

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Année : 2018

Faculté : Sciences de l'Ingénierat

Département : Electronique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Intitulé :

Comparaison du tracé du diagramme de rayonnement de l'antenne Dipôle moyennant les logiciels MAGUS et MMANA-GAL

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Télécommunication

Spécialité: Réseaux et Télécommunications.

Par :

M^r. MEFTAH Azzeddine

Devant Le JURY

Président: KADDECHE Mohamed	Grade: Professeur	UBM Annaba
Directeur de mémoire: TAIBI Mahmoud	Grade: Professeur	UBM Annaba
Examineur: SAOUCHI Kaddour	Grade: Professeur	UBM Annaba
Examineur: BRIK Fatima	Grade: MCB	UBM Annaba

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes parents, je vous aime très fort.

À mon Père qui sacrifié leur temps pour moi, j'espère que Dieu entré dans son paradis et ma très chère Mère pour leur soutien apporté à cette étude et au sourire d'ange et encourageant et surtout ma Femme et que Dieu vous procure une longue vie.

À toute ma famille MEFTAH grand et petit.

À mes Frères, mes Sœurs, mes Belles Sœurs, mes Beaux-Frères et leurs Enfants.

Et spécialement à mon fils Mohammed Iyes et ma fille Iline Nihel, que Dieu vous garde, vous procure une longue vie.

À tous mes Amis et ceux que je connaisse de prés et de loin.

Ce travail est dédié aussi à tous les universitaires Algériens pour les différentes étapes de leurs études.

À tous ceux qui m'aiment.

Remerciement

Dieu, merci voilà que nous efforts, tout au long de ces années d'études furent récompensées par ce modeste travail grâce à l'aide de Dieu.

Toute notre gratitude à M^r : TAIBI. Mahmoud notre encadreur et conseiller pour son entière disponibilité et ses précieux conseils apportés à notre étude et nous lui souhaitons des journées radieuses durant toute sa vie.

Nous remercions notre enseignant: M^r : KADDECHE. Mohamed. Je le remercie de m'avoir encouragé et conseillé.

Et nous remercions vivement l'ensemble des Enseignants et le personnel du Département Electronique pour leur soutien et leur gentillesse. A tout ce beau monde, l'expression de nos profondes reconnaissances.

Nous remercions tous ceux que nous ont aidé et encouragé de près ou de loin.

Résumé

Dans la dernière décennie, la demande mondiale pour les communications sans fil a augmenté très rapidement. Aujourd'hui, les systèmes sans fil jouent un rôle très important dans notre vie quotidienne, comme, les communications mobiles, TV, satellite etc. Avec le développement des communications sans fil, la gamme de fréquences des systèmes sans fil a augmenté progressivement à partir de la bande des micro-ondes inférieure (0,3 ~ 30 GHz) à la bande d'ondes millimétriques plus élevé (30 ~ 300 GHz).

Dans un système de communication, l'antenne constitue un maillon important pour établir une liaison entre deux ou plusieurs points, là où les supports de communication habituels (câbles, fibres optiques...) sont difficiles voire impossibles à mettre en œuvre. Elle assure ainsi les fonctions d'émission et de réception des ondes électromagnétiques véhiculant le signal dans l'espace libre. Différents types d'antennes peuvent être utilisés tels que les antennes imprimés et les antennes à résonateurs diélectriques. Dans cette thèse nous sommes intéressés à l'étude et la conception des Antennes à Résonateurs Diélectriques.

Mots clés : Antennes dipôles, Yagi, Logiciel Magus

Abstract

In the last decade, global demand for wireless communications has grown very rapidly. Today, wireless systems play a very important role in our daily lives, such as, mobile communications, TV, satellite etc. With the development of wireless communications, the frequency range of wireless systems has increased gradually from the lower microwave band (0.3 ~ 30 GHz) to the higher millimeter wave band (30 ~ 300 GHz).

In a communication system, the antenna is an important link to establish a connection between two or more points, where the usual communication media (cables, optical fibers ...) are difficult or impossible to implement. It thus provides the functions of transmitting and receiving electromagnetic waves carrying the signal in the free space. Different types of antennas can be used such as printed antennas and dielectric resonator antennas. In this thesis we are interested in the study and design of Dielectric Resonator Antennas.

Keywords : Antenna-dipole-Yagi-Logiciel Magus

الملخص

في العقد الماضي ، نما الطلب العالمي على الاتصالات اللاسلكية بسرعة كبيرة. اليوم ، تلعب الأنظمة اللاسلكية دورًا مهمًا جدًا في حياتنا اليومية ، مثل الاتصالات المحمولة ، والتلفزيون ، والأقمار الصناعية وما إلى ذلك. مع تطور الاتصالات اللاسلكية ، ازداد النطاق الترددي للأنظمة اللاسلكية تدريجياً من نطاق الموجات الصغرى السفلي (0.3 ~ 30 جيجا هرتز) إلى نطاق الموجة الأعلى (30 ~ 300 ميجاهرتز).

في نظام الاتصالات ، يعتبر الهوائي رابطاً مهماً لإقامة اتصال بين نقطتين أو أكثر ، حيث يكون من الصعب أو المستحيل استخدام وسائط الاتصال المعتادة (الكابلات والألياف البصرية ...). وبالتالي يوفر وظائف نقل واستقبال موجات كهرومغناطيسية تحمل الإشارة في الفضاء الحر. يمكن استخدام أنواع مختلفة من الهوائيات مثل الهوائيات المطبوعة والهوائيات الموصلة العازلة. في هذه المذكرة، نحن مهتمون بدراسة وتصميم هوائيات الرنين العازلة.

الكلمات المفتاحية : الهوائي - تنائي القطب - ياغي - برنامج ماجيس

Sommaire

Dédicace	i
Remerciement.....	ii
Résumé	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des Tableaux	vii

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Partie théorique

Chapitre I : Etat de l'art sur les antennes

1. Introduction	02
2. Généralités sur les antennes.....	02
3. Définition.....	03
4. Antenne Yagi.....	04
5. Antenne Parabolique.....	05
6. Antenne Dipôle.....	06
7. Caractéristiques électriques	07
7.1. L'impédance d'entrée	07
7.2. Coefficient de réflexion.....	08
7.3. Rapport d'onde stationnaire (ROS).....	10
8. Caractéristiques de rayonnement.....	10
8.1. Diagramme de rayonnement.....	10
8.2. La directivité.....	12
8.3. Gain	12
8.4. Résistance de rayonnement	13

8.5. Les angles d'ouvertures horizontales et verticales	14
8.6. Polarisation	14
8.7. La bande passante	15
9. Les paramètres fondamentaux des antennes.....	16
9.1. Impédance.....	16
9.2. L'adaptation.....	16
9.3. La bande passante	17
9.4. Le coefficient de qualité	17
9.5. Directivité	18
9.6. Gain	18
9.7. Angle d'ouverture d'une antenne	19
9.8. Efficacité de rayonnement	19
9.9. Diagramme de rayonnement.....	19
9.10. Polarisation	22
10. Conclusion.....	22

Chapitre II : MAGUS et MMANA-GAL

1. Introduction	23
2. Antenne MAGUS	23
3. MMANA-GAL.....	24
4. Conclusion.....	24

Partie pratique

Chapitre III : Simulation

Simulation.....	25
Conclusion générale	31
Références bibliographies	33

Liste des figures

Figure I.1. Typical radio linkl.....	04
Figure I.2. Schéma d'une antenne Yagi	04
Figure I.3 : Représentation schématique d'une antenne parabolique	05
Figure I.4 : Rayonnement d'une antenne parabolique.....	05
Figure I.5. Répartition du courant le long d'un dipôle.....	07
Figure I.6. Antenne en mode émetteur	07
Figure I.7. Circuits équivalents.....	08
Figure I.8. Hypothèse unilatérale	09
Figure I.9. Système de coordonnées sphériques (R, θ, ϕ)	10
Figure I.10. Définition des deux plans principaux (E et H)	11
Figure I.11. Polarisation du champ électromagnétique	14
Figure I.12. Répartitions possibles de l'énergie rayonnée dans l'espace par les antennes.....	18
Figure I.13. Diagramme de rayonnement d'une antenne directive	19
Figure III.1. L'antenne Yagi pour les paramètres « $F_0 = 50$ MHz; $G=9.9$ dBi; $D = 59.96$ mm; $N = 14$ »	27
Figure III.2. L'antenne Yagi pour les paramètres « $F_0 = 1$ GHz; $G = 14$ dBi; $D = 2.998$ mm; $N = 3$ »	28
Figure III.3. L'antenne dipôle pour les paramètres « $F_0 = 50$ MHz; $G = 9$ dBi; $Q = 900$ ».....	29
Figure III.4. L'antenne dipôle pour les paramètres « $F_0 = 1$ GHz; $G = 14$ dBi; $Q = 1350$ ».....	30

Liste des tableaux

Tableau I.1. Les caractéristiques de chacun des types de polarisations	15
--	----

Partie Théorique

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement). Une définition traditionnelle est la suivante : « Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager. Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur » [Combes].

Le transport d'énergie par une onde électromagnétique va donc permettre le transfert d'information sans support physique à travers un canal ou une liaison radioélectrique, à condition que l'onde électromagnétique soit modulée par un signal informatif. Une liaison radioélectrique est un canal de transmission entre un émetteur et un récepteur, dont le support de transmission est assuré par des ondes électromagnétiques. Comme tous les canaux de communication, il est soumis aux problèmes posés par le bruit et les perturbations, qui vont limiter les performances du système de transmission. Ils sont aussi dépendants des propriétés de l'antenne qui va donner naissance à l'onde électromagnétique, et à l'environnement autour de l'antenne qui va influencer sur la propagation des ondes électromagnétiques. La connaissance et la modélisation de la propagation et des antennes sont complexes ... mais nécessaires pour dimensionner un système de transmission sans fils.

Bien que complémentaire de l'étude des antennes, la question de la propagation des ondes électromagnétiques, la description physique et la modélisation des effets de la propagation des ondes et les techniques permettant de compenser les effets parasites du canal radioélectrique ne seront pas traitées dans ce cours.

ETAT DE L'ART SUR LES ANTENNES

1. Introduction :

Les nouveaux systèmes de télécommunication ont très vite montré l'insuffisance des antennes classiques. Les antennes filaires et patches sont intrinsèquement des dispositifs à bande étroite. Leur comportement est très fortement dépendant du rapport de la taille de l'antenne à la longueur d'onde de fonctionnement. Les paramètres systèmes d'une antenne (gain, adaptation, diagramme de rayonnement) souffrent alors du moindre désaccord de la fréquence de fonctionnement. C'est ainsi que la technologie s'oriente vers de nouveaux types d'antennes, d'où l'introduction de la notion des antennes multi-bandes dont le principe est d'avoir une seule antenne qui résonne à plusieurs fréquences ce qui permet d'associer en même temps divers services (Ex : GSM, DCS, UMTS, etc.).

Les techniques utilisées pour réaliser un comportement multi-bandes sont très variées et basées sur les antennes fractales. En effet bien que la théorie soit découverte il y a longtemps [1], l'utilisation des fractales dans la technologie d'antenne est très récente [2] [3].

Vu l'aspect d'autosimilarité des formes fractales, les antennes fractales offrent un comportement multi-bande avec des dimensions très réduites grâce à leurs irrégularités infinies.

2. Généralités sur les antennes :

Les systèmes de télécommunications utilisés permettant généralement l'échange d'informations dans différents milieux naturels, peuvent être décomposés en deux parties : une partie servant au traitement des signaux électriques contenant les informations à

transmettre et une seconde partie permet la transformation de ces signaux électriques en ondes électromagnétique rayonnées dans l'espace. Cette dernière fonction est réalisée par des dispositifs appelés « antennes » [6].

3. Définition :

Une antenne est un transducteur entre la ligne de transmission connectée à un générateur et le milieu où l'onde rayonne. Ainsi on peut définir une antenne en émission ou en réception selon son mode de fonctionnement.

Une antenne reliée à une ligne de transmission et rayonnant en espace libre peut être considérée comme un dispositif de couplage entre une onde guidée le long de la ligne et une onde rayonnée dans l'espace. Par conséquent, une antenne est un dispositif qui permet de recevoir et d'émettre les ondes radioélectriques. Elle transforme l'énergie guidée en énergie rayonnée et vice versa. Ce dispositif est en général réciproque. Lorsqu'il est utilisé pour transmettre l'énergie électromagnétique d'une source radioélectrique vers le milieu de propagation, on l'appelle antenne d'émission. Par contre, lorsqu'il est utilisé en sens inverse, on l'appelle antenne de réception.

L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants :

- permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation,
- assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées.
- transmettre le plus fidèlement possible une information.

Par ailleurs, afin de décrire les caractéristiques et les performances des antennes, divers paramètres sont utilisés. Ces paramètres sont classés en deux groupes. Le premier groupe caractérise l'antenne comme un élément de circuit électrique (Z_{in} et S_{11}) et le second groupe s'intéresse à ses propriétés de rayonnement, tel que le diagramme de rayonnement, la directivité et le gain. Enfin, précisons que la notion de puissance rayonnée joue un rôle important dans l'étude des antennes plaquées que nous développerons ultérieurement [13].

Et aussi on peut définir qu'une antenne est un dispositif qui assure la transition entre un guide d'onde et l'espace libre dans lequel ces ondes vont se propager, ou inversement.

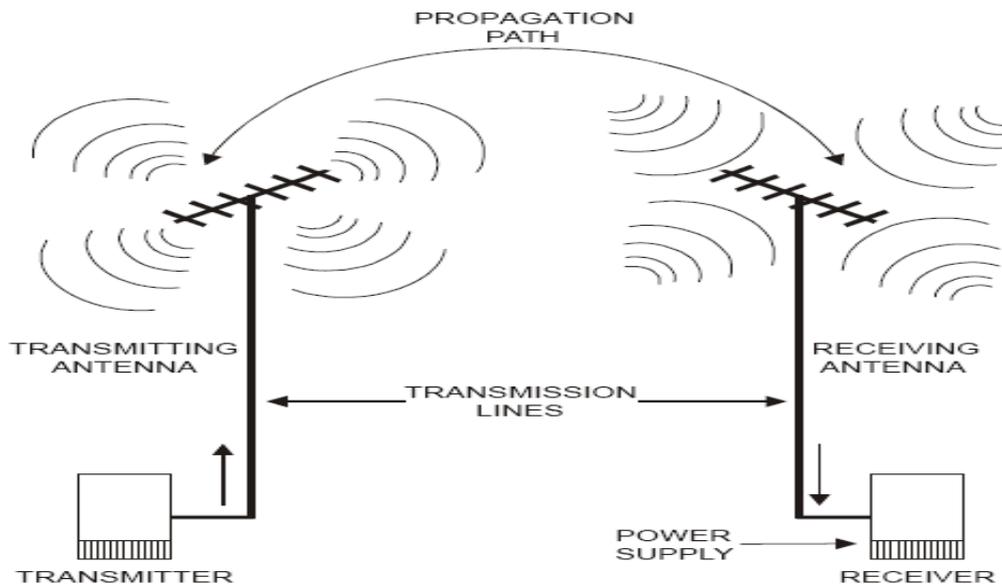


Figure I.1 : Typical Radio Linkl.

4. Antenne Yagi :

L'antenne Yagi (antenne râteau) est utilisée principalement pour la réception des signaux de télévision.

Une antenne Yagi est un réseau d'antennes filaires comprenant :

- Un élément alimenté : le dipôle $\lambda/2$ (ou replié).
- Un élément réflecteur : de longueur $> \lambda/2$.
- Plusieurs éléments directeurs longueur $< \lambda/2$.

C'est une antenne qui a beaucoup d'avantages : une directivité d'environ 12 dB, une largeur de bande de 10% [15].

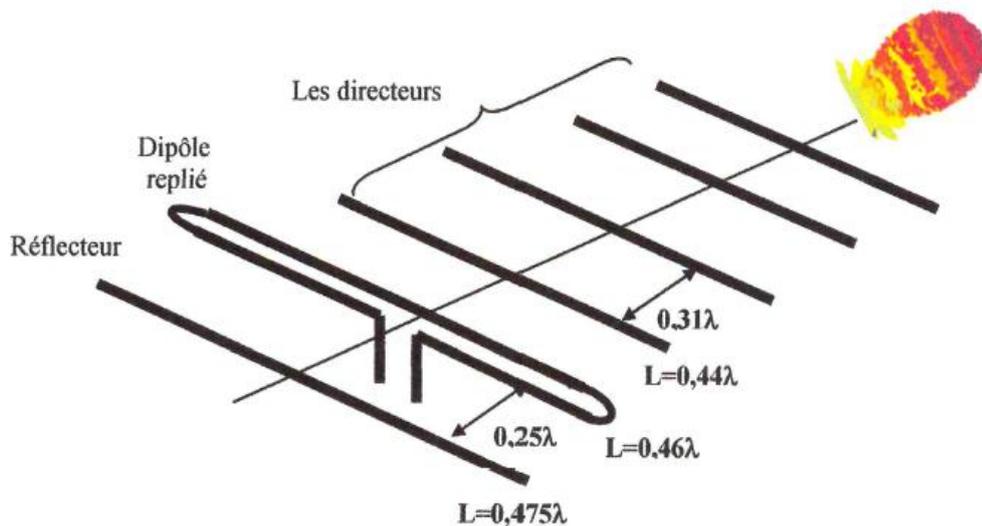


Figure I.2: Schéma d'une antenne Yagi.

5. Antenne Parabolique :

Une antenne parabolique est constituée de deux éléments :

- Une source elle-même réalisée au moyen d'une antenne (par exemple un dipôle $\lambda/2$) insérée dans un guide d'onde rectangulaire ayant éventuellement un Cornet d'adaptation.
- D'un réflecteur parabolique ayant pour rôle de concentrer les ondes électromagnétiques sur le dipôle (mode récepteur) ou de concentrer les ondes émises par la source placée au foyer sur le réflecteur (mode émetteur).

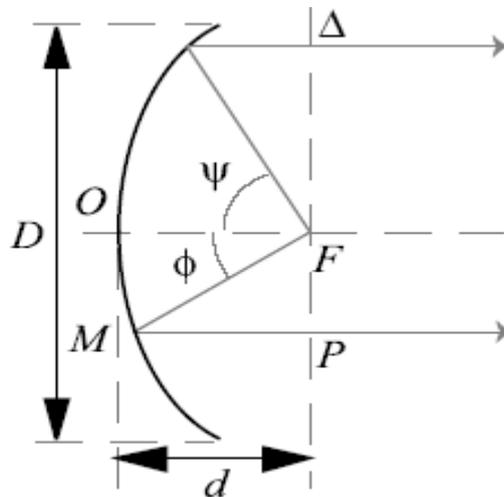


Figure I.3 : Représentation schématique d'une antenne parabolique.

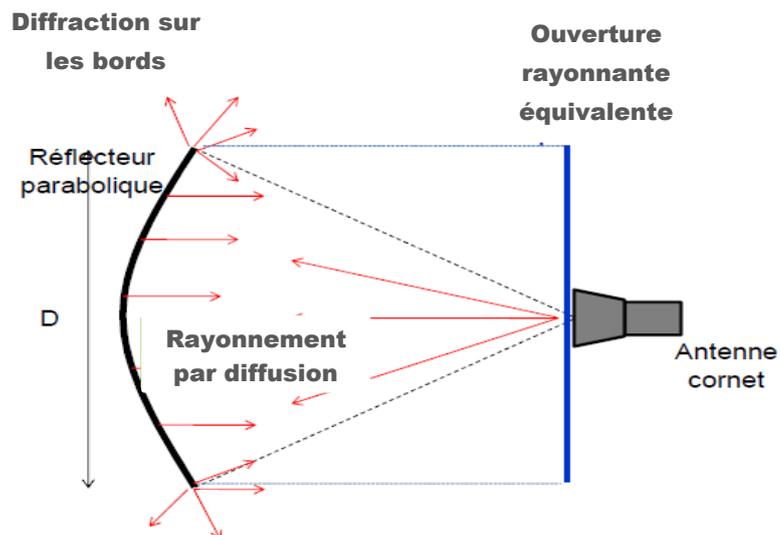


Figure I.4 : Rayonnement d'une antenne parabolique.

6. Antenne Dipôle :

Un dipôle élémentaire ou dipôle de Hertz ou doublet électrique est un fil de longueur h très inférieure à la longueur d'onde λ ($h < \lambda/10$). L'antenne dipôle demi-onde correspond au cas particulier d'une longue antenne filaire linéaire utilisée à sa fréquence de résonance. Cette antenne est utilisée pour un grand nombre d'applications sur les bandes VHF et UHF [3].

Un dipôle est constitué de 2 tiges cylindriques de diamètre fin ($d < \lambda/100$), connectées à une source d'excitation. L'analyse du rayonnement du dipôle peut se faire en découpant le dipôle en dipôles élémentaires et en sommant leur contribution. La répartition du courant le long du dipôle est quasi sinusoïdale (vrai si le diamètre de la tige est nul), à l'image de la répartition du courant le long d'une ligne bifilaire.

Cependant, le courant doit être nul à chaque extrémité du dipôle (le circuit est ouvert donc il ne peut y avoir de courant de conduction aux extrémités). La période de variation du courant le long du dipôle est égale à λ . Les courants sont en opposition de phase en 2 points placés symétriquement sur chaque brin par rapport au centre du dipôle, comme représenté sur la **Figure I.5**.

- Pour un dipôle fin, lorsque la longueur du dipôle L est égale à $\lambda/2$ ou λ , l'antenne est alors en résonance. La fréquence de résonance est donc égale à :

$$L = \frac{\lambda}{2} \leftrightarrow f_{res} = \frac{c}{2L} \quad (I.1)$$

- Pour un dipôle fin, la fonction caractéristique de rayonnement est donnée par :

$$r\left(\theta, \frac{\beta L}{2}\right) = \frac{\cos\left(\frac{\beta L}{2} \cos(\theta)\right) - \cos\left(\frac{\beta L}{2}\right)}{\sin(\theta)} \quad (I.2)$$

- Le gain à la fréquence de résonance est égal à 1.64 soit 2.15 dBi et l'angle d'ouverture à 3 dB est de 78°. Pour $L = \lambda$, l'angle d'ouverture à 3 dB est égal à 48° et le gain à 2.48 soit 3.94 dBi. Cependant, lorsque la fréquence augmente de telle sorte que $L > \lambda$, des lobes secondaires apparaissent.

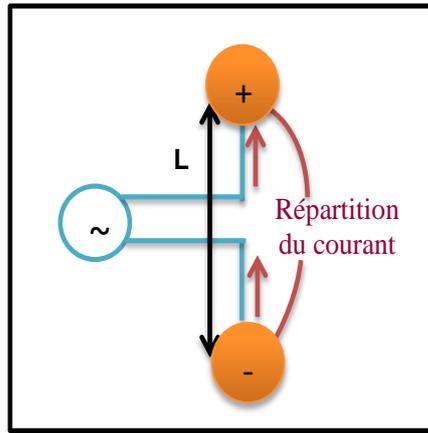


Figure I.5 : Répartition du courant le long d'un dipôle.

7. Caractéristiques électriques :

Généralement ces paramètres électriques définissent l'antenne comme élément du circuit dans lequel elle est connectée. Ils permettent d'apprécier la charge apportée par l'antenne au circuit d'excitation et ainsi, de caractériser l'efficacité du transfert de puissance entre le système radioélectrique et le milieu de propagation. Plusieurs paramètres peuvent servir à cette caractérisation mais nous ne définirons que les trois principaux, à savoir l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion et le rapport d'onde stationnaire [4].

7.1. L'impédance d'entrée :

L'impédance d'entrée est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ; elle est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e présentés à l'entrée (**Figure I.6**) :

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (I.3)$$

Où :

Z = impédance d'entrée aux bornes a et b.

R = résistance de l'antenne aux bornes a et b.

X = réactance de l'antenne aux bornes a et b.

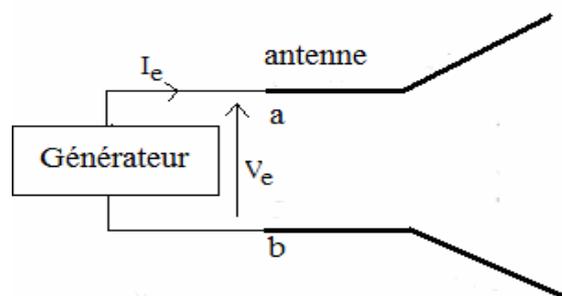


Figure I.6 : Antenne en mode émetteur.

Généralement pour qu'une antenne ait un bon rendement, il est nécessaire que l'émetteur, la ligne de transmission, et l'antenne aient presque la même impédance.

7.2. Coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui permet de quantifier la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident [14].

Généralement ce coefficient Γ est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne Z_e et l'impédance caractéristique Z_C par la relation :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_C}{Z_e + Z_C} \quad (\text{I.4})$$

➤ Circuit équivalent d'un système émetteur – récepteur :

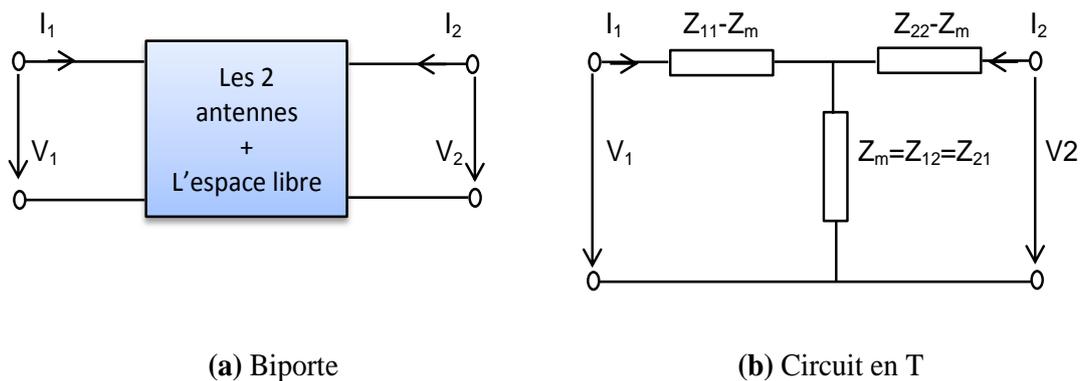


Figure I.7 : Circuits équivalents.

Un système émetteur-récepteur formé par un couple d'antennes est équivalent à une biporte linéaire passive (**Figure I.7 a**). Du point de vue de la théorie des circuits, on doit donc pouvoir le représenter avec une matrice impédance $[Z]$ avec les relations classiques :

$$V_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2 \quad (\text{I.5})$$

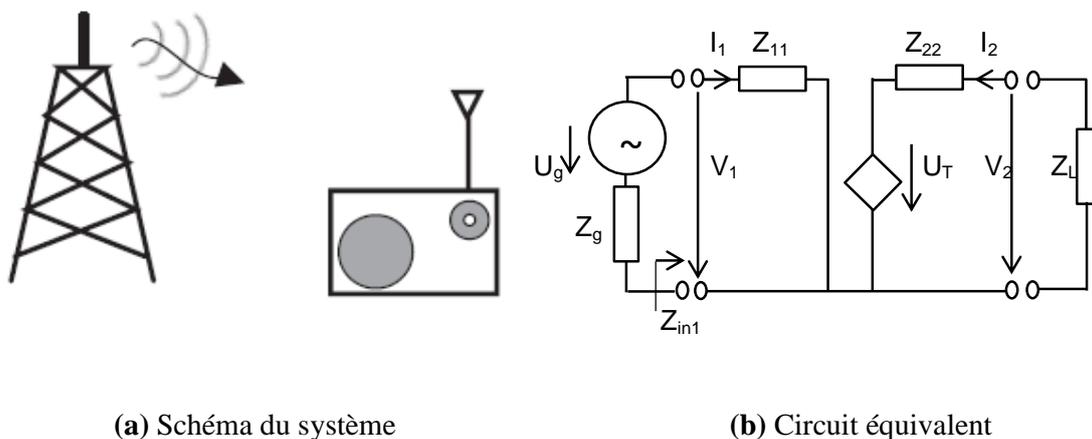
$$V_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2 \quad (\text{I.6})$$

On constate tout de suite que :

$$Z_{12} = \left[\frac{V_1}{I_2} \right]_{I_1=0} = \frac{V_1^{open}}{I_2} \quad (\text{I.7})$$

et

$$Z_{21} = \left[\frac{V_2}{I_1} \right]_{I_2=0} = \frac{V_2^{open}}{I_1} \quad (I.8)$$



(a) Schéma du système

(b) Circuit équivalent

Figure I.8 : Hypothèse unilatérale.

Or, d'après le théorème de réciprocité ces valeurs sont identiques : donc la matrice impédance est réciproque ($Z_{12} = Z_{21}$). "La réciprocité électromagnétique implique la réciprocité au niveau de la circuiterie". On arrive ainsi au circuit équivalent en **T** de la **Figure I.7 b**. On introduira la notation $Z_{12} = Z_{21} = Z_m$ (impédance mutuelle).

Si les antennes émettrice et réceptrice sont identiques, la symétrie d'un problème n'exige en plus que $Z_{11} = Z_{22}$.

Une représentation en termes d'admittances combinée avec un circuit équivalent en **T** et un générateur de Norton est aussi possible.

$$Z_{in} = Z_{11} - Z_m + Z_m \frac{Z_{22} - Z_m + Z_L}{Z_{22} + Z_L} \quad (I.9)$$

Avec : $S_{11} = Z_{11}$, $U_T = Z_{21}I_1$

Signalons qu'on peut représenter Γ sous forme de paramètre S en dB tel que :

$$S_{11(dB)} = 20 \log(\Gamma) \quad (I.10)$$

7.3. Rapport d'onde stationnaire (ROS) :

Les lignes de transmission permettent aux ondes électromagnétiques de se propager dans les deux directions. Quand la source, la ligne de transmission et la charge ont toutes la même impédance, l'onde électromagnétique se propage de la source à la charge sans aucune perte du signal. Par contre, si la source n'a pas la même impédance par rapport aux autres éléments de la chaîne de transmission, une partie de l'onde sera réfléchiée lorsqu'elle atteint la charge et renvoyée vers la source. Dans ce cas, les ondes incidents et réfléchiées se superposent et engendrent une onde stationnaire [8][9].

Si on peut caractériser par $(+V)$ l'onde propageant vers l'avant et par $(-V)$ l'onde en retour, alors le taux ou le rapport d'onde stationnaire sera défini par :

$$ROS = \frac{(+V)-(-V)}{(+V)+(-V)} \quad (\text{I.11})$$

Il est lié au coefficient de réflexion Γ par la relation :

$$ROS = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (\text{I.12})$$

8. Caractéristiques de rayonnement :

8.1. Diagramme de rayonnement :

La répartition dans l'espace de l'énergie rayonnée par une antenne est caractérisée par son diagramme de rayonnement. Soit dans l'espace libre, un repère (O, X, Y, Z) et un point P quelconque de l'espace. Considérons de plus un système de coordonnées sphériques (R, θ, ϕ) (Figure I.9) [7].

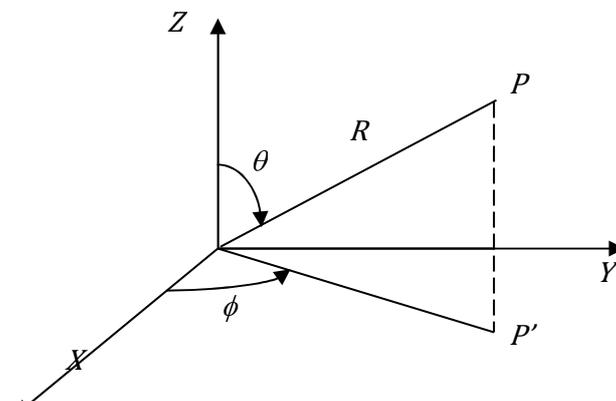


Figure I.9 : Système de coordonnées sphériques (R, θ, ϕ) .

Soit $P(\theta, \phi)$ la puissance rayonnée par une antenne, par unité d'angle solide. Considérons la direction définie par les angles θ et ϕ pour laquelle $P(\theta, \phi)$ passe par un maximum.

On caractérise alors la variation de puissance par rapport à la puissance maximum par la relation suivante :

$$r(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P(\theta_0, \phi_0)} \leq 1 \quad (1.13)$$

On exprime généralement cette fonction en décibel :

$$r(\theta, \phi)_{dB} = 10 \log \frac{P(\theta, \phi)}{P(\theta_0, \phi_0)} \quad (1.14)$$

Il est très difficile de définir le diagramme complet dans l'espace, en général on se contente de deux coupes perpendiculaires dans les plans privilégiés, l'un appelé plan E (contenant le vecteur champ électrique E) et l'autre appelé plan H contenant le vecteur champ magnétique H (voir **Figure I.10**) [6].

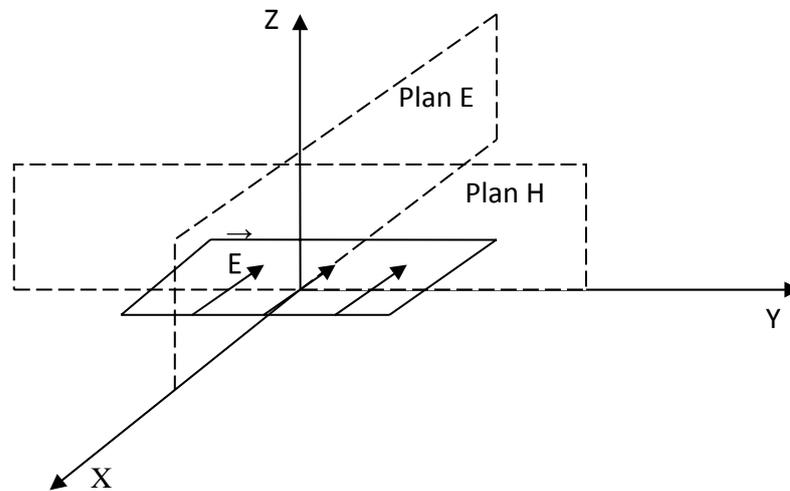


Figure I.10 : Définition des deux plans principaux (E et H).

Avec une source polarisée parallèlement à l'axe OX , le plan E est caractérisé par $\phi = 0^\circ$ et θ variable et le plan H est caractérisé par $\phi = 90^\circ$ et θ variable.

Les diagrammes de rayonnement sont représentés en coordonnées polaires ou en coordonnées cartésiennes.

8.2. La directivité :

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace.

La directivité d'une antenne dans une direction $\Delta (\theta, \varphi)$ est définie comme suit :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{iso}} \quad (\text{I.15})$$

$U(\theta, \varphi)$: Intensité de rayonnement de l'antenne considérée.

U_{iso} : Intensité de rayonnement d'une antenne isotrope, elle est donnée par :

$$U_{iso} = \frac{P_{ray}}{4\pi} \quad (\text{I.16})$$

P_{ray} : Puissance rayonnée de l'antenne.

La directivité maximale que l'on appelle souvent et simplement directivité est donnée par :

$$D_0 = \text{MAX } D(\theta, \varphi) \quad (\text{I.17})$$

La directivité, grandeur sans dimension, est généralement exprimée par sa valeur en décibels :

$$D(\theta, \varphi)|_{dB} = 10 \log D_0 \quad (\text{I.18})$$

Une antenne isotrope rayonne uniformément la même densité de puissance quel que soit la direction.

8.3. Gain :

Le gain est une quantité descriptive de la performance d'une antenne. Le gain d'une antenne isotrope est pris comme une référence unité (0 dB). Le gain d'une antenne dans une direction donnée est le rapport de l'intensité de rayonnement et de celle d'une antenne isotrope [10][11].

Nous définissons aussi le gain relatif qui est défini par le rapport du gain de puissance dans une direction donnée et de celui d'une antenne de référence dans sa direction référencée.

La puissance en entrée est supposée la même pour tous les cas. L'antenne de référence est choisie dipôle, cornet, ou toute autre antenne de référence connue par son gain calculable ou préinscrit par le constructeur. Le gain devient alors :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \left(\frac{U(\theta, \varphi)}{\text{Source Isotropique Sans Perte}} \right) \quad (\text{I.19})$$

La direction de maximum de rayonnement est souvent prise comme la direction pour déduire le gain de puissance. Si η est l'efficacité de rayonnement d'une antenne, $P_{IN} = \eta P_{rad}$, où P_{rad} est la puissance rayonnée totale.

On définit le gain dans la direction $\Delta (\theta, \varphi)$ par :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi\eta \left(\frac{U(\theta, \varphi)}{P_{rad}} \right) = \eta D(\theta, \varphi) \quad (\text{I.20})$$

Avec η est le rendement de l'antenne donnée par :

$$\eta = \frac{P_{ray}}{P_f} \quad (\text{I.21})$$

Généralement la valeur maximum de $G(\theta, \varphi)$ prend la dénomination du gain de l'antenne.

$$G_0 = \text{MAX } G(\theta, \varphi) \quad (\text{I.22})$$

Le gain peut également être exprimé en décibels :

$$G(\theta, \varphi)|_{dB} = 10 \log G_0 \quad (\text{I.23})$$

✓ D'autres paramètres permettent de décrire les caractéristiques et les performances des antennes. Parmi ces éléments nous citons :

8.4. Résistance de rayonnement :

S'il est possible de connaître le courant I_Q en un point Q de cette antenne, nous définissons la résistance de rayonnement en ce point par le rapport :

$$R_Q = \frac{2P_r}{I_Q^2} \quad (\text{I.24})$$

Avec P_r est la puissance active rayonnée par l'antenne.

8.5. Les angles d'ouvertures horizontales et verticales :

En premier lieu l'angle d'ouverture horizontale caractérise la largeur du faisceau de l'antenne dans un plan horizontal. Il est défini comme l'angle entre les directions où le gain est 3 dB inférieur au gain maximal. Alors que l'angle d'ouverture verticale caractérise la largeur du faisceau de l'antenne dans un plan vertical. De la même façon que l'angle horizontal, il est défini comme l'angle entre les directions où le gain est 3 dB inférieur au gain maximal [5].

8.6. Polarisation :

La polarisation du champ électromagnétique rayonné par une antenne est donnée par la direction du champ électrique \vec{E} . Si \vec{E} garde une direction constante dans le temps, on dit que l'on a une polarisation rectiligne.

Si la direction varie avec le temps de telle sorte que si en un point donné on schématise ses positions successives de \vec{E} , l'extrémité du vecteur représentatif décrivant un cercle ou une ellipse, on dit alors que le champ rayonné est à polarisation circulaire ou elliptique (voir **Figure I.11**).

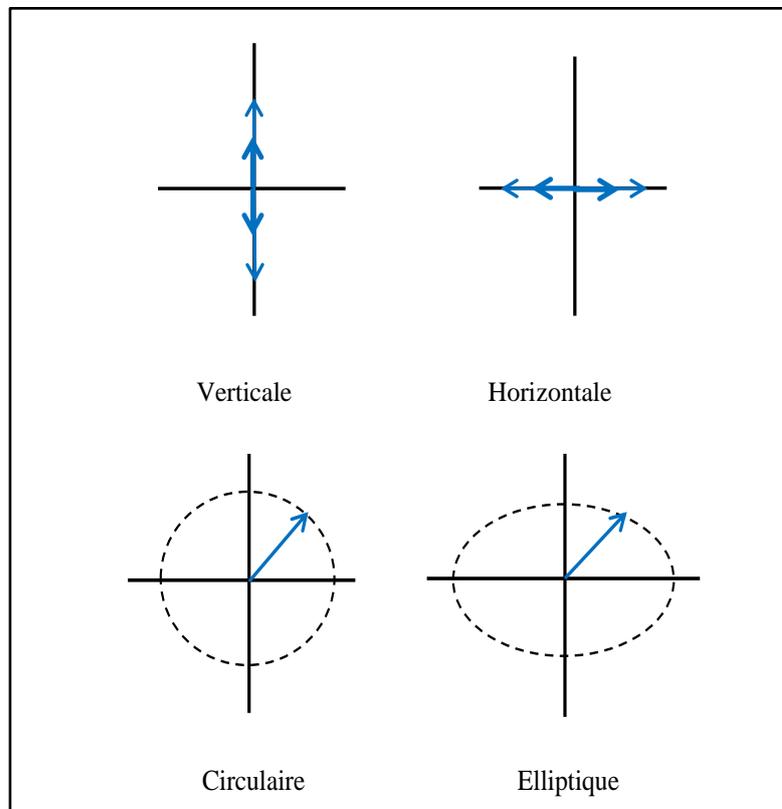


Figure I.11 : Polarisation du champ électromagnétique.

Dans le **tableau I.1**, nous présentons les caractéristiques de chacun des types de polarisations précitées :

Polarisation Horizontale	Polarisation Verticale	Polarisation Circulaire
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Peu de bruit électrique. ➤ Meilleure sensibilité aux signaux faibles. ➤ Angle de rayonnement généralement plus élevé par rapport au sol favorisant ainsi de bons contacts locaux. ➤ Grands espaces requis pour le déploiement. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bruit électrique plus présent dans les bandes HF. ➤ Optimisation de l'espace occupé par l'antenne. ➤ Nécessite généralement un bon plan de terre (Ground, masse). ➤ Plus enclin à causer de l'interférence dans les bandes HF. ➤ Angle de rayonnement plus bas. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Génère deux polarisations en phase pour éviter les pertes en traversant l'ionosphère et pour compenser la rotation des satellites. ➤ Rarement utilisée pour des contacts au sol.

Tableau I.1: Les caractéristiques de chacun des types de polarisations.

8.7. La bande passante :

La bande passante (*BP*) d'une antenne est la plage de fréquences dans laquelle on peut normalement l'utiliser. Généralement on définit la largeur de bande en pourcentage % comme suit :

$$BP(\%) = 100 \frac{f_s - f_i}{f_c} \quad (I.25)$$

Où f_c est la fréquence centrale d'utilisation pour laquelle l'antenne est conçue, f_s et f_i sont les fréquences limites supérieures et inférieures pour un certain niveau donné.

Généralement la définition de ce niveau peut être limitée par le rapport d'onde stationnaire maximal admissible ($ROS = 2$).

9. Les paramètres fondamentaux des antennes :

Dans cette partie, nous allons présenter les principaux paramètres fondamentaux des antennes. Nous allons nous intéresser aux paramètres de rayonnement et électriques.

9.1. Impédance :

Une antenne est caractérisée par son impédance Z_a composée d'une partie réelle R_a et d'une partie imaginaire X_a . L'impédance est donnée par l'expression :

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (\text{I.26})$$

La partie réelle est constituée de la résistance de rayonnement R_r et de la résistance de pertes R_l , et dont l'expression est donnée par la relation (I.27). L'énergie dissipée par R_r correspond à l'énergie rayonnée par l'antenne. L'énergie dissipée par R_l correspond aux pertes de conduction, aux pertes diélectriques et aux pertes d'onde de surface de l'antenne.

$$R_a = R_r + R_l \quad (\text{I.27})$$

Dans le cas de l'émission, un générateur connecté à l'antenne possède également une impédance de sortie Z_g constituée d'une partie réelle R_g et d'une partie imaginaire X_g montré par l'expression :

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (\text{I.28})$$

Dans la plus part des cas on a : $R_g = 50 \Omega$ et $X_g = 0 \Omega$.

9.2. L'adaptation :

L'adaptation est un procédé qui permet à l'antenne, en émission par exemple, d'accepter le maximum de la puissance fournie par le générateur. Elle est caractérisée généralement par le paramètre S_{11} qui est le rapport entre l'onde incidente (P_{inc}) appliquée à l'entrée de l'antenne et l'onde réfléchie (P_{ref}) vers la source. Il s'exprime en fonction de l'impédance de sortie du générateur et l'impédance d'entrée de l'antenne. Ce paramètre est jugé satisfaisant généralement à partir d'une valeur seuil de 0.1 en linéaire ou de -10 dB. Les expressions (I.29) et (I.30) expriment la valeur de S_{11} en linéaire et en dB talque $S_{11} = Z_{11}$ [13].

$$|S_{11}|^2 = \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \quad (I.29)$$

$$S_{11}(dB) = 10 \log \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \quad (I.30)$$

9.3. La bande passante :

La bande passante est définie comme étant une plage de fréquences sur laquelle les performances d'un dispositif électronique sont conformes à certaines spécifications. Dans le domaine des antennes en applications terrestres, la bande passante correspond généralement à la plage de fréquences sur laquelle 90% de la puissance incidente est transmise, ce qui correspond à $S_{11} = -10 \text{ dB}$, et sous condition que le diagramme de rayonnement, ou la répartition de l'énergie rayonné, ne change pas sur cette bande [8].

9.4. Le coefficient de qualité :

Le coefficient de qualité d'un circuit résonant est défini comme étant égal à 2π multiplié par le rapport de l'énergie emmagasinée divisée par l'énergie perdue. Pour une antenne l'énergie perdue correspond à l'énergie rayonnée et à l'énergie dissipée par les pertes de conduction et par les pertes diélectriques. La formule est exprimée par la relation (I.31).

$$Q = 2\pi \frac{\text{énergie stockée}}{\text{énergie rayonnée et dissipée}} \quad (I.31)$$

Il indique l'efficacité de rayonnement de l'antenne. Une bonne approximation du facteur de qualité est donnée par l'expression :

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} \quad (I.32)$$

Où f_r est la fréquence de résonance, Δf la bande passante.

Un fort coefficient de qualité implique un rayonnement très efficace de l'antenne sur une bande de fréquences très étroite, ce qui limite les interférences hors bande. Un faible coefficient de qualité indique un fonctionnement large bande de l'antenne et donc un possible collecte du bruit présent dans la bande, dégradant ainsi le rapport signal sur bruit en réception [6].

9.5. Directivité :

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) donnée est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. Avec cette définition, une antenne fortement directive admet une faible ouverture de rayonnement, et une antenne faiblement directive admet une large ouverture de rayonnement [12]. La **Figure I.12** présente la répartition de l'énergie rayonnée dans l'espace par trois types d'antennes.

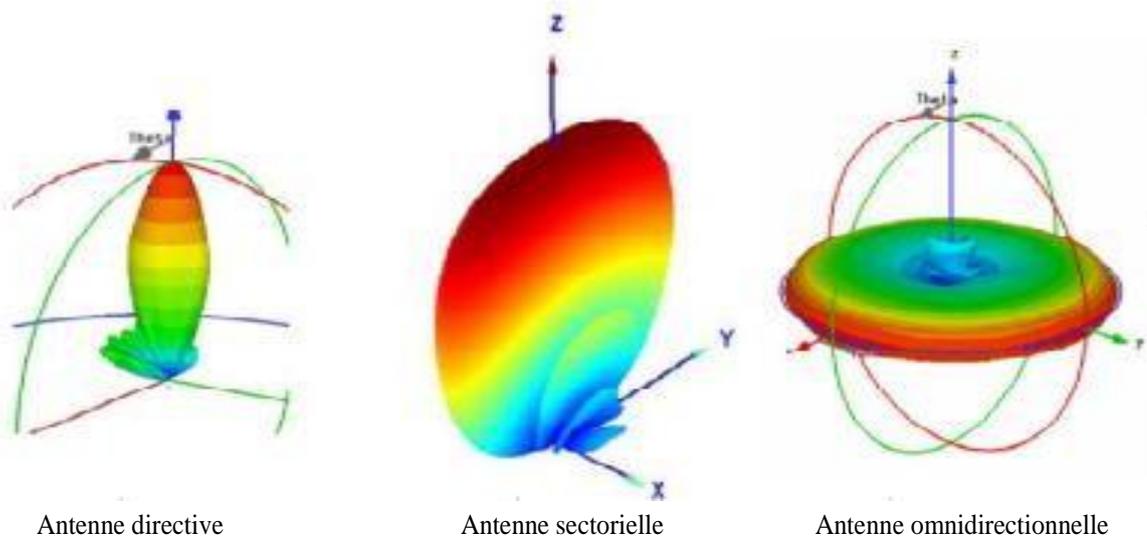


Figure I.12 : Répartitions possibles de l'énergie rayonnée dans l'espace par les antennes.

9.6. Gain :

Le gain $G(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope ayant les mêmes pertes. En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal $P(\theta_0, \varphi_0)$. Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction donnée [9].

On notera :

$P(\theta, \varphi)$: la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne (W/m^2).

P_0 : la densité de puissance moyenne rayonnée (W/m^2) par l'antenne isotrope ayant les mêmes pertes que le cas d'étude. Le gain est alors donné par l'expression suivante :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0} \quad (\text{I.33})$$

9.7. Angle d'ouverture d'une antenne :

L'angle d'ouverture d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié (-3dB) de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable [2].

9.8. Efficacité de rayonnement :

L'efficacité de rayonnement totale e_t d'une antenne est utilisée dans le but de prendre en compte les pertes à l'entrée de l'antenne et dans sa structure. Les pertes peuvent être causées par les réflexions provenant d'une mauvaise adaptation de l'antenne au circuit qui lui est associée, mais aussi par les propriétés des matériaux diélectriques et conducteurs. e_t est donnée par l'expression ci-dessous:

$$e_t = e_r + e_c + e_d \quad (I.34)$$

Où e_r , e_c , e_d , sont respectivement les efficacités dues à la désadaptation, aux pertes de conduction et aux pertes diélectrique.

Connaissant le gain et la directivité on peut déduire l'efficacité de l'antenne sous test à partir de la relation (I.35) suivante :

$$G(\theta, \varphi) = e_t \cdot D(\theta, \varphi) \quad (I.35)$$

9.9. Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement fournit des informations sur la répartition dans l'espace de l'énergie rayonnée ou reçue par l'antenne considérée. Ainsi, à partir du diagramme de rayonnement, il est possible de définir plusieurs paramètres du rayonnement d'une antenne dont l'ouverture, le niveau de puissance et la direction des lobes secondaires [4].

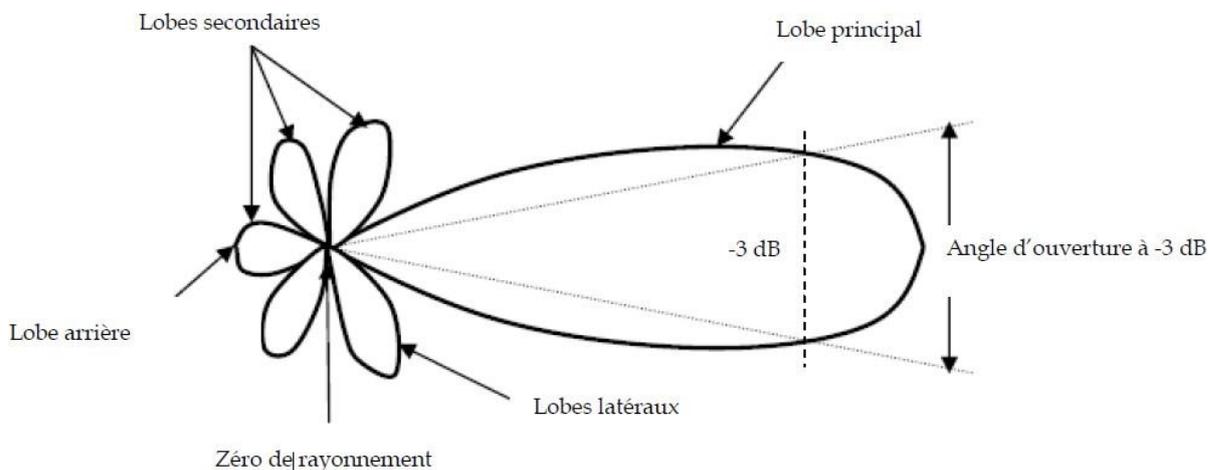


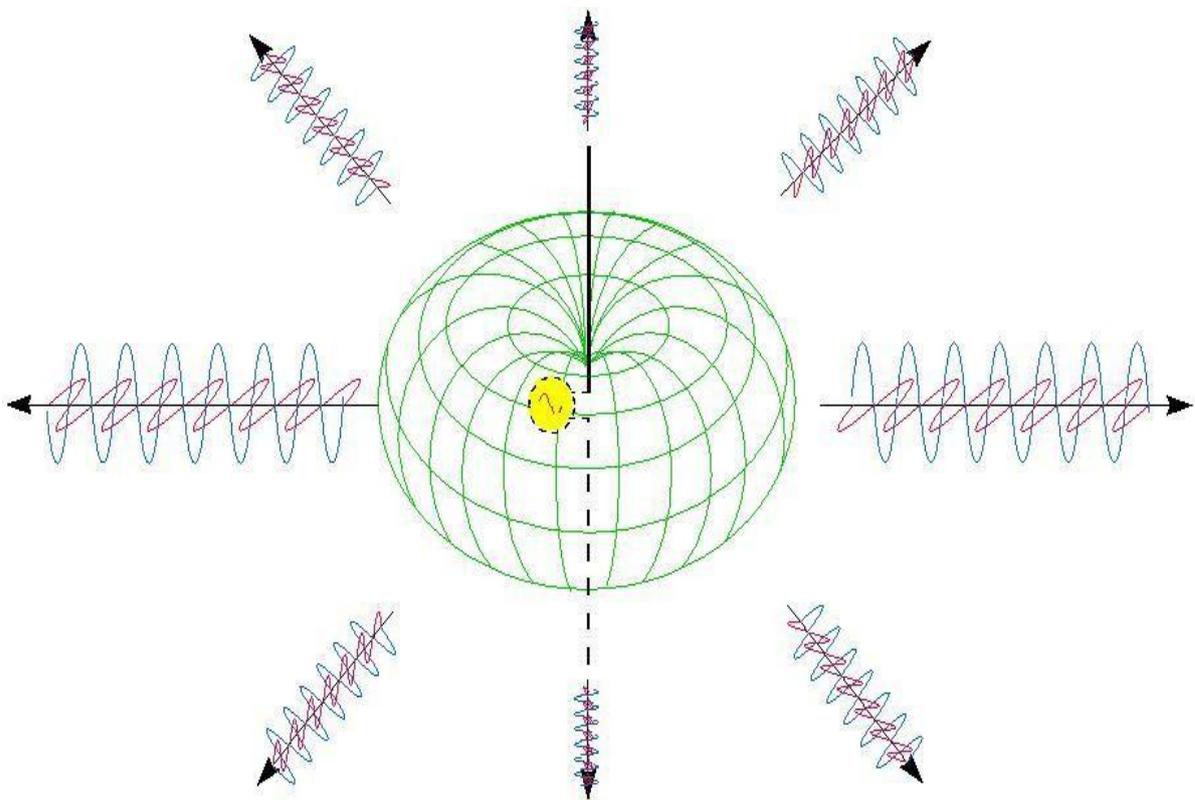
Figure I.13 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directive.

Tel que le montre la **Figure I.13**, le diagramme de rayonnement est constitué :

- **D'un lobe principal** : C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.
- **Des lobes secondaires** : Tous les autres lobes sont appelés lobes secondaires. Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables. Le niveau d'un lobe secondaire est en général exprimé sous forme de rapport entre la densité de puissance dans le lobe en question et celle du lobe principal. Ce rapport est appelé le niveau des lobes secondaires et il est exprimé en *dB*.
- **D'un lobe arrière (rayonnement arrière)** : C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposée (à 180°) du lobe principal. Le rapport avant/arrière est le rapport en *dB* de la puissance rayonnée dans la direction du maximum de rayonnement par rapport à celle rayonnée dans la direction opposée. Dans la plupart des systèmes antennaires, les lobes secondaires sont indésirables. Une bonne conception d'antenne doit permettre de minimiser les niveaux de lobes secondaires.

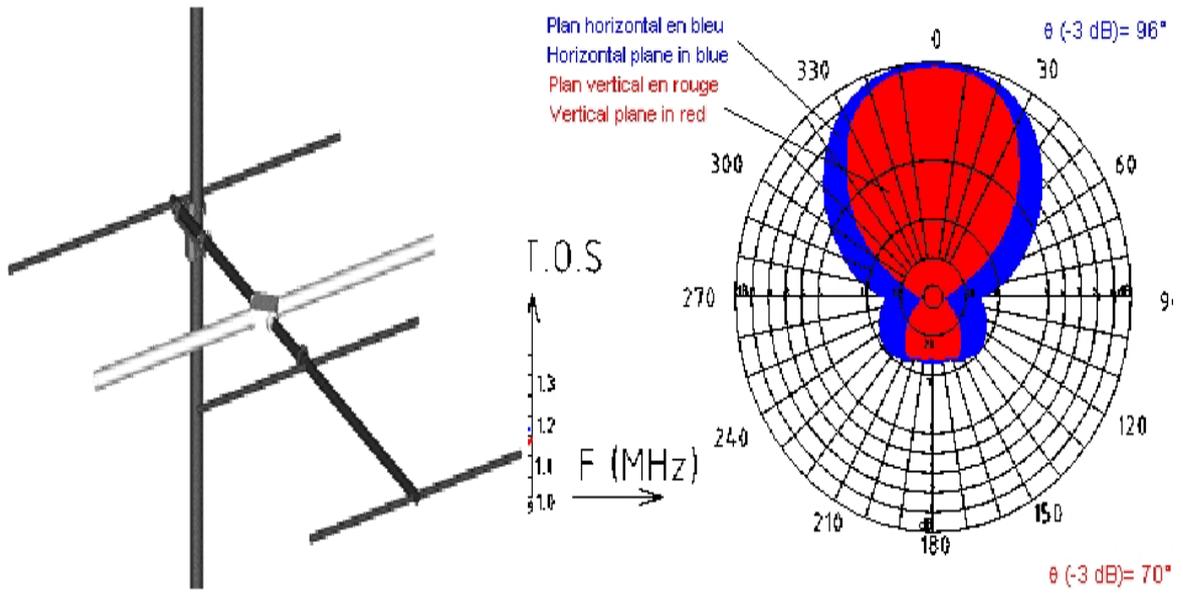
❖ **Exemples de diagrammes de rayonnement :**

Exemple 1 :

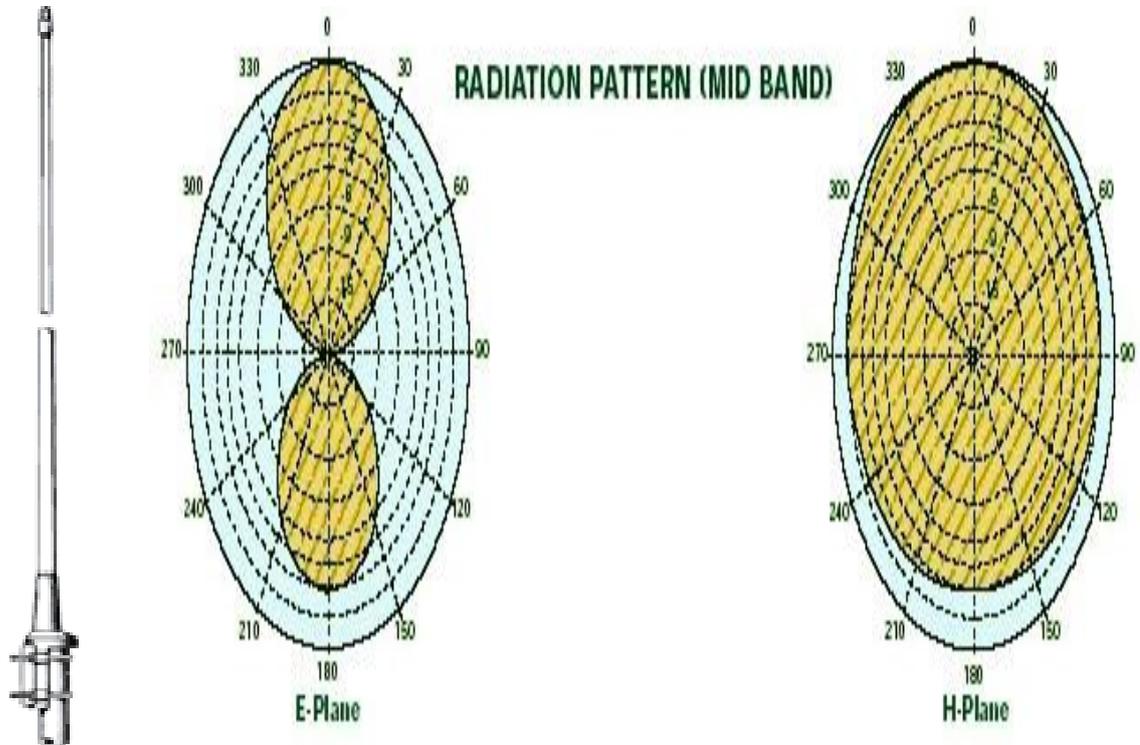


Répartition relative de l'énergie : diagramme de rayonnement (vert)

Exemple 2 :



Exemple 3 :



9.10. Polarisation :

La polarisation de l'onde représente l'évolution temporelle du vecteur champ électrique (respectivement du vecteur champ magnétique) dans un plan d'onde. Ainsi si le vecteur champ électrique (ou vecteur champ magnétique) décrit une droite, nous parlerons d'une polarisation rectiligne ou linéaire, s'il décrit une ellipse ou un cercle, nous parlerons d'une polarisation elliptique ou circulaire [2].

10. Conclusion :

Les antennes ont des propriétés et des caractéristiques, selon lesquelles elles sont valorisées. Plusieurs techniques existent pour les simuler ou les réaliser. Alors, pour assurer un bon fonctionnement, il faut choisir celle la plus adaptée à l'application envisagée. Dans notre cas, le choix s'est porté sur la technologie des antennes imprimées. Leurs avantages nombreux permettent de les utiliser dans différents secteurs et surtout dans les communications mobiles (satellite, avion, voiture, missile, téléphone portable, ...).

Les techniques utilisées pour réaliser un comportement multi-bande sont très variées et basées sur les antennes fractales. Ces antennes présentent une spécificité géométrique qui leur confère la possibilité de résonner sur plusieurs fréquences en gardant éventuellement les mêmes caractéristiques électromagnétiques.

Chapitre II

MAGUS ET MMANA-GAL

1. Introduction :

Depuis plusieurs années, des logiciels spécialisés dans le domaine de la simulation d'antennes sont apparus certains d'entre eux sont disponibles en version freeware. Parmi ces freewares, MMANA-GAL développé par le radio amateur japonais JE3HHT est l'un des plus populaires, et d'autre MAGUS.

Nous allons tenter de simuler une antenne dont la géométrie est simple par exemple un dipôle taillé pour les bandes des $F_0=50\text{Mhz}$ & $F_0=1\text{Ghz}$.

2. Antenne Magus :

Est plus que juste une base de données d'antennes - ce est aussi un logiciel pour les ingénieurs de conception d'antenne, pleins d'outils utiles qui peuvent être utilisés pour simplifier les tâches quotidiennes d'antenne gratuit. En savoir plus sur les outils antenne MAGUS en cliquant sur l'une des vignettes ci-dessous [16]. Chaque antenne peut être conçue pour une gamme d'objectifs - comme fréquences de fonctionnement, le gain, impédance d'entrée et le type de substrat. Les algorithmes de synthèse correspondent objectifs à des jeux de paramètres physiques en quelques secondes, permet à l'ingénieur rétroaction instantanée sur les dimensions attendues de l'antenne.

3. MMANA-GAL :

MMANA est un très bon logiciel de simulation d'antennes et de lignes de transmissions est basé sur le programme de simulation d'antennes MININEC [17].

Il a été conçu par un OM japonais, et a été écrit par JE3HHT, Mikado Moi. Qui s'est fait notamment connaître grâce à ses logiciels de SSTV [18].

Avec ce simulateur qui inclut déjà beaucoup de fichiers d'antennes, vous découvrirez avec intérêt, j'en suis certain, nombre d'aériens sur une grande palette de fréquences.

Très simple d'utilisation, vous pourrez rapidement consulter, créer et faire évoluer différents systèmes grâce à son optimiseur qui vous aidera plus tard à réaliser la mise au point finale de vos antennes.

D'autres personnes ont contribué à en faire ce qu'il est aujourd'hui, entre autres la traduction en anglais de l'interface et des fichiers d'aide. L'un des éléments contribuant à la simplicité d'utilisation de MMANA-GAL est qu'il est fourni avec de nombreux exemples (plus de 200), mettant en évidence la plupart des possibilités de ce programme.

C'est ici que devraient apparaître les résultats sous forme numérique et graphique.

Il faut savoir que dans MMANA-GAL, les antennes sont définies comme un ensemble de fils que dont on précise les coordonnées X, Y, Z de leurs extrémités. C'est exactement le même principe que de donner sa position géographique en indiquant sa latitude (X), sa longitude (Y) ainsi que son altitude (Z). Dans le cas du dipôle, l'antenne est constituée d'un seul fil (qui est interrompu par le point d'alimentation). Nous allons donc définir les coordonnées de ses 2 extrémités[19].

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons pu mettre en évidence le contexte de l'étude. Il existe de nos jours une forte demande de la part des opérateurs industriels pour l'utilisation d'antennes miniatures large et multi-bande générant de la polarisation circulaire.

Chapitre III

Simulation

On commence par simuler une antenne, puis on se retrouve à y apporter des modifications, et à l'optimiser, avec pour résultat que l'on y passe beaucoup plus de temps que prévu. Ne tenant pas compte de cet avis.

Bien entendu l'utilisation d'un tel programme doit être abordée avec circonspection. Il est en effet facile d'en obtenir des résultats rapides, précis et complètement faux. Il ne faut pas avoir une confiance aveugle dans les résultats donnés par un programme de simulation. La meilleure méthode pour détecter des résultats erronés et bien entendu de connaître la réponse d'avance. Ceci n'est pas une plaisanterie. On peut par exemple commencer avec une antenne dont on connaît le comportement puis la modifier pour améliorer l'une ou l'autre de ses caractéristiques. Dans tous les cas, il faut que les résultats passent un test : sont-ils plausibles? Souvent un résultat suspect sera mis en évidence par un petit peu de bon sens, puis l'expérience viendra à la rescousse.

Dans ce genre de programme, l'antenne est décrite brin par brin, au moyen des coordonnées X, Y et Z de chaque extrémité du brin. Il faut donc se donner un point de référence ($X=0$, $Y=0$ et $Z=0$) orienté de façon optimale. Ma première antenne a été simulée en orientant X vers le nord, et Y vers l'est. Une décision qui non seulement a nécessité le calcul de nombreux sinus et cosinus, mais a constitué un casse-tête insurmontable quand il s'est agit d'optimiser l'antenne.

Mes autres simulations ont été grandement simplifiées en choisissant le point 0, 0, 0 au milieu du dipôle et l'axe des X le long des brins. De même dans le sens vertical, c'est une bonne idée de choisir le point $Z=0$ au niveau de l'antenne et non au niveau du sol. En effet,

dans MAGUS, il y a un champ dédié pour entrer la hauteur de l'antenne au-dessus du sol. Cette valeur n'étant utilisée que pour le calcul du diagramme de rayonnement.

A noter, le fait que l'un des brins est coudé, car pour raisons d'ORNI, il ne faut pas qu'il s'approche de plus de 2 m de la maison, ceci n'a pas d'influence notable sur le bon fonctionnement de l'antenne, sauf peut-être sur le diagramme de rayonnement. A droite, en Z, l'antenne avec la ligne d'alimentation en échelle. En bas à droite, la vision 3-D données par MAGUS de cette même antenne, y compris le feeder d'alimentation.

Résultats après optimisation pour un ROS acceptable sur le plus grand nombre de bandes.

On voit que l'impédance présentée par l'antenne est satisfaisante sur toutes les bandes. A l'exception de ces deux bandes. Telle qu'optimisée, l'antenne est un peu longue sur certaines bandes et un peu courte sur d'autres. Ceci est le compromis permettant son fonctionnement sur toutes ces bandes.

Les simulations par MMANA nous donnent l'impédance à ces fréquences. Quelques calculs simples avec des nombres complexes (je n'ai pas pu résister !) nous donnent les valeurs suivantes, qui garantissent toutes un ROS acceptable (en fait pour simplifier encore plus ces calculs, j'ai simplement simulé ces circuits à l'aide d'une version de SPICE).

La simulation des deux types d'antennes YAGI & Dipôle pour les mêmes paramètres que j'ai choisis à savoir $F0=50\text{Mhz}$ & $F0=1\text{Ghz}$ pour les deux types.

Simulation de l'antenne Yagi par logiciel Magus :

Les paramètres :

Frequency band : F_0

Radiation pattern : G; E_3db_bw; H_3db_bw (définir G, E & H)

Material /physical properties: D; N (définir D & N)

Paramètre 01 :

$F_0 = 50\text{MHz}$

$G = 9.9\text{ dBi}$

$E_{3\text{db_bw}} = 45^\circ$

$H_{3\text{db_bw}} = 60^\circ$

$D = 59.96\text{ mm}$

$N = 14$

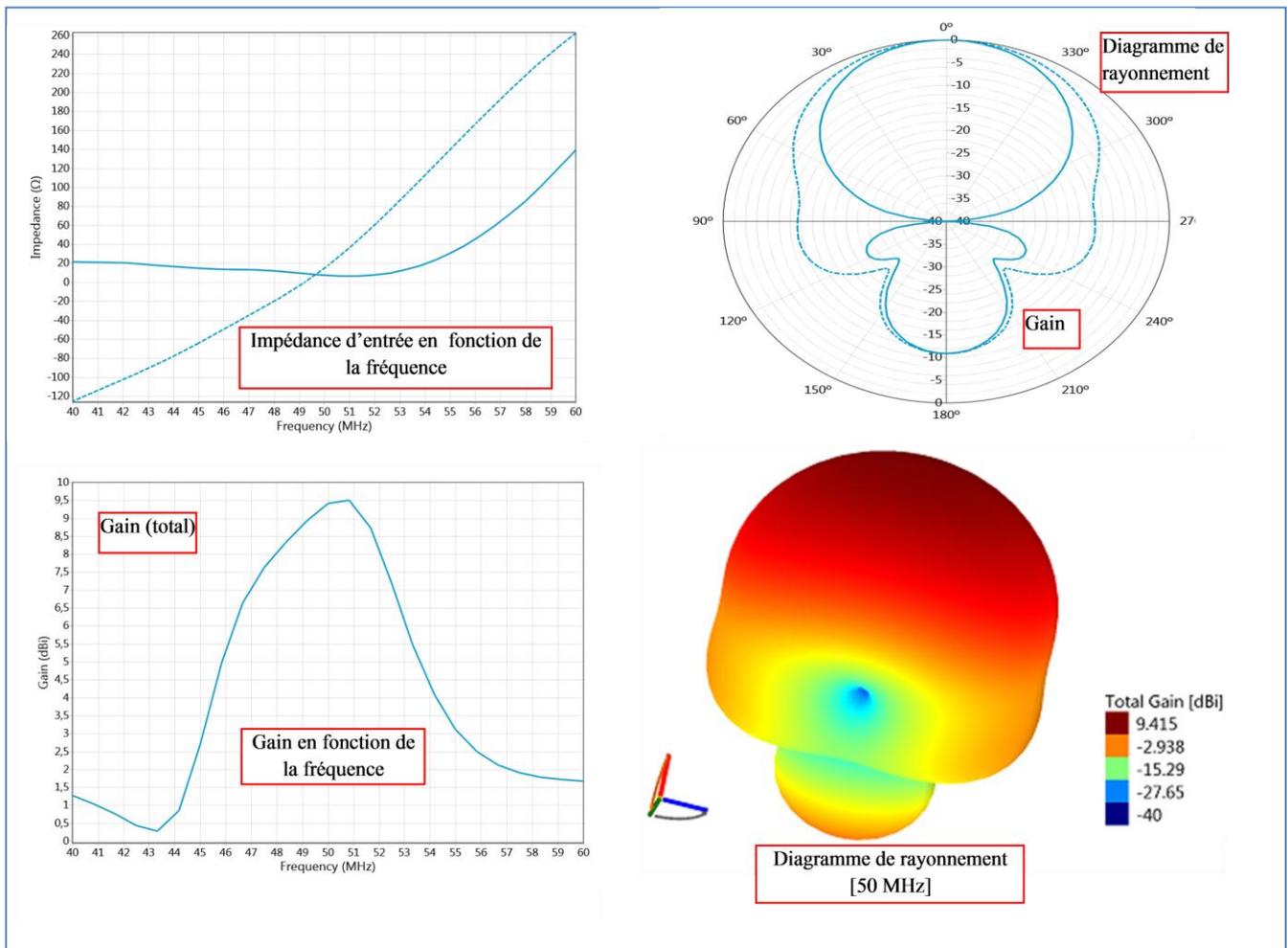


Figure III.1 : L'antenne Yagi pour les paramètres $F_0 = 50\text{ MHz}$; $G = 9.9\text{ dBi}$; $D = 59.96\text{ mm}$; $N = 14$

Paramètre 02 :

$$F_0 = 1 \text{ GHz}$$

$$G = 14 \text{ dBi}$$

$$E_{3\text{db_bw}} = 45^\circ$$

$$H_{3\text{db_bw}} = 60^\circ$$

$$D = 2.998 \text{ mm}$$

$$N = 3$$

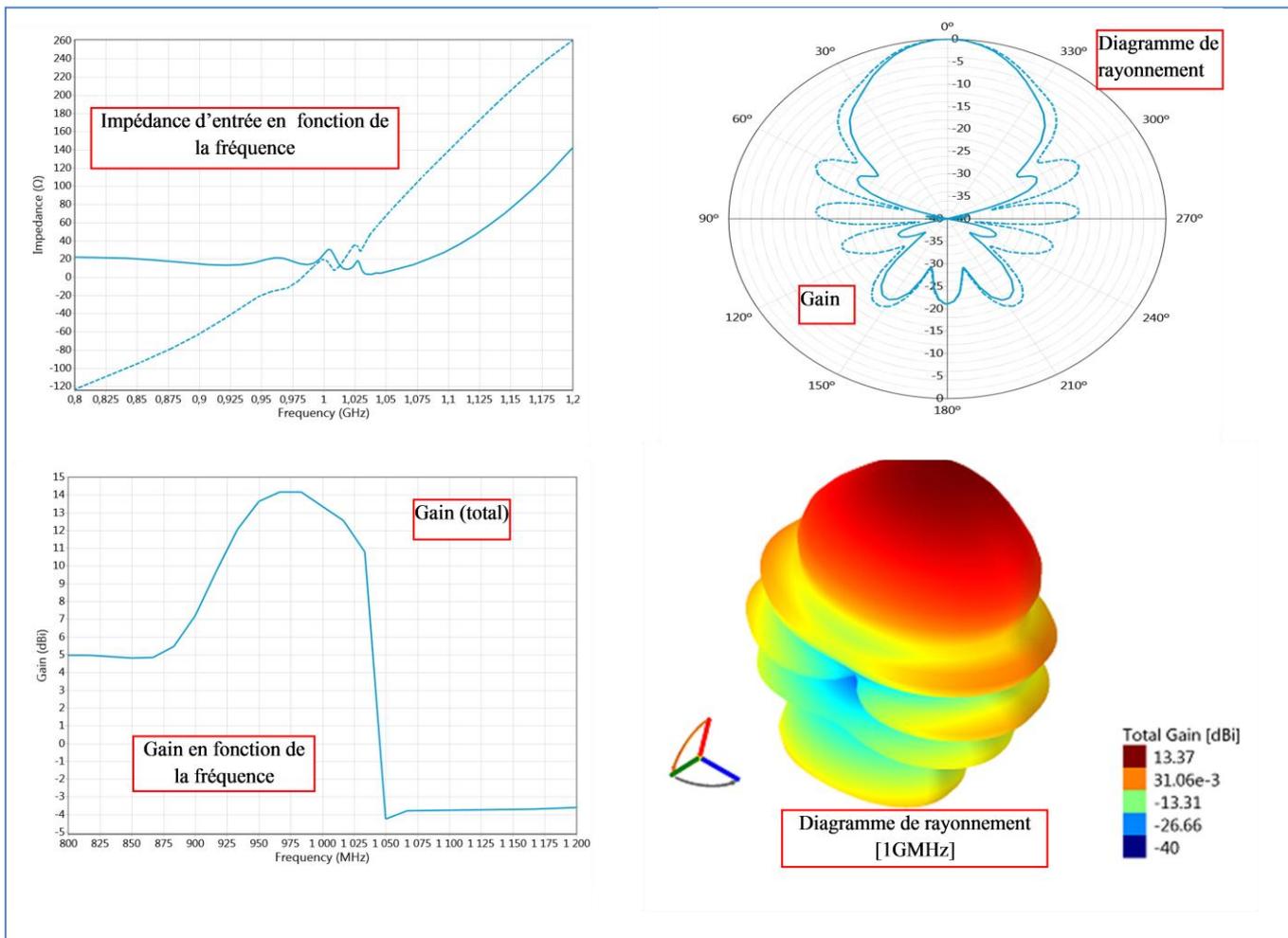


Figure III.2 : L'antenne Yagi pour les paramètres $F_0 = 1 \text{ GHz}$; $G = 14 \text{ dBi}$; $D = 2.998 \text{ mm}$; $N = 3$

Simulation de l'antenne dipôle par logiciel Magus :

F_0 : Frequency band

G : Radiation pattern

Q : Material/physical properties

Paramètre 01:

$F_0 = 50$ MHz

G = 9dBi

Q = 90^0

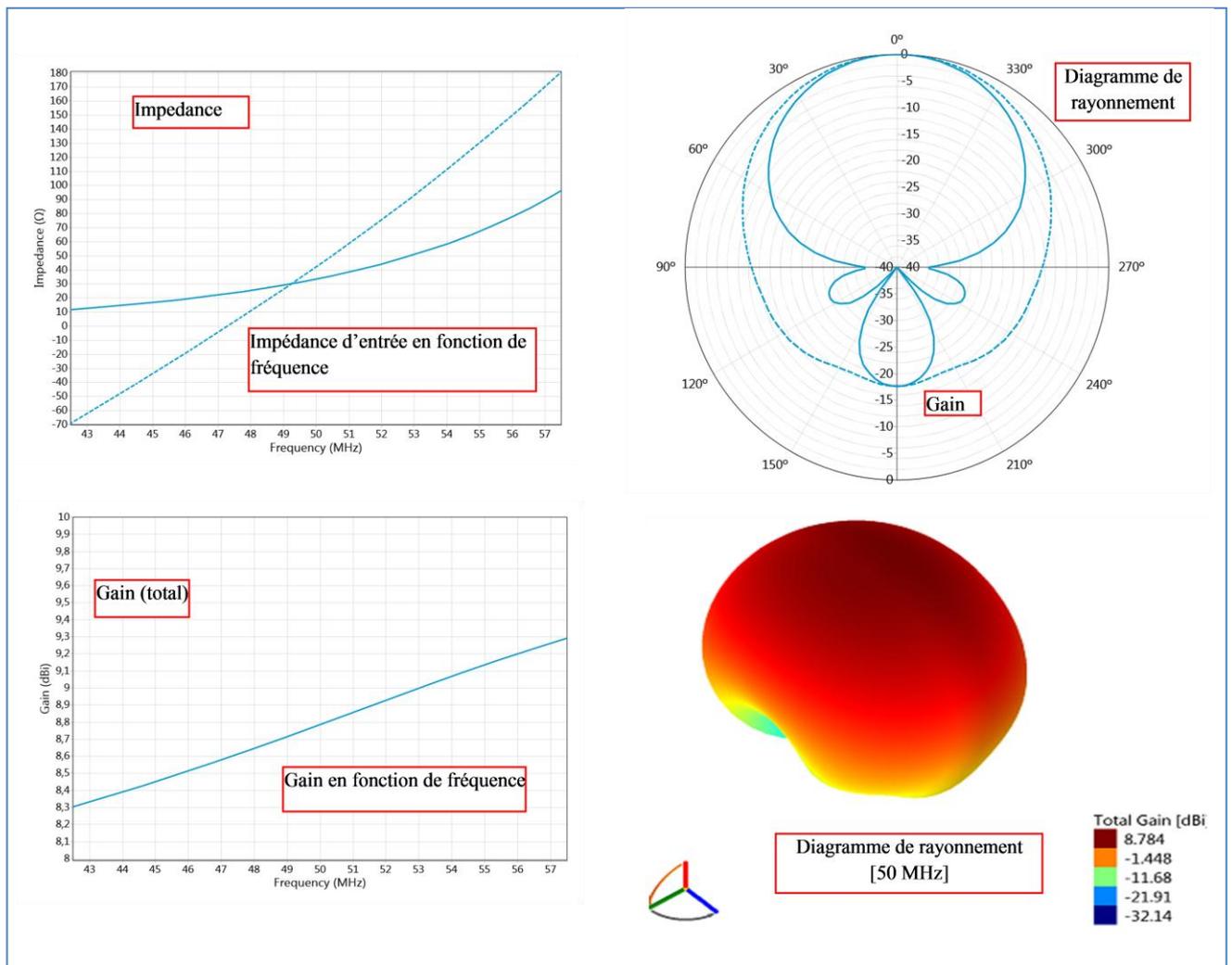


Figure III.3 : L'antenne dipôle pour les paramètres « $F_0 = 50$ MHz; G = 9dBi; Q = 900 »

Paramètre 02 :

$F_0 = 1 \text{ GHz}$

$G = 14 \text{ dBi}$

$Q = 135^0$

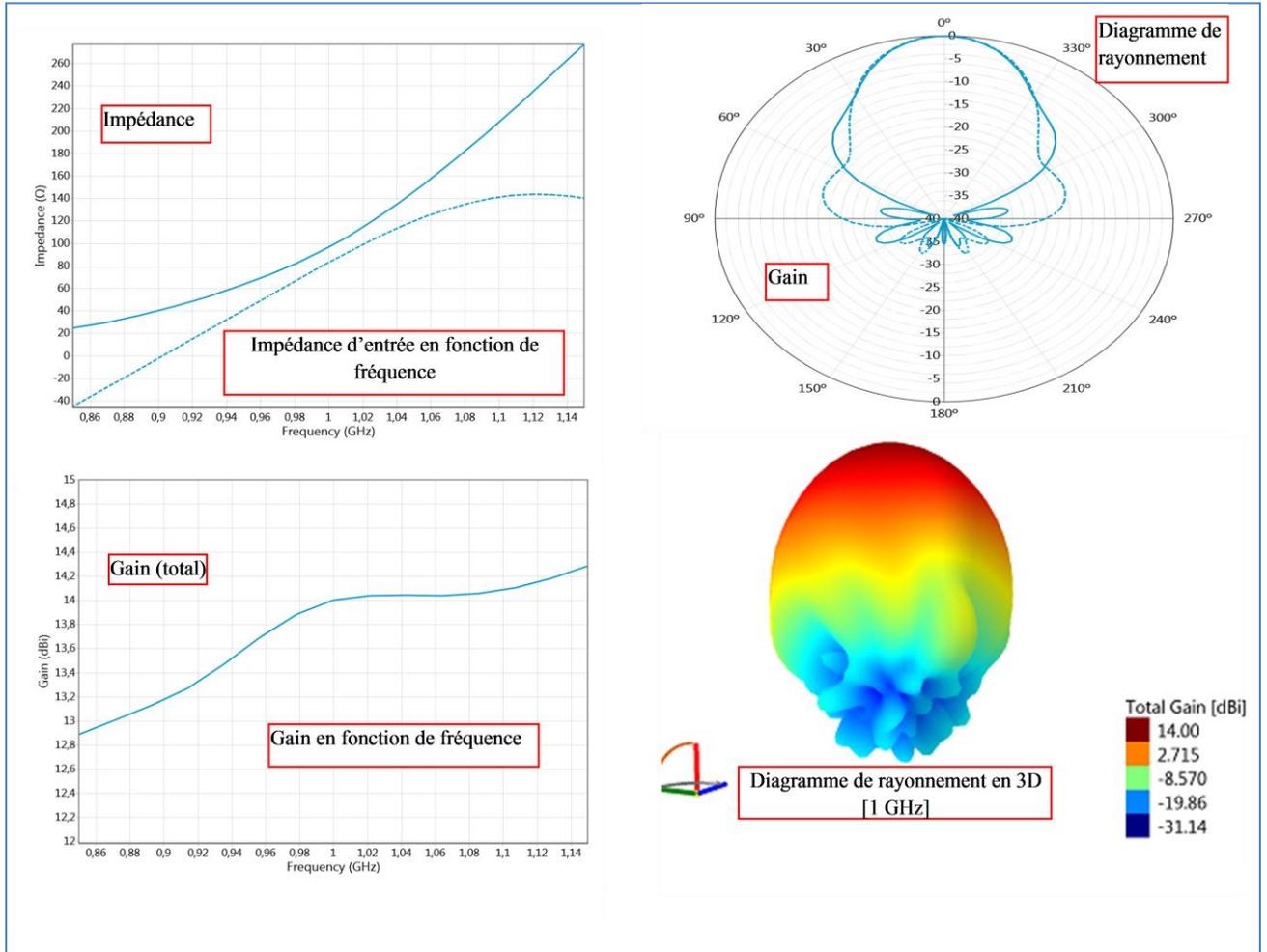


Figure III.4 : L'antenne dipôle pour les paramètres « $F_0 = 1\text{GHz}$; $G = 14 \text{ dBi}$; $Q = 1350$ »

Conclusion générale

Dans notre étude, on a traité deux types d'antennes, une antenne dipôle et l'autre Yagi. On a utilisé un logiciel récent en l'occurrence ANTENNA MAGUS. On a tracé les diagrammes de rayonnements pour ces différentes antennes moyennant plusieurs paramètres qui sont liés aux caractéristiques techniques des antennes. Pour une antenne sans pertes, le gain est égal à la directivité, l'augmentation du gain ne peut se faire qu'au détriment d'autres directions.

- Une antenne ne fonctionne pas à toutes les fréquences. La BP est limitée par :
 - Le TOS maximal admissible (désadaptation de l'antenne par rapport aux systèmes d'émission et/ou de réception), par exemple $TOS < 2$.
 - La variation du gain de l'antenne.
 - Par la déformation du diagramme de rayonnement
- Antennes à faible BP :
 - Eléments rayonnants résonants (dipôles demi-onde).
 - La largeur de bande se définit en % par rapport à la fréquence centrale.
 - $B \% = 100 * (F_s - F_i) / F_c$ (typiquement $B \% = 10$ à 20 %).
- L'antenne est caractérisée par :
 - Impédance (Ω).
 - Directivité (diagramme).
 - Gain, aire équivalente,...
 - Attention au champ proche.
 - Puissance, PIRE (dB, dBm, dBi).
 - Fréquence, bande passante.
- Le diagramme de rayonnement permet de refléter son fonctionnement dans l'environnement radio.

Seule la fonction de directivité est nécessaire.

- Validation, mesures en champ proche.
- Les dimensions d'une antenne sont relatives à la longueur d'onde électrique (l).
- Plus une antenne est petite ($< \lambda/4$), plus son rayonnement tend à être isotrope (dans toutes les directions).

Antenne dipôle :

- Economique.
- Rayonne perpendiculairement au brin.
- Impédance 73Ω .

Antennes YAGI :

- Un brin réflecteur légèrement plus long que le brin actif.
- Plusieurs brins directeurs un peu plus courts.
- On trouve des antennes YAGI comportant plus de 40 éléments dont le gain dépasse les 30 dB.

Les simulations ont donné des résultats satisfaisants quant aux tracés des diagrammes de rayonnements avec des paramètres qui ont été choisis pour décrire toutes les caractéristiques techniques des antennes classiques.

La simulation a permis de vérifier et d'évaluer avant montage différentes configurations et modifications de cette antenne. Une certaine optimisation a même été possible. La simulation permet aussi d'être à peu près sûr du bon fonctionnement de l'antenne une fois montée.

A part sur la bande des 15 m, il y a une bonne corrélation entre la simulation et les mesures. Cependant, j'aurais souhaité des résultats plus exacts. Ces différences sont probablement dues au fait que la maison et la proximité du sol n'ont pas été pris en compte pour ces simulations.

Une chose est sûre, toute prochaine antenne que je construirai, quelle que soit sa fréquence, sera d'abord simulée afin de vérifier son fonctionnement avant réalisation.

Récemment, MMANA s'est encore amélioré et a changé de nom. Il s'appelle maintenant MMANA-GAL.

Références bibliographiques

- [1] : E. Walker, H. J. Zepernick, T. Wysocki. “Fading measurements at 2.4 ghz for the indoor radio propagation channel”, International Zurich Seminar on Broadband Communications, pages 171–176, Zurich, Switzerland, February 1998.
- [2] : S. R. Saunders, A. Aragón-Zavala, “Antennas and propagation for wireless communication systems”, John Wiley & Sons, Ltd, 2nd Edition.
- [3] : C. A. Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design”, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
- [4] : J . D . Kraus , “Helical beam antennas,” Electronics, 20, 109-111, April 1947.
- [5] : G. A. Thiele , W. L. Stutzman , “Antenna Theory and Design”, New York: J. Wiley, 1981.
- [6] : T. E. Tice and J. D. Kraus, “The influence of conductor size on the properties of helical beam antennas,” Proc. IRE, 27, 1296, November 1949.
- [7] : H. E. King, J. L. Wong, “Characteristics of 1 to 8 wavelength uniform helical antennas”, IEEE Transaction Antennas Propagation, AP-28, 291-296, March 1980.
- [8] : J. L. Wong, H. E. King, “Empirical helix antenna design”, Antenna and Propagation Society International Symposium, vol. 20, 366-369, May 1982.
- [9] : D. T. Emerson, “The gain of the axial-mode helix antenna,” Antenna Compendium, 4, 64-68, 1995.
- [10] : A.S. Andrenko, “Modeling and design of 2-Element dual-band ceramic chip handset antennas”, IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 2012, Page(s): 296-299

[11] : H. Gazzah, S. Marcos, “Directive antenna arrays for 3D source localization” 4th IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2003. SPAWC 2003. Page(s): 619- 623

[12] : Chia-Lun Tang, “2.4/5.2 GHz dual-band chip antenna for WLAN application”, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005. Page(s): 454 - 457 Vol. 1A

[13] : L. Yi-Fang, L. Chia-Ho, C. Hua-Ming, J. Jen-Yea, C. Wen-Shan, “Design of ceramic chip antenna for 2.4/5 GHz WLAN applications”, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2006, Page(s): 985 - 988

[14] : A.C.W. Lu, K. M. Chua, L. L. Wai, S. C. K. Wong, J. J. Wang, Y. P. Zhang, “Integrated antenna module for broadband wireless applications”, 6th Electronics Packaging Technology Conference, 2004. EPTC 2004, Page(s): 240 – 243

[15] : Kramer, Oliver (2010) Conception et réalisation d'un récepteur composé de réseau d'antennes YAGI multicouches verticales et de composants en ondes millimétrique. Mémoire de maître, Ecole polytechnique de Montréal.

[16] : <http://www.smeter.net/antennas/magus.php>.

[17] : <http://hamsoft.ca/pages/mmana-gal.php>.

[18] : Folded Dipoles for VHF/UHF Yagis From in practice, RadCom(RGSB), April 1998.

[19] : Kramer, Oliver (2010) Conception et réalisation d'un récepteur composé de réseau d'antennes YAGI multicouches verticales et de composants en ondes millimétrique. Mémoire de maître, Ecole polytechnique de Montréal.