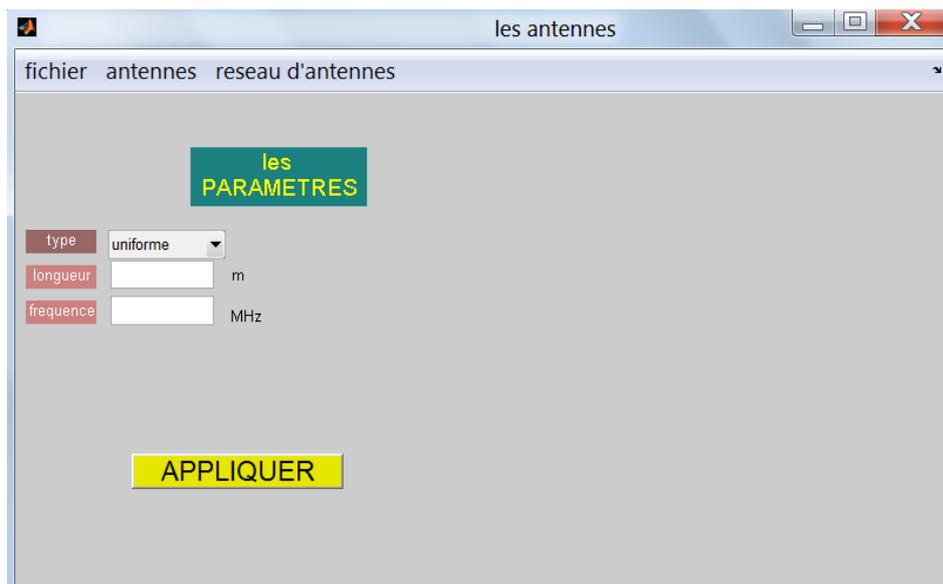
Cette simulation a été faite en utilisant l'interface graphique qui nous permettons d'effectuer des tâches interactives sous MATLAB.

Notre travail s'articule sur deux parties : le diagramme de rayonnements et les réseaux d'antenne.

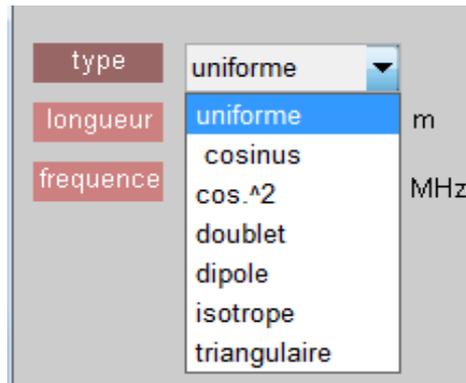
4.2 Première partie :(Diagrammes de rayonnement)

On a tracé ce diagramme en fonction de différents paramètres d'antenne comme le type d'antenne, la longueur d'antenne et la fréquence de travail sachant que notre tracé a été conçu en fonction de l'angle d'élevation θ à 2 dimensions.

- L'interface s'affiche comme suit :



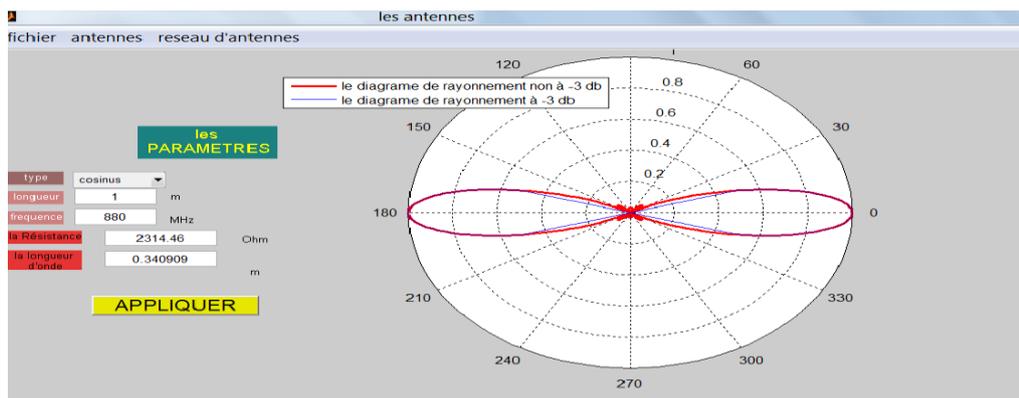
- La rubrique type contient les types d'antennes :



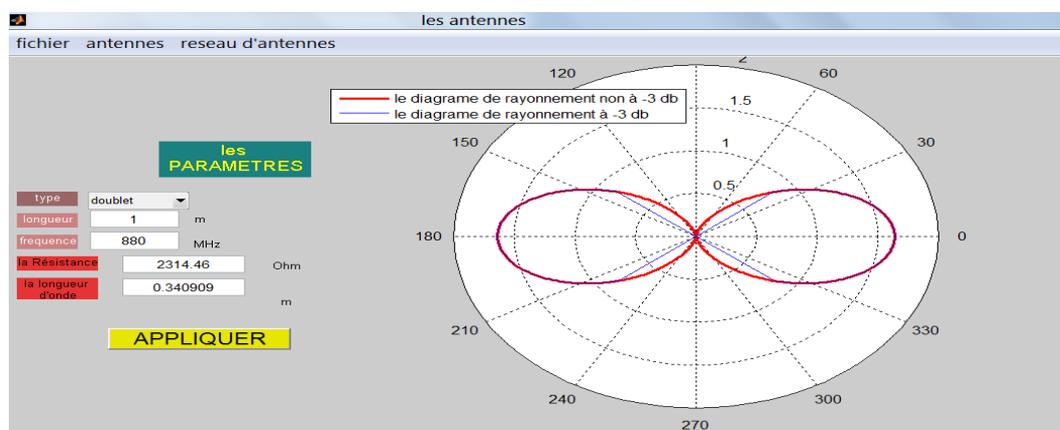
Pour tracer le diagramme de rayonnement pour différent type d'antenne on va utiliser la longueur =1 m et la fréquence 880 Mhz

La figure suivante montre la distribution de champs de défférente type d'antennes en fonction de l et f.

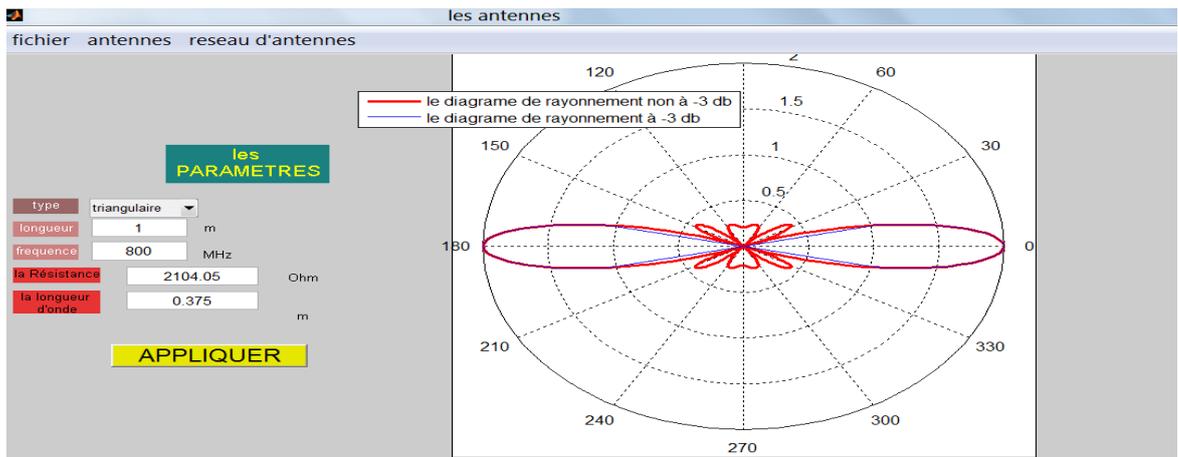
➤ Antennes cosinus



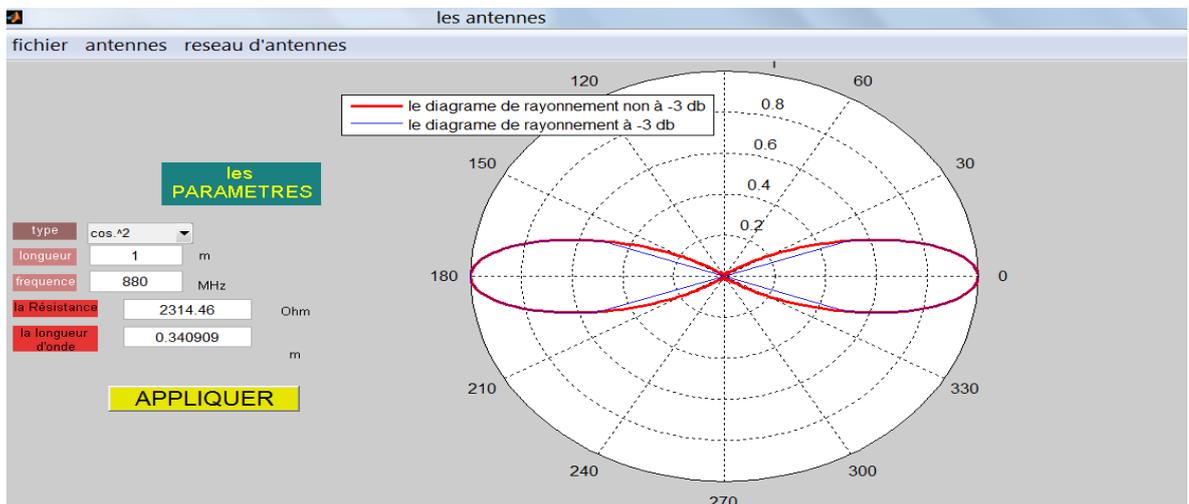
➤ Antenne doublet



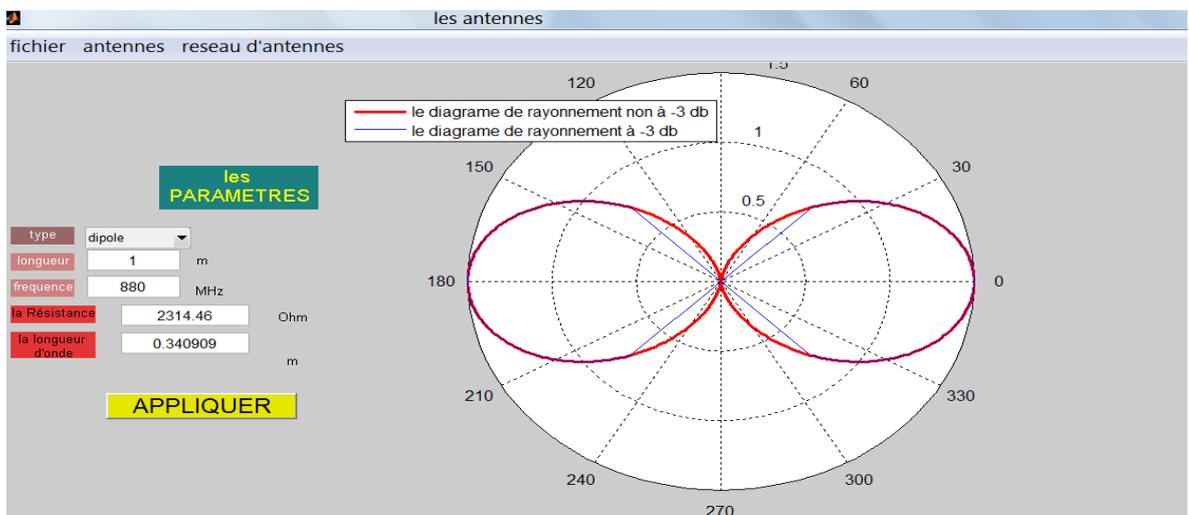
➤ Antenne triangulaire



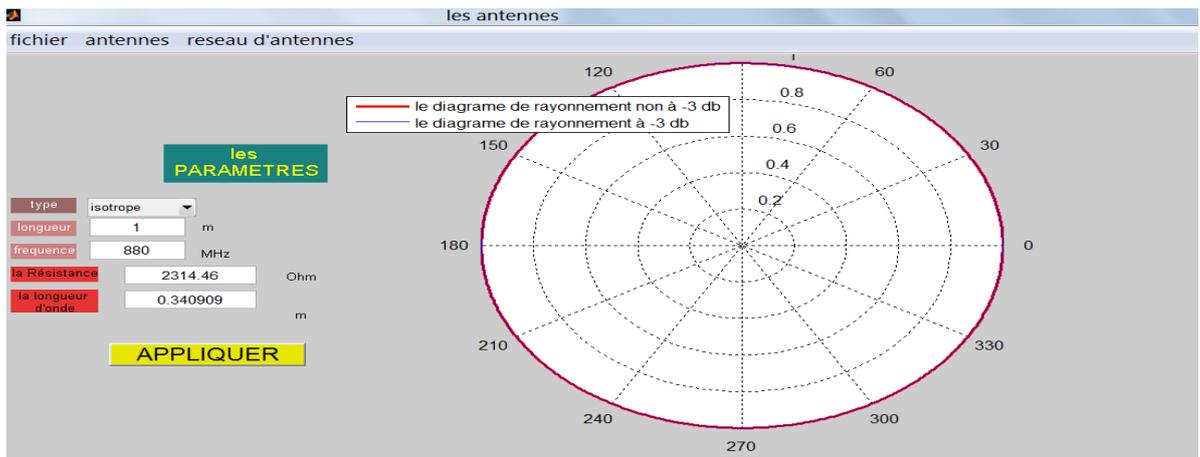
➤ Antenne cos2



➤ Antenne Dipôle



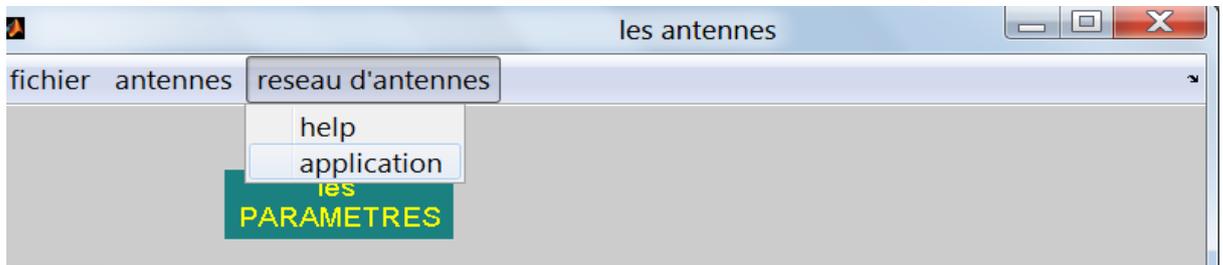
➤ Antenne isotrope



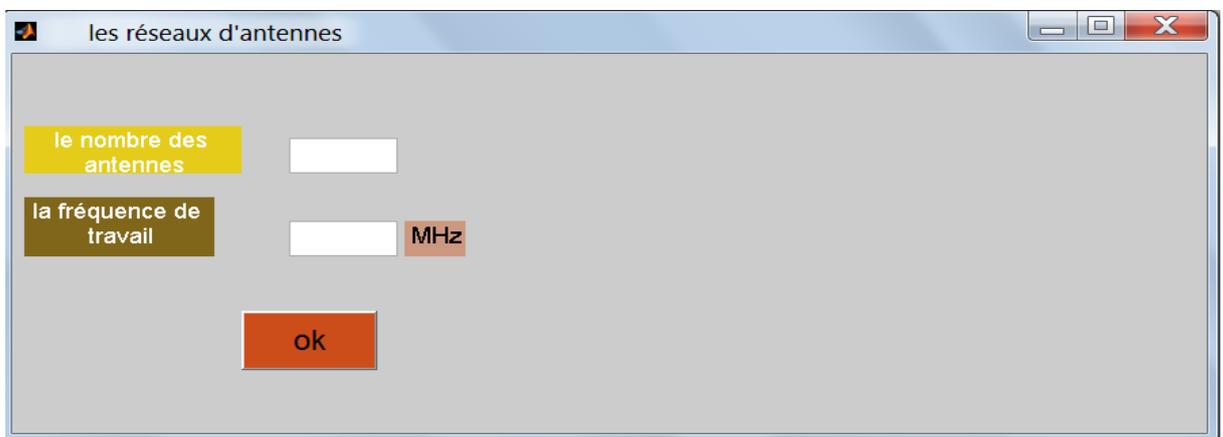
Les diagrammes montrés sur les figures comportent plusieurs pics appelés lobes. L'énergie émise dans un de ces lobes est très supérieure à celle dans les autres directions. Il s'agit du lobe principal. Les autres sont appelés les lobes secondaires ou lobes mineurs. Certaines antennes ont plusieurs lobes principaux, par exemple les antennes pour la télévision qui sont conçues pour émettre vers les zones plus peuplées d'une région. D'autres antennes n'ont qu'un seul lobe principal, c'est le cas des antennes radar qui sont hautement directionnelles. Les lobes secondaires sont des pics d'émission dans des directions différentes de l'axe du faisceau principal. Habituellement, ceux-ci sont indésirables puisqu'ils utilisent une partie de l'énergie émise en pure perte. Il est impossible de les éliminer complètement mais ils peuvent être minimisés. L'intensité de ces lobes secondaires est une des caractéristiques importantes d'une antenne et elle est exprimée en décibels. Le lobe arrière est particulièrement important car il indique l'énergie transmise ou reçue de la direction opposée à l'axe du faisceau principal.

4.3 Deuxième Partie :(Réseaux d'Antennes)

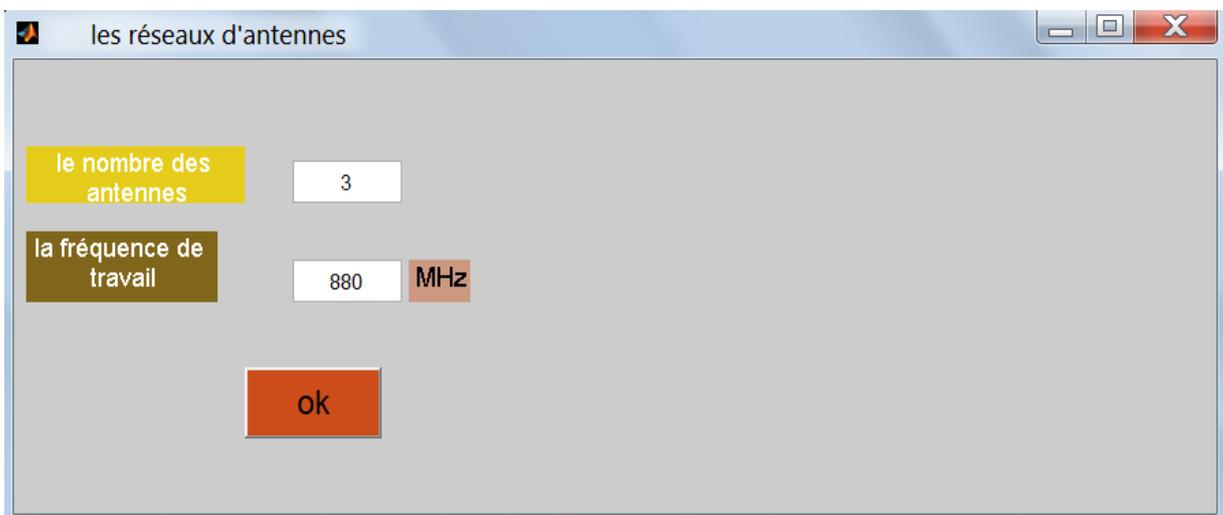
Pour exécuter de cette option on clique sur la rubrique réseaux d'antenne après application



➤ Notre interface s'affiche comme suit :



L'application nous donne une interface pour faire entrer les paramètres de réseau d'antennes (la fréquence de travail, le nombre d'antennes) , on va prendre 3 antennes avec 880 MHz.



En cliquant sur le bouton OK une interface sera affichée pour remplir paramètres suivant :

- Les positions des antennes sur les trois axes x, y et z.
- Les déphasages d'alimentation entre les antennes.
- La longueur de chaque antenne.
- Le type de chaque antenne.

The screenshot shows the 'les réseaux d'antennes' window with the following parameters for three antennas:

| | l'anten 1 | l'anten 2 | l'anten 3 |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|
| longueur (m) | | | |
| dephasage (degr) | | | |
| position sur l'axe x (m) | | | |
| position sur l'axe y (m) | | | |
| position sur l'axe z (m) | | | |
| type | unifo... | unifo... | unifo... |
| la longueur d'onde | m | | |

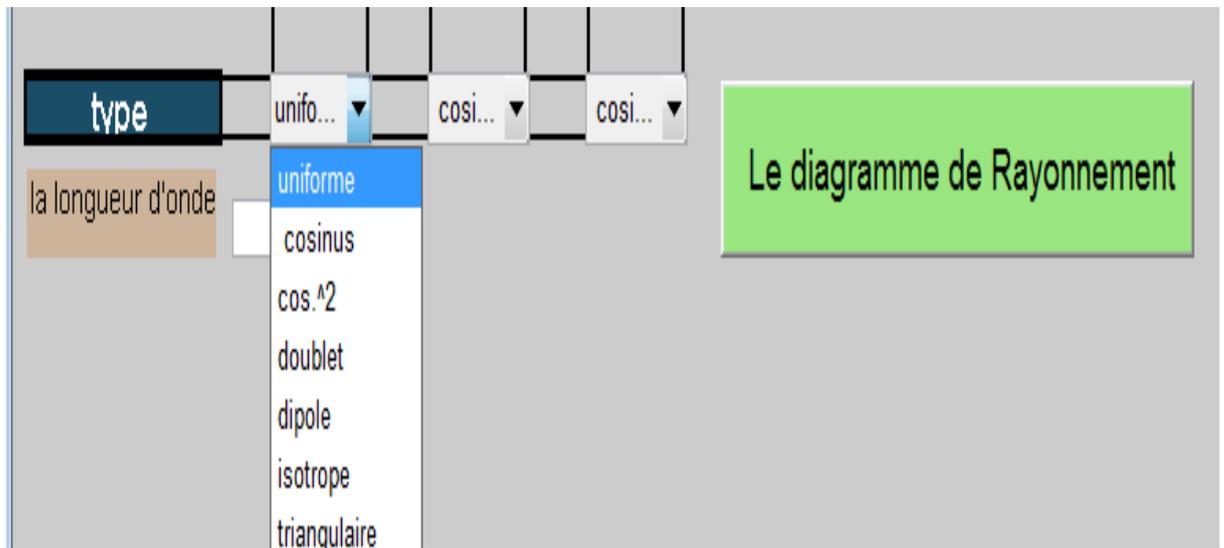
A green button labeled 'Le diagramme de Rayonnement' is visible on the right side of the window.

The screenshot shows the 'les réseaux d'antennes' window with the following parameters for three antennas:

| | l'anten 1 | l'anten 2 | l'anten 3 |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|
| longueur (m) | 1 | 2 | 5 |
| dephasage (degr) | 45 | 90 | 180 |
| position sur l'axe x (m) | 20 | 25 | 30 |
| position sur l'axe y (m) | 40 | 45 | 50 |
| position sur l'axe z (m) | 60 | 65 | 70 |
| type | unifo... | unifo... | unifo... |
| la longueur d'onde | 0.6 m | | |

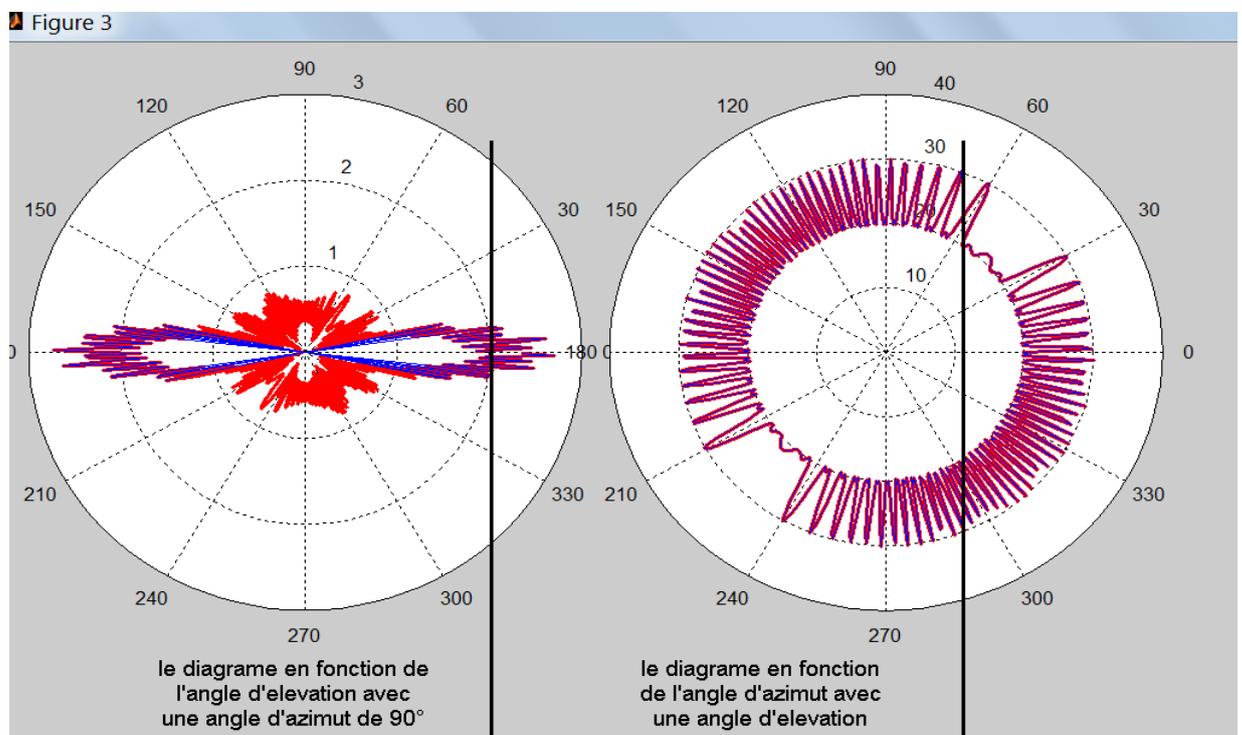
A green button labeled 'Le diagramme de Rayonnement' is visible on the right side of the window.

On peut tracer le diagramme de rayonnement pour différent type d antennes comme nous illustre l'interface suivante

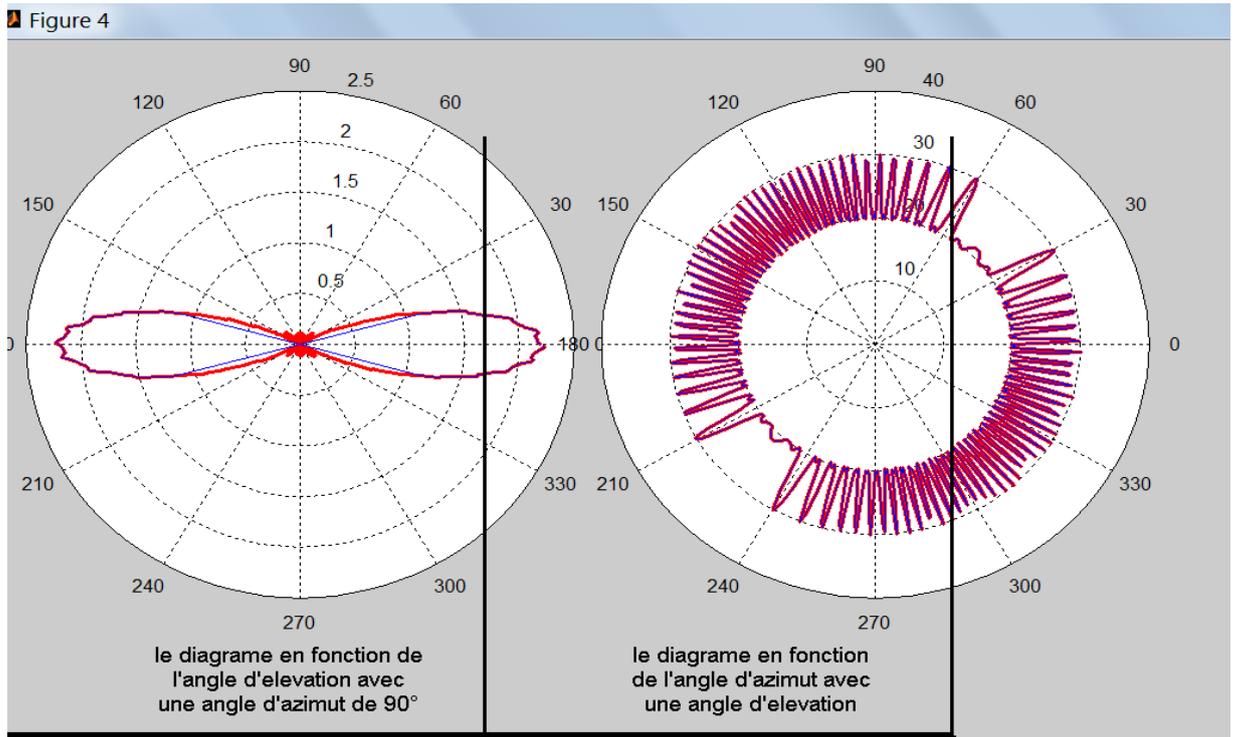


Pour visualiser le diagramme de rayonnement il suffit de cliquer sur le bouton 'le diagramme en couleur verte

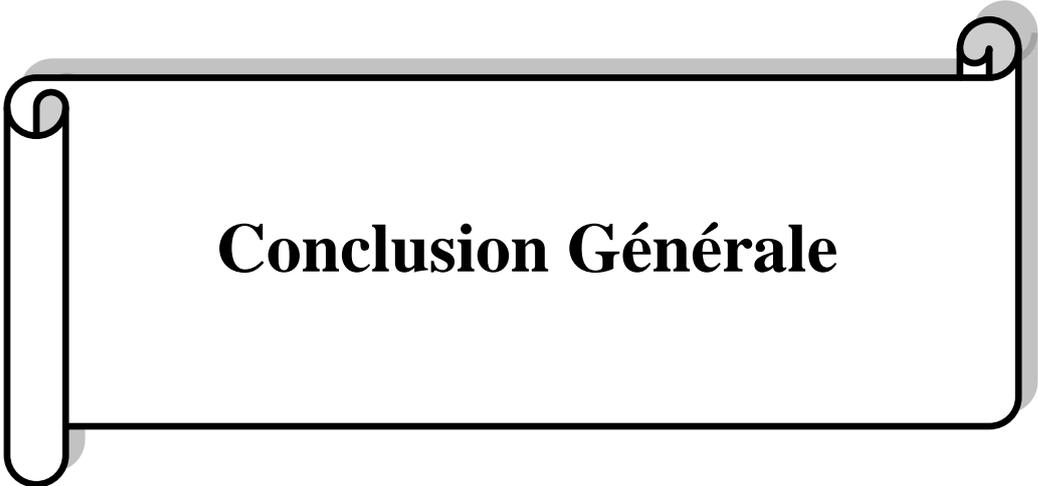
➤ **Antennes uniformes :**



➤ **Antennes cos :**



Le diagramme de rayonnement de l'antenne est une représentation graphique en zone éloignée du champ de radiation de l'antenne. Plus précisément c'est la représentation graphique de la puissance émise par une antenne par unité d'angle solide ou Intensité de la radiation U exprimé en watts/unité d'angle solide.



Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Le travail rapporté dans ce document a concerné l'étude de l'utilisation des antennes intelligentes dans les systèmes. C'est pour cela que nous nous sommes intéressés à la partie composante et responsable à la formation de faisceaux dans les systèmes à antenne intelligente. L'intégration de la technologie d'antennes intelligentes dans les nouveaux systèmes de communication permet d'améliorer d'une façon optimale le diagramme de rayonnement dans toutes les directions de l'espace. L'économie de puissance rayonnée dans certaine direction autorise des communications entre des utilisateurs distants et qui ne seraient pas joignables dans le cas, par exemple, d'une antenne isotrope rayonnant la même puissance totale donnée. L'annulation du rayonnement électromagnétique dans certaines directions permet d'éliminer l'effet des signaux et des émissions parasites qui perturberaient les autres communications ou diminueraient le débit de transmission de données. Enfin, le fait d'être capable de ne rayonner que dans certaines directions évite d'interagir avec d'autres systèmes ou d'endommager certains équipements.

Nous avons ensuite donné au la définition, les avantages, la structure, et le principe de fonctionnement de l'antenne intelligente. Nous avons également détaillé les types des systèmes à antenne intelligente en faisant une comparaison entre eux.

L'objectif principal de notre thèse était de trouver la conception d'antennes intelligentes dédiées à l'onde de radio. Les options de reconfiguration possibles concernent la fréquence, la polarisation et le diagramme de rayonnement, et toute combinaison de ces trois facteurs. Les études présentées portent sur l'ensemble complet, de la conception d'antennes à leur commande numérique en passant par des méthodes d'optimisation.

Dans le dernier chapitre, nous avons effectué une étude sur les diagrammes de rayonnement de l'antenne est une représentation graphique en zone éloignée du champ de radiation de l'antenne. Plus précisément c'est la représentation graphique de la puissance émise par une antenne par unité d'angle solide ou Intensité de la radiation U exprimé en watts/unité d'angle solide.

Références bibliographique

- [0] Antenne patch pour le 23cm Par Yves OESCH / HB9DTX, janvier/avril 2010
- [1] jarousse « cours en ligne électromagnétisme » Thèse doctorat, université Joseph Fourier, Grenoble novembre 2015.
- [2] Alexandre « cours les antenne » Thèse doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon octobre 2011
- [3] Evgeni Popov « Electrostatique et Magnétostatique : Notes du cours » Thèse doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes décembre 2009
- [4] CHABOUNI MOHAMED YACINE « Mémoire de Fin d'Etudes Simulation d'antennes » Projet de fin d'études, université Abou-Bekr Belkaid, juin 2017
- [5] R. de OLIVEIRA « Antennes Bases théoriques » Thèse doctorat, université de Rennes I, juillet 2014
- [6] Raphaël GILLARD « PROPAGATION des ONDES ELECTROMAGNETIQUES » Final report, Ecole Polytechnique Fédérale (Lausanne), janvier 2005
- [7] PEIP 2 Polytech « Electromagnétisme » Thèse doctorat, université de Paris XI Orsay 7 septembre 2020
- [8] paris universitaire « Propriétés électriques » Serbian journal of electrical engineering, vol (Année 2008/2009
- [9] « Les ondes électromagnétiques dans le domaine de la communication » Thèse doctorat, université de Rennes I, 31 mai 2018
- [10] habitant Liban « onde mécanique longitudinale » Electronics letters, vol. 35, pp. 6 novembre 2017
- [11] khan académie « ondes électromagnétiques, spectre électromagnétique et photons » Thèse doctorat,
Ecole National Supérieur des Télécommunications, Radiocommunications numériques, Tome 1. DUNO, Paris 2002 22 août 2012
- [12] université de Lille « le propage du son »
Cours Electronique Pratique Des Antennes Tv Fm Reception Emission. 11 décembre 2011
- [13] Mr BENMESSAOUD MOHAMMED TARIK « PROPAGATION D'ONDES ET ANTENNES »

Cours Electronique Pratique Des Antennes Tv Fm Reception Emission. 2017-2018

- [14] BOURAI AMAR « les réseaux sans fils mémoire » Miami, Florida, USA, Digest Book, IEEE Novembre 2011
- [15] MOHAMMED TARIK « PROPAGATION D'ONDES ET ANTENNES » décembre 2016
- [16] monsieur jacques debrand « les antennes » 2011
- [17] Marc Van Droogenbroeck « Antennes simples » 2013
- [18] « Les ondes électromagnétiques dans le domaine de la communication » 31 mai 2018
- [19] Dieudonnesoro « Principe de fonctionnement des antennes » 6 Mars 2017
- [19] Zaoui Bachir « Modélisation d'une antenne » 02/06/2015
- [20] Ahmed Benomar « Antennes à Résonateurs Diélectriques » 31oct 2014
- [21] Fersiti Samira « Antennes à Plan de Masse Partielle de type Hilbert pour un fonctionnement Ultra Large Bande » 26 Juin 2018
- [22] ben abadji selma « conception et modélisation des antenne » 2011°2012
- [23] Maurice Bellanger « les Antennes Théorie, conception et applications » 2015
- [24] Christian Wolff « Radartutorial » 22 novembre 2011
- [25] Emmanuel Dreina « Conception, optimisation et intégration RF d'un système d'antennes » 2010.
- [26] Mr. MOULAY Mohammed « Mesure de la Densité de Puissance Rayonnée RF dans le Milieu Ambient » 2012
- [27] alexander boyer « role des antenne émetrices » 2011
- [28] insa lyon « réversibilité » 2014
- [29] institut scientifique de service public « CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES ET TELEPHONIE MOBILE » oct2016
- [30] Lallam chafika « antenne microruban compacte pour une utilisation dans le mobile »2012
- [31] GUENAD Boumediene « Synthèse de réseaux d'antennes à réflecteur à faisceaux multiples pour systèmes de télécommunication spatiale » 2006
- [32] AOUNALLAH NACEUR « Utilisation des antennes intelligentes dans les systèmes de communications sans fil » 2014-2015
- [32] Bamba Sissokho « Gestion des interférences dans les systèmes MIMO massifs » oct 2011
- [33] Détection Multi-Utilisateurs par réseau d'antennes appliquée à un signal MCCDMA 2008
- [34] Bouabda Ilah Wissem Achraf « Etude des systèmes multi antennaires à base des antennes intelligentes » 2012

- [35] Bousselal mohamed « etude dun resaux d antennes linéaire uniforme pour les satellites de communication » 2008
- [36] Moctar MOUHAMADOU « Contribution au développement et à l'optimisation d'un démonstrateur d'antennes adaptatives » 12 sept 2007
- [37] AOUNALLAH NACEUR « Utilisation des antennes intelligentes dans les systèmes de communications sans fil » 2009
- [38] Array Comm. [18-19 octobre 2001] Antennes adaptatives et évolution des systèmes IMT-2000 et des systèmes complémentaires. 3GPP Future Evolution Workshop, Helsinki, Finlande
- [39] N. Aounallah, et M. Bouziani, "Analyse de l'antenne par son champ électromagnétique rayonné ", CNCEM'09, Tiaret – Algérie, 22-24 novembre 2009.
- [40] Godara L.C, Smart Antennas. CRC Press, Boca Raton, USA, 2004.
- [41] Gross F.B, Smart Antennas for Wireless Communications with MATLAB, McGraw-Hill, New York , 2005.
- [42] G. J. FOSCHINI, « On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas ». Wireless Personal Communications, pp.311-315, march 1998.
- [43] V. TAROKH, N. SESHADRI, & A. R. CALDERBANK, « Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction ». IEEE Transactions on Information Theory, vol. 44, n°. 2, pp. 744–765, march 1998
- [44] P.W.WOLNIANSKY, G.J.FOSCHINI, G.D.GOLDEN & R.A.VALENZUELA, «VBLAST:architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel ». URSI
- [45] I. OUACHANI, « Analyse de performance de systèmes de communications sans-fil exploitant, juin2005.

