

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : TELECOMMUNICATION
Spécialité : Réseau et Télécommunication
Thème

**Simulation d'une nouvelle forme d'une antenne patch pour
un réseau d'antenne utilisé pour un petit satellite de
télécommunication en bande KA**

Présenté Par :

- 1) DIAFAROU Abdoul Madjid
- 2) DIARRA Abdoulaye

Devant le jury composés de :

Dr S. SOUIKI	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. M. DEBBAL	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. Amine RABAH	MRA	CDS (Oran)	Co-Encadrant
Dr S. FEROUANI	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2019/2020

DEDICACES

Je dédie ce travail minutieusement accompli, en raison du soutien merveilleux de mon entourage, à :

- Mes parents : Diafarou Amadou et Ramatou Aboubacar pour leur soutien et leur amour inconditionnel.
- Mes tontons : Seydou Diallo, Saybou Diallo, Mahamane Maiga, Siriman Sakho qui ont toujours répondu présents à mes attentes.
- Mes frères, sœurs et amis pour leurs encouragements.
- Mon mentor Mouatiou Soufountera pour ses conseils précieux.

Abdoul Madjid

DEDICACES

Je dédie ce travail minutieusement accompli, en raison du soutien merveilleux de mon entourage, à :

- Mes parents et ainsi qu'à toute ma famille.
- Mes frères, sœurs et amis, pour leurs encouragements.
- Mon professeur de math du second cycle monsieur Arouna Dao pour tous ses soutiens.

Abdoulaye

REMERCIEMENTS

Nous rendrons tout d'abord grâce à ALLAH (Dieu) de nous avoir donné le courage et la volonté de terminer ce projet sans embuches. Nous disons « ALHAMDOULILLAH »

Nous tenons à remercier profondément notre professeur et encadrant **M. Mohammed Debbal**, sans oublier notre Co-encadrant **M. Amine Rabah**. Ils ont su nous apporter le soutien seyant et favorable à l'accomplissement de ce projet de fin d'études. Ils ont été d'une disponibilité sans équivoque, toujours prompt à nous laisser l'aide qu'il faut et cela au moment opportun.

Notre gratitude, notre reconnaissance à leur égard reste une évidence.

Nous remercions très sincèrement les membres du jury qui ont pris le soin d'examiner minutieusement notre projet enfin de nous dévoiler la qualité qui en découle.

Un merci inestimable à nos familles et amis qui n'ont ménagés aucun soutien bien moral que matériel pour nous faire sourire, nous permettant ainsi d'avancer sans encombre.

A tous ceux non-cités qui nous ont été d'une aide précieuse pour la finition de ce projet, nous disons un grand merci.

RESUME

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou pour le capter. Comme nous le verrons dans cet ouvrage, il existe de nombreux types d'antennes.

Il est important d'avoir une connaissance globale de leur fonctionnement lors du choix d'un dispositif rayonnant. La compréhension de ce fonctionnement aidera, d'une part à utiliser l'antenne au mieux de ses performances et d'autre part, à en réaliser une conception optimale.

Les techniques de conception et de réalisation d'antennes se sont affinées au fur et à mesure que le domaine de l'électromagnétisme s'est développé. C'est un domaine relativement récent, puisque c'est en s'appuyant sur les équations de Maxwell que tous les développements théoriques et techniques ont pu progresser. Les avancées dans ce domaine ont été rapides car touchant aux transmissions radioélectriques dont le nombre d'applications est considérable.

Dans ce mémoire, nous présenterons la théorie liée aux antennes qui servira de base à leur conception.

Nous tenterons de classer les antennes par rapport à leur principe de fonctionnement et par rapport à leur rôle dans les systèmes. Nous attaquerons également les systèmes satellitaires de télécommunication en mettant en évidence leur fonctionnement et leur domaine d'application.

Nous terminerons par des principes de modélisation numérique en simulant l'exemple d'une antenne patch dont réside l'ultime objectif de ce projet de fin d'études.

Table des matières

Dedicaces	i
Remerciements	iii
Résumé	iv
Table de matieres	v
Table des figures.....	ix
Table des tableaux	xi
Table des acronymes.....	xii

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES

I. Introduction	4
II. Les équations de propagation.....	4
A. Equations de Maxwell	4
1. Présentation des équations de Maxwell.....	4
B. Onde électromagnétique – Propagation des ondes	6
1. Equation de propagation	6
III. Principe de fonctionnement des antennes	8
A. Antenne d'émission.....	8
B. Antenne de réception	8
C. Réciprocité.....	8
IV. Les caractéristiques d'antennes	9
A. Structure générale d'une antenne	9
B. Caractéristiques électriques des antennes	10
C. Caractéristiques de rayonnement.....	11
1. Diagramme de rayonnement.....	11
2. Les trois zones de rayonnement	12
3. L'efficacité de rayonnement	14
4. L'efficacité totale.....	14
5. Le gain intrinsèque.....	14
6. Le gain réalisé.....	14
7. La Directivité	15

TABLE DES MATIERES

8.	Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)	15
D.	Polarisation	15
1.	Perte de polarisation.....	16
E.	Largeur de bande	16
V.	Les différents types d'antennes	17
A.	Antenne dipolaire.....	17
B.	Boucle magnétique	18
C.	Antenne cornet	19
D.	Antenne à réflecteur.....	19
E.	L'antenne Yagi	20
F.	Antennes isotropes	21
1.	Définition d'une antenne isotrope (Au sens large).....	21
2.	Définition d'une antenne isotrope (Au sens strict)	21
VI.	Les antennes patch.....	21
A.	Définition d'une antenne patch	22
B.	Mécanisme de rayonnement d'une antenne patch	22
C.	Techniques d'alimentations	23
1.	Alimentation directe par une ligne micro ruban	23
2.	Alimentation par sonde coaxial	24
3.	Alimentation couplée par ouverture	24
4.	Alimentation couplée par proximité.....	25
D.	Technologie des antennes patches	26
1.	Le matériau conducteur.....	26
2.	Substrat	26
E.	Les techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes.....	27
F.	Les techniques d'ajustement du diagramme de rayonnement.....	28
G.	Types de réseaux d'antennes	29
1.	Réseaux linéaires à alimentation parallèle	30
2.	Réseaux bidimensionnelles.....	30
H.	Bilan de liaison	31
I.	Le bilan de liaison satellitaire	33
J.	Avantages et inconvénients des antennes patches	37
1.	Avantage	37

TABLE DES MATIERES

2. Inconvénients.....	37
VII. Conclusion	37
CHAPITRE II : SATELLITES DE TELECOMMUNICATION	
I. Introduction.....	39
II. Principe de télécommunication par satellite	39
III. Les services de communication par satellite.....	40
IV. Les types de satellite	41
A. Satellite passif ou miroir.....	41
B. Satellite actifs	41
1. Satellite transparent	41
2. Satellite régénératif	42
V. Evolution des satellites de télécommunication	42
VI. Les fréquences	43
VII. Caractéristiques principales des systèmes satellitaires.....	44
A. Les systèmes de télécommunication et orbites.....	44
1. Les systèmes GEO (Geostationary Earth Orbit)	44
2. Les systèmes MEO (Medium Earth Orbit.).....	45
3. Les systèmes LEO (Low Earth Orbit)	45
4. Les systèmes elliptiques.....	45
B. Les six paramètres orbitaux	46
1. Forme de l'orbite	46
2. Position du satellite sur l'orbite	46
3. Position de l'orbite dans son plan.....	46
4. Orientation du plan orbital	46
C. Lois de Kepler appliquées aux satellites artificiels	46
D. Connectivité.....	47
1. Liaison point à point.....	47
2. Liaison point à multipoints.....	48
3. Liaison multipoints interactifs.....	48
VIII. Architecture d'un satellite de télécommunication.....	49
A. Les différents modules des satellites	49
1. Le module de propulsion	50
2. Le module de service	50

TABLE DES MATIERES

3.	Le générateur solaire	50
4.	Le module de communication	50
5.	Le module des antennes	50
6.	Les transpondeurs.....	50
7.	Empreinte de pas	50
B.	Les stations terrestres	51
1.	Parabole	51
2.	LNB (Low Noise Block)	51
3.	Modem.....	52
4.	Mode d'utilisation des Satellites.....	52
C.	Les sous-systèmes d'un satellite de télécommunications	52
IX.	Conclusion	55

CHAPITRE III : SIMULATION ET RESULTATS

I.	Introduction	57
II.	Simulation d'une antenne patch dans la bande KA.....	57
A.	Simulation 1.....	57
B.	Simulation 2.....	61
C.	Simulation 3.....	64
III.	Conclusion	68

CONCLUSION GENERALE

Table des figures

CHAPITRE I

Figure I - 1: champs électrique et magnétique d'une onde plane se propageant en Z^+ dans un matériau à pertes	6
Figure I - 2: Surface équivalente d'une antenne	8
Figure I - 3 : Structure générale d'une antenne	9
Figure I - 4 : Modèle électrique d'une antenne-impédance d'entrée.	10
Figure I - 5: diagramme de rayonnement d'une antenne directive	12
Figure I - 6 : Les trois zones de rayonnement d'une antenne.....	13
Figure I - 7 : Puissances et pertes mises en jeu dans une antenne.....	14
Figure I - 8 : Différentes types de la polarisation.....	16
Figure I - 9 : Pertes de polarisation	16
Figure I - 10 : Bande passante et coefficient de réflexion.....	17
Figure I - 11 : Antenne dipolaire	18
Figure I - 12 : Boucle magnétique.	18
Figure I - 13 : Antenne cornet	19
Figure I - 14 : Antenne à réflecteur parabolique	20
Figure I - 15: L'antenne Yagi et son diagramme de rayonnement.....	20
Figure I - 16 : Structure d'une antenne patch rectangulaire.....	22
Figure I - 17 : Différentes formes de l'antenne patch.....	22
Figure I - 18: Distribution de charge	23
Figure I - 19: Distribution de champ.....	23
Figure I - 20 : Alimentation par une ligne micro ruban.....	24
Figure I - 21 : Alimentation par sonde coaxial.....	24
Figure I - 22 : Alimentation couplée par ouverture	25
Figure I - 23 : Alimentation couplée par proximité	26
Figure I - 24 : (a) Alimentation séries (b) Alimentation parallèle (c) Alimentation série-parallèle	27
Figure I - 25: Une antenne patch triangulaire	27
Figure I - 26: Réseau de deux antennes patch triangulaires en série et en parallèle	28
Figure I - 27 : Diagramme de rayonnement 2D en directivité de l'antenne réseau à 2 patches triangulaires alimentés en série et en parallèle.....	29
Figure I - 28: Réalisations de réseau à alimentation (a) linéaire en série, (b) linéaire en parallèle et (c) bidimensionnel en parallèle.....	30
Figure I - 29 : Alimentation parallèle de 23 éléments rayonnants par 3 étages de diviseurs de puissances.	30
Figure I - 30 : Réseau bidimensionnel formé de réseaux linéaires à alimentation série et (b) réseau bidimensionnel formé de réseaux linéaires à alimentation parallèle-série [9].	30
Figure I - 31 : (a) Réseau bidimensionnel à double alimentation parallèle et (b) grille dans le plan xOy , dont les nœuds représentent la position des éléments d'un réseau bidimensionnel rayonnant dans une direction $\Delta(\theta, \varphi)$	31

Figure I - 32 : Phénomène d'émission-réception	31
--	----

CHAPITRE II

Figure II - 1: Principe des communications par satellite.....	40
Figure II - 2: Evolution des systèmes de communication par satellite.....	43
Figure II - 3 : Les différents types d'orbites	45
Figure II - 4: Paramètres en rapport avec la forme de l'orbite	46
Figure II - 5:Liaison point à point.....	48
Figure II - 6:Liaison point à multipoints.....	48
Figure II - 7:Liaison multipoints interactifs.....	48
Figure II - 8: La station spatiale	49
Figure II - 9 : l'empreinte de pas du satellite.....	51
Figure II - 10:parabole	51
Figure II - 11:Les sous-systèmes d'un satellite de télécommunications	52
Figure II - 12: La charge utile d'un satellite de télécommunications	53
Figure II - 13 : Schéma simplifié de la fonction charge utile d'un satellite.	54
Figure II - 14 : Les canaux de la charge utile.....	54
Figure II - 15 : Exemple d'application d'un répéteur régénérateur	55

CHAPITRE III

Figure III- 1 : Simulation 1 : antenne patch de forme elliptique	57
Figure III- 2 : S-Paramètre de la simulation 1	58
Figure III- 3 : VSWR de la simulation 1	59
Figure III- 4 : Gain (IEEE) de la simulation 1.....	59
Figure III- 5 : Représentation du diagramme d'antenne en 3D pour une fréquence de 30 GHz	59
Figure III- 6 : Diagramme d'antenne en 1D	60
Figure III- 7 : Diagramme d'antenne pour Theta.....	60
Figure III- 8 : Diagramme d'antenne pour Phi	60
Figure III- 9 : Simulation 2 : Réseau d'antenne patch à trois éléments parallèles.....	61
Figure III- 10 : S-Paramètre de la simulation 2	61
Figure III- 11 : VSWR de la simulation 2	62
Figure III- 12 : Gain (IEEE) de la simulation 2.....	62
Figure III- 13 : Simulation 3 : Réseau d'antennes patch à six éléments parallèles.	64
Figure III- 14 : S-Paramètre de la simulation 3	64
Figure III- 15 : VSWR de la simulation 3	65
Figure III- 16 : Gain (IEEE) de la simulation 3.....	65
Figure III- 17 : Graphe du Paramètre S issu des 3 simulations.....	67
Figure III- 18 : Graphe du VSWR issu des 3 simulations.....	68
Figure III- 19 : Graphe du gain issu des 3 simulations.....	68

Table des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I- 1 : Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation	26
Tableau I- 2 : Paramètres de l'antenne réseau à 2 patches triangulaires alimentés en série et en parallèle.....	28

CHAPITRE II

Tableau II- 1 : Les bandes de fréquence pour les communications par satellites.	43
--	----

CHAPITRE III

Tableau III- 2 : Tableau comparatif des résultats issus des trois simulations.	67
---	----

Table des acronymes

ADSL :	Asymmetric Digital Subscriber Line
CAMP :	Channel Amplifier (amplificateur de canal)
CST :	Computer Simulation Technology
DAB :	Digital Audio Broadcasting
DTH :	Direct To Home
DVB-S :	Digital Video Broadcasting by Satellite
EIRP :	Effective Isotropic Radiated Power, Effective Isotropic Radiated Power
GEO :	Geostationary Earth Orbit
HEO :	Highly Elliptical Orbit
IMUX :	Input Multiplexer (multiplexeur d'entrée)
LEO :	Low Earth Orbit
LNA :	Low Noise Amplifier (amplificateur faible bruit)
LNB :	Low Noise Block
MEO :	Medium Earth Orbit.
OBP :	On-Board Processing
OMUX :	Output Multiplexer (multiplexeur de sortie)
PIRE :	Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente
RF :	Radio Frequency
SSPA :	Solid State Power Amplifier (amplificateur de puissance à semi-conducteur)
Standard IEEE :	Institut of Electrical and Electronics Engineers
TWTA :	Travelling Wave Tube Amplifier (amplificateur à tube)
VSAT :	Very Small Aperture Terminals
VSWR :	Voltage Standing Wave Ratio

INTRODUCTION GENERAL

Les premières antennes sont apparues à la fin du XIXe siècle, à une époque où les travaux sur l'électromagnétisme ont connu un développement considérable. Depuis, leur réalisation n'a cessé d'évoluer, d'abord, grâce aux progrès scientifiques de l'électromagnétisme, plus tard, sous la pression de nombreuses demandes technologiques dans des domaines d'application variés. L'essor actuel des communications impose des innovations importantes au niveau de la conception des systèmes et des antennes associées, dont les formes aujourd'hui très diverses varient beaucoup selon les utilisations : télécommunications mobiles, satellites, télévision, radio, identification, objets communicants...

Malgré cette grande diversité, toutes les antennes ont en commun de transformer un signal guidé en un signal rayonnant (ou réciproquement), dans un spectre électromagnétique relativement large allant des ondes radio aux hyperfréquences. Un principe fondamental régit leur rayonnement, celui de la diffraction des ondes.

Actuellement, la course à l'innovation concernant les systèmes de communication entraîne des études poussées dans le domaine des antennes. Dans ce contexte, les méthodes de conception, de mesures et de modélisation constituent une aide considérable. De nombreuses équipes contribuent à ce développement.

Ce projet a pour objectif de fournir les connaissances nécessaires à la compréhension du fonctionnement des antennes. Nous proposons successivement :

- Des bases théoriques sur le fonctionnement des antennes.
- Un classement des nombreux types d'antennes existants en précisant, d'une part leurs caractéristiques à partir d'une modélisation, et d'autre part leurs utilisations dans les systèmes.
- Des éléments de conception applicables à chaque type. Ceux-ci sont complétés par des principes de mesure et de simulation numérique.

Le projet débute par une présentation globale des antennes suivie du rappel de bases théoriques en électromagnétisme (chapitre 1). Par la suite interviennent les satellites de télécommunication dont leur étude s'appuie sur leur fonctionnement et leurs vastes domaines d'applications.

Nous clôturerons par un exemple de modélisation d'une antenne patch dont l'étude portera sur l'interprétation des résultats de simulation.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES

I. Introduction

Ce chapitre a pour but la présentation des différents types d'antennes appliquées dans le domaine de la communication. Il met en évidence les équations de propagation auxquelles on doit se conformer pour réguler la propagation ou la transmission. Nous verrons également que le principe de travail des antennes réside dans l'effet que produisent ses caractéristiques. Il met en valeur les caractéristiques générales de l'antenne comme le diagramme de rayonnement, l'angle de l'ouverture, directivité, gain et polarisation.

II. Les équations de propagation

A. 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. 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)

Equation de Maxwell- Gauss :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad \text{Equation I- 1}$$

Equation de Maxwell- Thompson

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{Equation I- 2}$$

Equation de Maxwell- Faraday

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt} \quad \text{Equation I- 3}$$

Equation de Maxwell- Ampère

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{d\vec{E}}{dt} \quad \text{Equation I- 4}$$

Avec :

- ρ : densité volumique de charge
- ε : permittivité électrique (F/m). A noter ε_r : permittivité diélectrique dans le vide (= 8.85e-12) et ε_r : permittivité électrique relative telle que :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \quad \text{Equation I- 5}$$

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 :

$$\mu = \mu_0 \times \mu_r \quad \text{Equation I- 6}$$

- σ : conductivité électrique du milieu (S/m)

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.

L'équation de Maxwell-Thompson indique qu'un courant induit un champ magnétique qui forme une boucle autour de ce courant. Contrairement au champ électrique créé par une charge, le flux de champ magnétique sortant de toute surface entourant la ligne parcourue par un courant est nul. En comparant cette équation avec celle de Maxwell-Gauss, on peut en conclure qu'il n'y a pas de charges magnétiques analogues aux charges électriques.

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 :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{I}_c \quad \text{Equation I- 7}$$

qui relie le champ magnétique au courant de conduction :

$$I_c = \sigma E \quad \text{Equation I- 8}$$

Il s'agit du flux d'électrons apparaissant dans un conducteur électrique entre chaque molécule lorsqu'on le soumet à une force électromotrice. Cependant, cette équation n'est pas suffisante pour expliquer l'existence d'un courant alternatif dans un circuit comprenant un condensateur. L'isolant présent entre chaque armature d'un condensateur ne permet pas la présence d'un courant de conduction à travers celui-ci. Cependant, sous l'influence du champ électrique variable apparaissant entre les 2 armatures chargées du condensateur, la variation de charge est identique sur les 2 armatures. Ce flux de charge en mouvement est appelé courant de déplacement

$$I_D = \varepsilon \frac{d\vec{E}}{dt} \quad \text{Equation I- 9}$$

B. Onde électromagnétique – Propagation des ondes

A partir des équations de Maxwell, il est possible de déterminer la distribution dans l'espace des champs électriques et magnétiques produits par une source.

Le couple formé par les champs électriques et magnétiques forme une onde électromagnétique. Ce terme vient du fait que, en raison des liens qui existent entre ces 2 champs, ceux-ci gagnent tout le milieu ambiant de proche en proche ou se propagent, à l'image d'une onde qui se forme à la surface d'un lac dans lequel on aurait jeté une pierre. Nous allons commencer par donner quelques éléments de démonstration succincts de ce comportement. Il est conseillé de se reporter à des ouvrages d'électromagnétisme pour un développement plus détaillé et rigoureux[1].

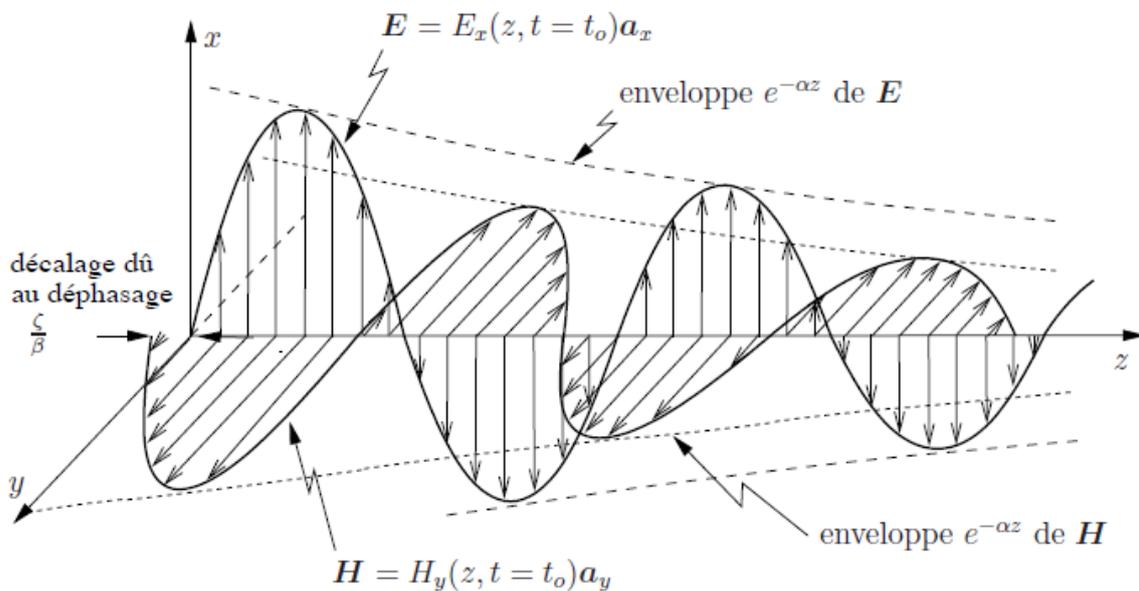


Figure I - 1: champs électrique et magnétique d'une onde plane se propageant en Z^+ dans un matériau à pertes[2]

1. Equation de propagation

La résolution des équations de Maxwell va nous permettre de déterminer l'équation de propagation des champs. Nous ne considérerons ici que le cas d'un milieu de propagation sans pertes caractérisé par une constante diélectrique et magnétique réelle, où il n'y a donc aucune charge et courant. En combinant alors les équations de Maxwell-Ampère et de Maxwell-Faraday, il est possible d'écrire les 2 équations différentielles dites de propagation :

$$\Delta \vec{E} - \epsilon\mu \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} = \vec{0} \quad \text{Equation I- 10}$$

$$\Delta \vec{H} - \epsilon\mu \frac{d^2 \vec{H}}{dt^2} = \vec{0} \quad \text{Equation I- 11}$$

Les solutions à ces 2 équations se comportent comme des ondes qui se propagent à la vitesse v :

$$1. \quad v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \times \mu}} \quad \text{Equation I- 12}$$

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES

. Dans le vide ou dans l'air, cette vitesse est notée c et est égale à

$C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \times \mu_0}} = 3.10^8 \text{ m/s}$. De manière générale, la vitesse peut s'écrire $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \times \mu_r}}$ en fonction de la permittivité électrique relative ϵ_r et la perméabilité magnétique relative du milieu μ_r .

Une onde qui se propage est appelée onde progressive.

En régime sinusoïdal et en considérant l'axe z comme la direction de propagation, la solution aux équations de propagation s'écrit :

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E} \cdot \exp j(\omega t - \beta z) = \vec{E}(z) \cdot \exp j(\omega t) \cdot \exp j(-\beta z) \quad \text{Equation I- 13}$$

$$\vec{H}(z,t) = \vec{H} \cdot \exp j(\omega t - \beta z) = \vec{H}(z) \cdot \exp j(\omega t) \cdot \exp j(-\beta z) \quad \text{Equation I- 14}$$

β est la constante de phase et caractérise la propagation:

$$\beta = \frac{\omega}{v} = \omega \sqrt{\epsilon \cdot \mu} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{Equation I- 15}$$

Remarque : propagation dans un milieu à pertes

Un milieu à pertes est caractérisé par un diélectrique présentant des pertes telles que la permittivité électrique s'écrit :

$$\epsilon = \epsilon' - i \frac{\sigma_e}{\omega} \quad \text{Equation I- 16}$$

Les équations de propagation restent quasiment identiques, hormis qu'on remplace la constante de phase β par un paramètre de propagation $\gamma = \alpha + i\beta$, où α est le paramètre d'atténuation qui traduit l'affaiblissement de la propagation. Ainsi, en se propageant, l'amplitude de l'onde est atténuée par un facteur $\exp(-\alpha z)$. Dans un environnement réel, une antenne peut être entourée de nombreux objets (voire d'êtres humains) qui vont absorber une partie de l'énergie transportée par l'onde électromagnétique. Selon les propriétés du milieu et la fréquence, cet affaiblissement exponentiel sera plus ou moins rapide. Elle est caractérisée par la profondeur de pénétration (ou épaisseur de peau pour les bons conducteurs) :

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu \sigma f}} \quad \text{Equation I- 17}$$

Au-delà d'une épaisseur δ , l'onde est atténuée d'un facteur $e^{-1} = 0.37$ dans un matériau à pertes. Un conducteur parfait présente une épaisseur de peau quasi nulle et est capable d'arrêter une onde électromagnétique quel que soit la fréquence. Par exemple, dans un bon conducteur comme le cuivre ($\sigma = 57 \text{ MS}$), l'épaisseur de peau est égale à 0.08 mm à 1 MHz et 2.5 μm à 1 GHz[1].

III. Principe de fonctionnement des antennes

A. 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.

B. 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[3].

Une antenne en réception capte une puissance P_A égale au produit de la densité de puissance à l'endroit où elle se trouve par un coefficient S_{eq} appelé surface équivalente de l'antenne. La surface équivalente correspond à la surface plane qui placée perpendiculairement à l'onde incidente capterait la même puissance que l'antenne considérée. La puissance électrique générée aux bornes d'une antenne s'écrit donc [1] :

$$P_A = S_{eq} \cdot P_R$$

Equation I- 18

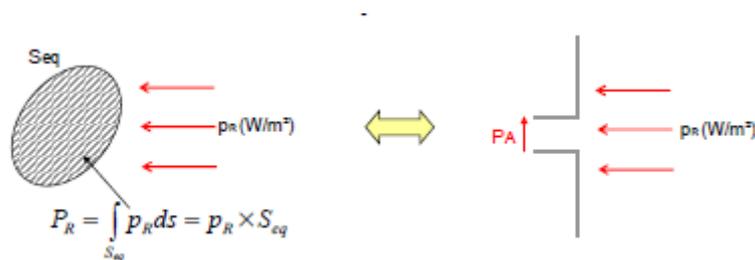


Figure I - 2: Surface équivalente d'une antenne[1]

C. 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[3].

IV. Les caractéristiques d'antennes

A. Structure générale d'une antenne

Dans ce chapitre, nous allons considérer uniquement des antennes émettrices. Cependant, il est nécessaire de supprimer toute distinction entre antenne émettrice et antenne réceptrice, en introduisant le principe de réciprocité : toute structure qui reçoit une onde électromagnétique peut transmettre une onde électromagnétique. Une antenne passive peut réciproquement être utilisée en émission et en réception. Les propriétés de l'antenne resteront les mêmes qu'elle soit utilisée en émission ou en réception.

La figure I-3 présente la structure générale d'une antenne émettrice. (Une antenne réceptrice présente une structure similaire, l'alimentation est remplacée par un récepteur, le sens des flèches indiquant le transfert de puissance est inversé) :

- Le signal à transmettre peut provenir d'une ou plusieurs sources (amplitude et phase des sources indépendantes). P_S correspond à la puissance électrique délivrée par la source.
- Des amplificateurs et des filtres peuvent être placés entre la source et l'antenne pour fournir une puissance électrique suffisante aux éléments rayonnants et assurer une émission (ou une réception) sur une bande étroite.
- L'émetteur ou le récepteur sont reliés à l'antenne par une ligne qui sont en général des lignes coaxiales ou des guides d'ondes. Ils permettent de transporter une puissance électrique P_A aux éléments rayonnants. La puissance P_A est différente de la puissance P_S en raison des pertes liées aux différents éléments reliant la source aux éléments rayonnants.
- Le réseau de polarisation permet de connecter les signaux à transmettre aux éléments rayonnants, de les déphaser et/ou de les combiner entre eux.
- Les éléments rayonnants assurent la transmission de l'énergie fournie par l'émetteur à l'espace libre où l'onde va se propager. La puissance rayonnée par l'antenne est notée P_R .

Réciproquement, elle assure la transmission de l'énergie d'une onde EM vers le récepteur.

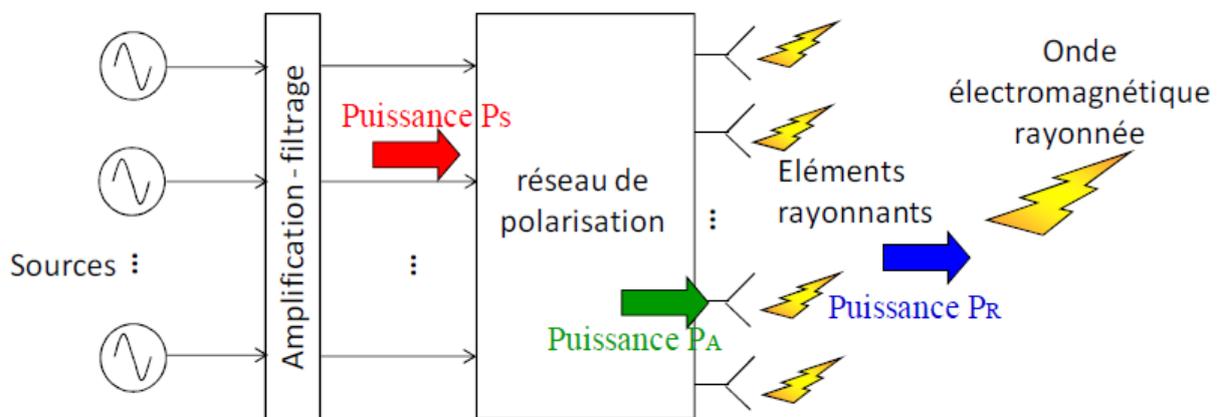


Figure I - 3 : Structure générale d'une antenne

Il est important que l'installation de l'antenne et sa connexion à la source nécessite d'autres structures non présentées sur le schéma, mais qui vont avoir une influence non négligeable sur les performances de l'antenne. L'antenne est montée mécaniquement sur un dispositif (un mat pour une station de base, le châssis d'un téléphone) qui va contribuer à modifier le rayonnement de l'antenne. En outre, l'antenne peut être protégée de l'environnement extérieur par un radome, qui peut absorber une partie du rayonnement[1].

B. Caractéristiques électriques des antennes

Par rapport au générateur, l'antenne peut être modélisée par un dipôle électrique série sous certaines conditions. L'impédance d'une antenne est l'impédance vue par les extrémités de l'antenne seule (non reliée à une charge) (Figure I - 4).

Cette impédance est définie comme le rapport entre la tension et le courant sur le port de l'antenne ou comme le rapport entre les composantes appropriées des champs électriques et magnétiques. L'excitation peut être considérée comme un générateur de Thevenin équivalent :

$$(V_G(\omega), \underline{Z}_G(\omega) = R_G(\omega) + jX_G(\omega)) \quad \text{Equation I- 19}$$

et le dipôle comme une impédance complexe passive $Z_A(\omega)$:

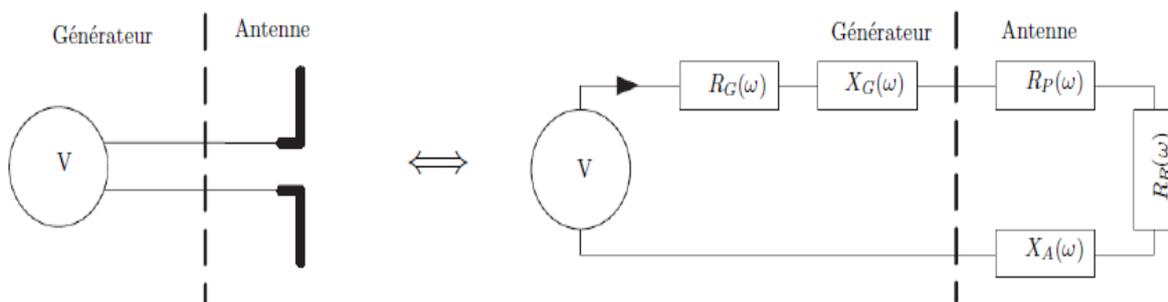


Figure I - 4 : Modèle électrique d'une antenne-impédance d'entrée.

$$\underline{Z}_A(\omega) = (R_P(\omega) + R_R(\omega)) + jX_A(\omega) \quad \text{Equation I- 20}$$

La résistance $R_P(\omega)$ correspond à la résistance de perte et $R_R(\omega)$ à celle de rayonnement.

L'impédance présentée par l'antenne au niveau du générateur est appelée la résistance d'entrée, car elle correspond à la charge ramenée au niveau du circuit par le dispositif rayonnant. Cette impédance est fonction de la géométrie et des matériaux de l'antenne, mais elle dépend également de la fréquence.

La puissance maximale transférée entre le générateur et l'antenne est obtenue

Lorsque :

$$\underline{Z}_G^* = \underline{Z}_A \quad \text{Equation I- 21}$$

condition sous laquelle nous avons adaptation d'impédance.

Généralement, l'impédance du générateur est considérée comme réelle pure et égale à 50Ω. Cependant en pratique, cette valeur ne peut être maintenue constante sur l'ensemble de la bande de fréquence. Aussi, plusieurs grandeurs sont introduites pour quantifier la désadaptation.

Le coefficient de réflexion est défini par $\Gamma(\omega)$:

$$|\underline{\Gamma}^2(\omega)| = \frac{\text{puissance réfléchi}(\omega)}{\text{puissance incidente}(\omega)} = \frac{p_{ref}(\omega)}{p_{in}(\omega)} \quad \text{Equation I- 22}$$

Il est également relié à l'impédance d'entrée par la relation suivante :

$$\underline{\Gamma}(\omega) = \frac{\underline{Z}_A(\omega) - \underline{Z}_0(\omega)}{\underline{Z}_A(\omega) + \underline{Z}_0(\omega)} \quad \text{Equation I- 23}$$

Où l'impédance $Z_0(\omega)$ est l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation, celle-ci étant souvent égale à 50Ω. L'efficacité de l'antenne (dus aux réflexions) est aussi introduite à partir du coefficient de réflexion par :

$$\rho(\omega) = 1 - |\underline{\Gamma}(\omega)|^2 \quad \text{Equation I- 24}$$

Enfin une autre manière de caractériser les désadaptations d'impédances et le rapport d'onde stationnaire (*ROS* ou *VSWR* : *Voltage Standing Wave Ratio*) défini par :

$$ROS(\omega) = \frac{1 + |\underline{\Gamma}(\omega)|}{1 - |\underline{\Gamma}(\omega)|} \quad \text{Equation I- 25} \quad [4]$$

C. Caractéristiques de rayonnement

1. Diagramme de rayonnement

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de « diagramme de rayonnement ». C'est la représentation du rayonnement en 2D ou 3D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné.

En général, le diagramme de rayonnement est relevé dans deux plans qui sont : **le plan E** (plan vertical) et **le plan H** (plan horizontal) ceux sont respectivement les plans pour lesquels les champs électriques et magnétiques atteignent leurs valeurs maximales. C'est un diagramme qui représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide

dans les différentes directions de l'espace. En réalité l'énergie rayonnée est répartie inégalement dans l'espace certaines directions sont privilégiées ce sont les lobes de rayonnement.

Un type plus pratique est l'antenne directionnelle qui rayonne plus de puissance dans certaines directions et moins de puissance dans d'autres directions. Le diagramme de rayonnement de l'antenne directive est représenté dans la « Figure I-5 »[5].

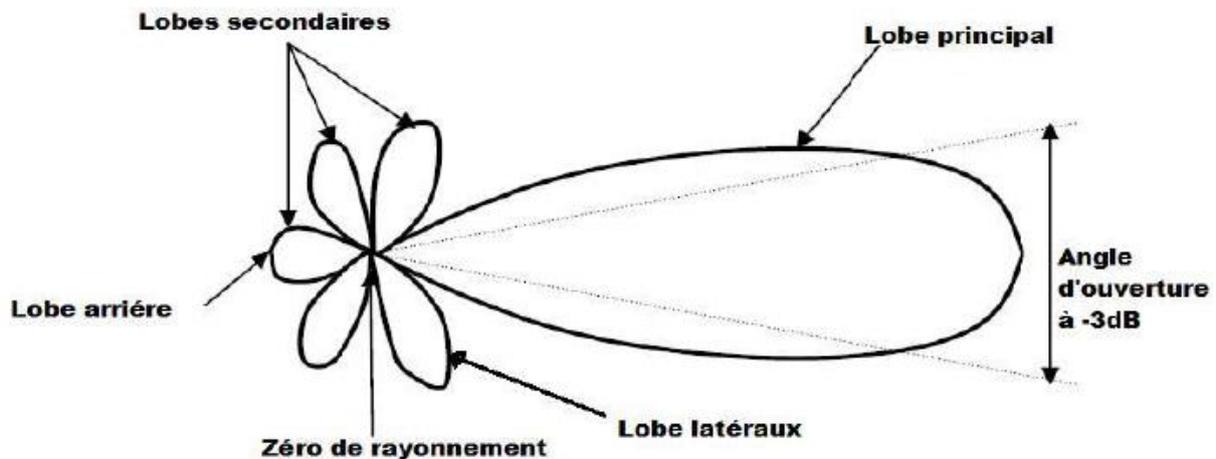


Figure I - 5: diagramme de rayonnement d'une antenne directive[5].

Le rayonnement d'une antenne directive met en évidence plusieurs paramètres :

- Un lobe principal :
C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.
- Un angle d'ouverture :
C'est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.
- Des lobes secondaires :
Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables.
- Un lobe arrière :
C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposé à 180° du lobe principal[5].

2. Les trois zones de rayonnement

L'espace de rayonnement de l'antenne est généralement subdivisé en trois régions, à savoir : (Figure I - 6)

a. Région réactive (zone de Rayleigh)

Cette région est délimitée par une sphère de rayon

$$R_1 = 0.62\sqrt{d^3/\lambda}$$

Equation I- 26

où λ est la longueur d'onde et "d" est la plus grande dimension de l'antenne. C'est la région entourant la source de rayonnement où la puissance réactive (purement imaginaire) prédomine.

b. Région du champ proche rayonné (zone de Fresnel)

C'est la région comprise entre la zone réactive et la zone du champ lointain et dans laquelle la divergence du faisceau devient appréciable. Cette région est délimitée par une distance radiale R telle que $R_1 \leq R < R_2$. Avec

$$R_2 = 2d^2/\lambda$$

Equation I- 27

et le champ rayonné dépend, en général, de la distance radiale. De plus, la composante radiale du champ est appréciable.

c. Région du champ lointain (zone de Fraunhofer)

Dans cette région, l'onde rayonnée est plane et les champs ont une structure TEM par rapport à la direction radiale. La puissance rayonnée est purement réelle et indépendante de la distance radiale[6].

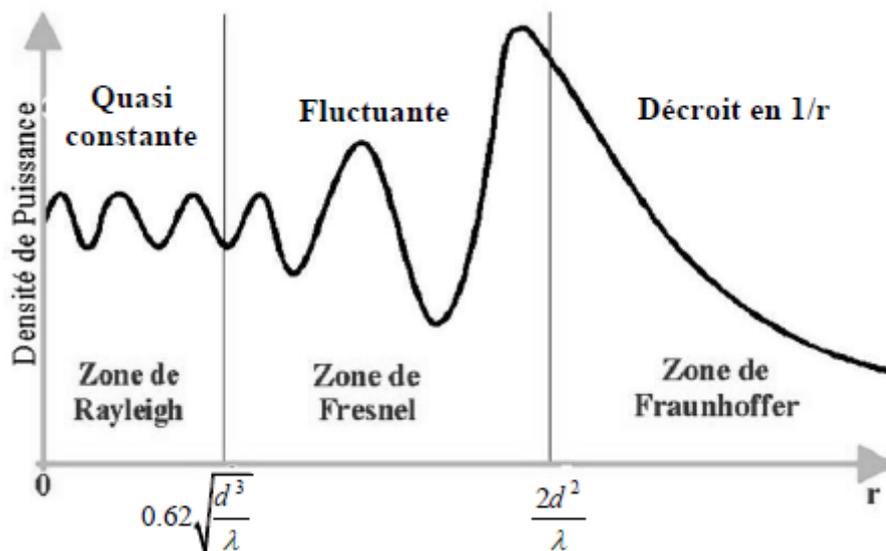


Figure I - 6 : Les trois zones de rayonnement d'une antenne[6].

Les caractéristiques de rayonnement des antennes reposent sur la caractérisation du champ rayonné, à grande distance dans tout l'espace, qui inclue la répartition spatiale de l'énergie rayonnée et la polarisation du champ. Les données de puissance en émission ou en réception complètent alors la description. Les caractéristiques de rayonnement d'une antenne sont définies dans la zone de champ lointain (ou zone de Fraunhofer). La zone de champ lointain est atteinte lorsque nous sommes à une distance d supérieure à $2D_2/\lambda$ (D étant le diamètre de la plus petite sphère entourant l'antenne). Les grandeurs suivantes ont été définies pour caractériser le rayonnement d'une antenne.

3. L'efficacité de rayonnement

L'efficacité de rayonnement (ou rendement) $e_{ray}(\omega)$ est définie comme le rapport de la puissance rayonnée à la puissance incidente sur le port de l'antenne. Elle traduit les pertes à l'intérieur des matériaux constitutifs de l'antenne :

$$e_{ray}(\omega) = \frac{P_{ray}(\omega)}{P_{inj}(\omega)} \quad \text{Equation I- 28}$$

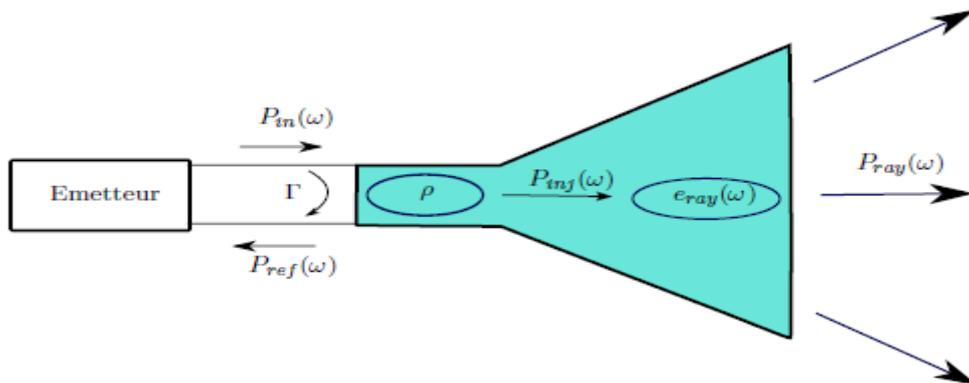


Figure I - 7 : Puissances et pertes mises en jeu dans une antenne

4. L'efficacité totale

L'efficacité totale $e_{tot}(\omega)$ tient compte de l'ensemble des pertes : pertes par désadaptation de l'antenne et pertes liées à la structure de l'antenne :

$$e_{tot}(\omega) = \frac{P_{ray}(\omega)}{P_{in}(\omega)} = e_{ray}(\omega) \cdot \rho \quad \text{Equation I- 29}$$

Les pertes et puissances mises en jeu dans une antenne sont schématisées dans la Figure I-7

5. Le gain intrinsèque

Le gain intrinsèque (ou gain standard IEEE) $Gi(\vartheta, \varphi)$ est défini comme le rapport de 4π fois l'intensité de rayonnement $U(\vartheta, \varphi, \omega)$ divisée par la puissance injectée.

Les pertes diélectriques ou ohmiques dans la structure rayonnante sont prises en compte.

$$Gi((\vartheta, \varphi, \omega)) = \frac{4\pi U(\vartheta, \varphi, \omega)}{P_{inj}(\omega)} \quad \text{Equation I- 30}$$

6. Le gain réalisé

Le gain réalisé (ou gain effectif) $Gre(\vartheta, \varphi)$ est défini par rapport à la puissance incidente sur le port de l'antenne. Par rapport au gain intrinsèque, il prend ainsi en compte l'ensemble des

perdes de l'antenne, désadaptation comprise. Ce gain réalise est usuellement mesure en chambre anéchoïde. Il intègre toutes les pertes de l'antenne dans l'étude du bilan de liaison d'un système de communication.

$$G_{re}(\theta, \varphi, \omega) = \rho G_i(\theta, \varphi, \omega) = \frac{4\pi U(\theta, \varphi, \omega)}{P_{in}(\omega)} \quad \text{Equation I- 31}$$

7. La Directivité

La Directivité $D(\vartheta, \varphi)$ est définie par rapport à la puissance rayonnée P_{ray} . Elle mesure la capacité de l'antenne à fournir dans une direction donnée une densité de puissance plus forte ou plus faible que l'antenne isotrope.

$$D(\theta, \varphi, \omega) = \frac{G_i(\theta, \varphi, \omega)}{e_{ray}(\omega)} = \frac{G_{re}(\theta, \varphi, \omega)}{e_{tot}(\omega)} = \frac{4\pi U(\theta, \varphi, \omega)}{P_{ray}(\omega)} \quad \text{Equation I- 32 [4]}$$

8. Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)

La puissance isotrope rayonnée équivalente d'une antenne (PIRE ou EIRP : Effective Isotropic Radiated Power en anglais) est un terme souvent utilisé en télécommunications (principalement dans les bilans de liaison) qui définit, dans la direction de rayonnement maximal, la puissance électrique qu'il faudrait apporter à une antenne isotrope pour obtenir la même puissance rayonnée dans cette direction. Elle se calcule selon l'équation 33.

$$PIRE = G \times P_A \quad \text{Equation I- 33 [1]}$$

D. Polarisation

La polarisation d'une antenne est la propriété décrivant la variation temporelle de la direction et du module du champ électrique rayonné par cette antenne. Elle est caractérisée par la courbe décrite dans le temps par l'extrémité du vecteur champ électrique et observée à partir de la direction de propagation[6].

- Polarisation linéaire, si au cours de la propagation, le vecteur E ne change pas de direction avec la distance, nous disons que nous avons une polarisation linéaire.
- Polarisation elliptique Si au cours de la propagation, le vecteur E change de direction en synchronisme avec la longueur d'onde, nous disons que nous avons une polarisation "elliptique" (figure que décrit la direction du vecteur E sur une longueur d'onde). Si le petit axe de l'ellipse est égal à zéro, nous avons une polarisation linéaire.

Si les deux axes sont égaux, nous avons une polarisation circulaire.

- Polarisation circulaire c'est un cas particulier de la polarisation elliptique lorsque les deux axes sont égaux.

La polarisation elliptique peut être "droite" ou "gauche" selon que les vecteurs tournent dans le sens négatif ou positif au cours de la propagation (en regardant l'onde s'enfuir). Tout ceci est résumé sur la figure I-8[7].

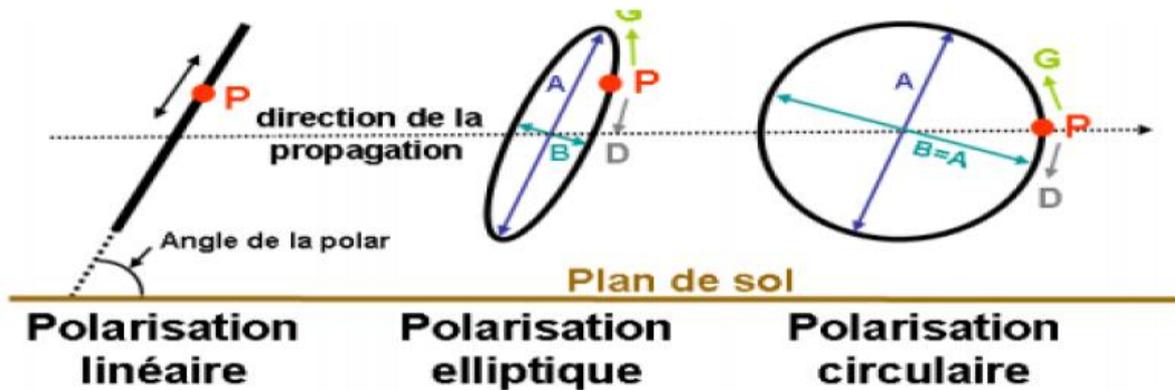


Figure I - 8 : Différentes types de la polarisation[7].

1. Perte de polarisation

Pour optimiser la réception d'un signal radioélectrique, la polarisation de l'onde électromagnétique et celle de l'antenne réceptrice doivent être les mêmes (Figure I-9). Dans le cas d'une liaison entre 2 antennes à polarisation rectiligne, la perte de polarisation dépend de l'angle α entre les 2 antennes qui représente la différence d'alignement[1].

$$L_{pol} (dB) = 20.log(\cos \alpha)$$

Equation I- 34

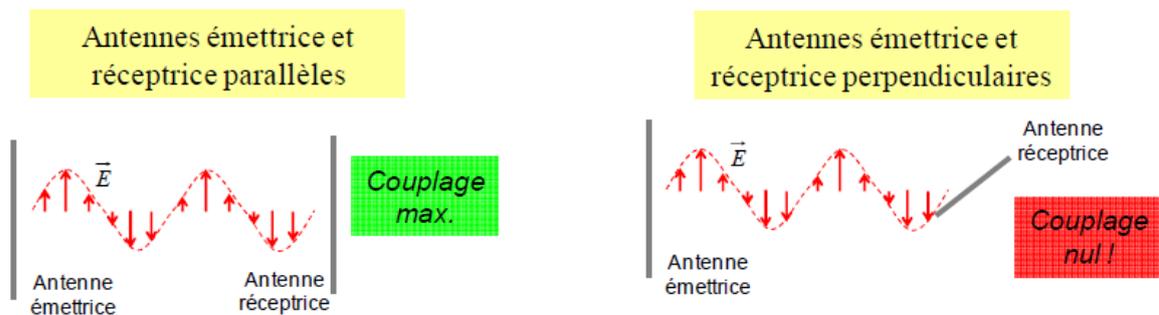


Figure I - 9 : Pertes de polarisation [1]

E. Largeur de bande

La largeur de bande, appelée aussi bande passante, d'une antenne définit le domaine de fréquences dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises. Il s'agit la plupart du temps de la puissance transmise par l'antenne, mais on peut définir d'autres caractéristiques exigées pour le fonctionnement d'une antenne telle que la polarisation. Il se peut par exemple qu'une polarisation circulaire soit recherchée et obtenue seulement dans une bande de fréquence.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES

Dans la suite, nous allons définir la bande de fréquence relative à la puissance de rayonnement. La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situé entre une valeur minimale f_1 et une valeur maximale f_2 . La bande de fréquence

Df est définie par la différence entre ces deux fréquences :

$$Df = f_2 - f_1 \quad \text{Equation I- 35}$$

La largeur relative de bande B_r est un pourcentage exprimant le rapport de la bande à la fréquence centrale f_0 .

$$B_r = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad \text{Equation I- 36}$$

La largeur de bande est aussi définie par le rapport entre les deux fréquences extrêmes :

$$B_f = \frac{f_2}{f_1} \quad \text{Equation I- 37}$$

Dans le cas d'antennes de faible largeur de bande, la première définition est plus utilisée, alors que la seconde est plutôt utilisée pour les antennes larges bandes.

Pour connaître la largeur de bande d'une antenne relativement au rayonnement, on trace le paramètre S_{11} de réflexion en fonction de la fréquence. On admet généralement que si ce paramètre est inférieur à -10 dB, la puissance de rayonnement est suffisante. Il suffit alors de repérer sur la courbe les valeurs de la fréquence correspondant à cette valeur[3].

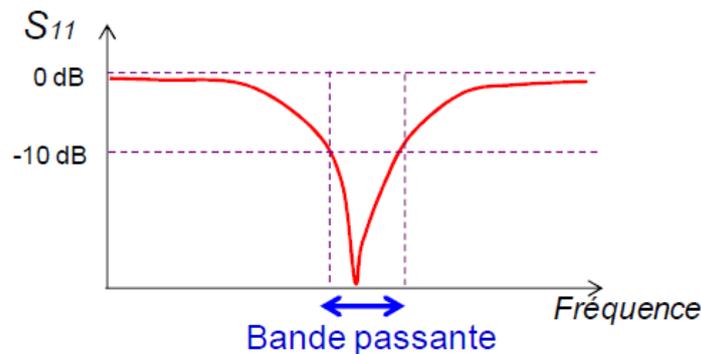


Figure I - 10 : Bande passante et coefficient de réflexion[1].

V. Les différents types d'antennes

A. 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 (figure I-11). 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. Dans la ligne bifilaire, les courants sont de sens contraire, alors que dans le dipôle les courants sont dans le même sens. L'influence de ces deux courants s'annule dans la ligne bifilaire. Ce sont les courants variables,

de même sens, qui rayonnent et créent l'onde électromagnétique dans l'espace. Étant donnée la symétrie du dipôle, le rayonnement s'effectue autour de l'axe, matérialisé par le fil. Il est isotrope dans un plan perpendiculaire à cet axe. Le rayonnement est nul dans la direction du fil. On ne peut donc pas parler d'un rayonnement isotrope.

À l'extrémité de chaque fil apparaissent des charges de signes opposées dont l'existence s'explique par la conservation de la charge. En effet, la relation de conservation suivante lie les charges au courant[3] :

$$I = \frac{dq}{dt} \quad \text{Equation I- 38}$$

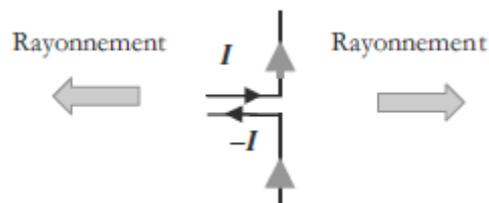


Figure I - 11 : Antenne dipolaire[3].

B. Boucle magnétique

La boucle magnétique est constituée d'un fil conducteur ayant une forme qui permet le retour du fil sur lui-même (figure I-12). 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[3].

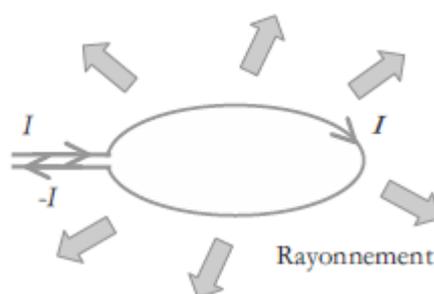


Figure I - 12 : Boucle magnétique[3].

C. Antenne cornet

Les antennes cornet sont des guides d'ondes dont la section augmente progressivement avant de se terminer par une ouverture rayonnante, dont la section peut être rectangulaire, carrée ou circulaire. Suivant la forme du cornet, il est possible d'obtenir un diagramme de rayonnement fin soit dans le plan E, soit dans le plan H, soit les deux[1].

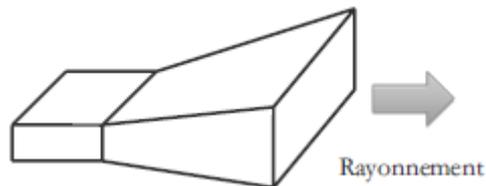


Figure I - 13 : Antenne cornet[3].

D. Antenne à réflecteur

Les antennes à réflecteur sont très utilisées dans les télécommunications par faisceau hertzien, qu'elles soient terrestres ou spatiales, en raison de leur fort gain et de la concentration de la puissance rayonnée dans un seul faisceau. De nombreuses antennes contiennent des réflecteurs plans situés en face arrière, qui permettent de bloquer un lobe dans la direction du lobe principal. Dans le cas de faisceau hertzien, les réflecteurs employés sont de forme parabolique. Lorsqu'une source primaire est placée en leur foyer, ces réflecteurs sont capables de concentrer la puissance réfléchie dans un faisceau étroit. Nous allons nous intéresser uniquement à ce type de réflecteur.

La figure I-14 décrit le principe de rayonnement d'une antenne à réflecteur parabolique. Une source primaire (antenne cornet) est placée au foyer du réflecteur parabolique de manière à produire une onde sphérique. Cette onde incidente va interagir de deux (2) manières avec le réflecteur :

- La majeure partie de l'onde incidente interceptée par le réflecteur va y induire des courants de surface, qui vont à leur tour produire un rayonnement. La surface du réflecteur va donc se comporter comme une source secondaire d'après le principe de Huygens, que nous avons utilisé pour les ouvertures rayonnantes. La forme du réflecteur permet de focaliser le rayonnement dans un faisceau étroit. On parle d'un rayonnement par diffusion.
- Le champ incident qui arrive sur le bord du réflecteur produit un rayonnement par diffraction (que nous allons négliger) [1].

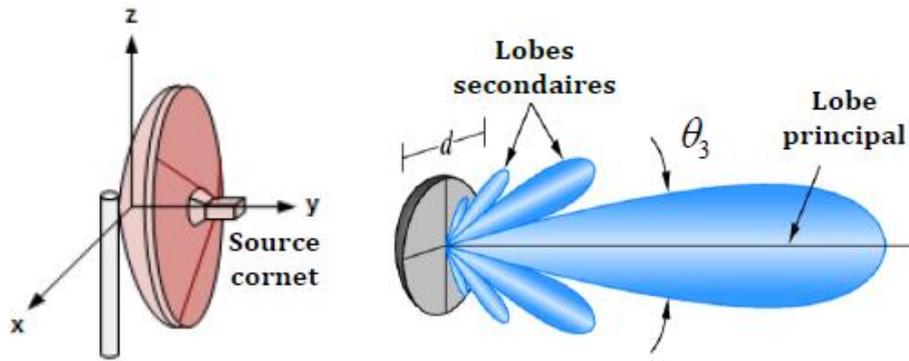


Figure I - 14 : Antenne à réflecteur parabolique[6].

E. L'antenne Yagi

L'antenne Yagi est constituée d'un dipôle actif (le radiateur qui est généralement un dipôle replié), auquel on a associé un ou plusieurs éléments passifs, appelés directeur(s) et réflecteur (Figure I - 15). Lorsque le dipôle actif est alimenté, il émet des ondes électromagnétiques, les dipôles passifs vont être excités par des courants et ils vont rayonner à leur tour. Le champ rayonné est la somme des champs émis par tous les éléments rayonnants. La présence d'éléments passifs diminue la résistance de rayonnement de l'antenne.

Le champ rayonné par cette antenne est relativement difficile à calculer, dans la mesure où tous les éléments interagissent les uns avec les autres. Etant donné l'asymétrie de l'antenne, le diagramme de rayonnement dans le plan de l'antenne est relativement unidirectionnel (Figure I-15) dans un angle d'ouverture d'environ $40^\circ \times 40^\circ$. Le gain typique de l'antenne Yagi varie entre 5 et 15 dBi (le gain c'est en dBi), sa polarisation est linéaire horizontale et sa résistance de rayonnement est approximativement égale à celle de son dipôle rayonnant ($R_r = R_{in} < 300\Omega$ dans le cas du dipôle replié). Ce type d'antenne est généralement utilisé dans la bande de fréquence de 50 MHz à 2 GHz[6].

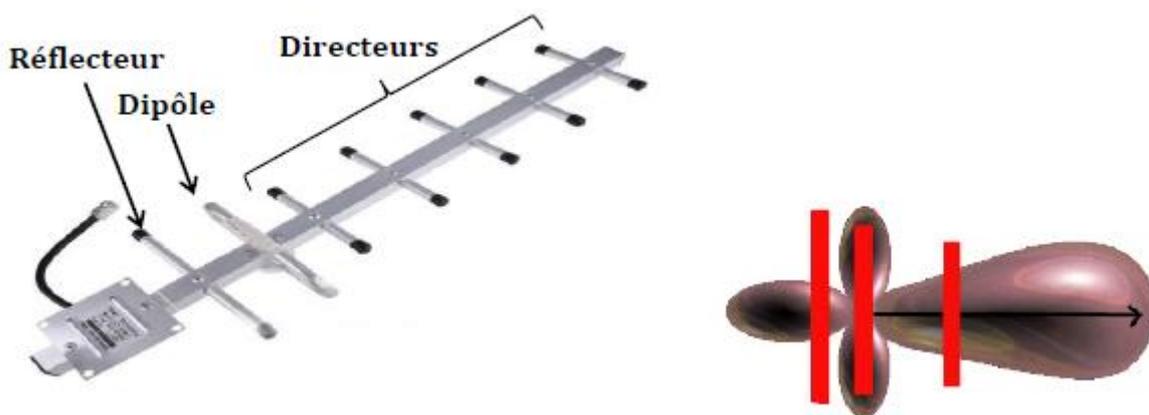


Figure I - 15: L'antenne Yagi et son diagramme de rayonnement[6].

F. Antennes isotropes [8]

S'il semble évident qu'une antenne isotrope est une antenne dont le rayonnement en puissance est égal en toute direction, il reste une indétermination sur l'état de polarisation.

Nous proposons donc deux définitions pour l'isotropie d'une antenne.

1. Définition d'une antenne isotrope (Au sens large)

Une antenne isotrope est une antenne dont le rayonnement est égal en puissance en toute direction sans aucune contrainte sur ses états de polarisation. La contrainte d'isotropie de la puissance rayonnée peut être interprétée de façon plus ou moins forte :

- Le rayonnement ne présente aucune direction d'annulation (c'est-à-dire contrairement au cas d'un dipôle) mais une variation de la puissance rayonnée dans différentes directions est tolérée ;
- Le rayonnement présente une puissance rigoureusement égale en toute direction.

Dans la pratique, notamment dans notre contexte d'application, un écart relativement faible de la puissance rayonnée selon les directions (typiquement quelques décibels) ne sera pas déterminant.

2. Définition d'une antenne isotrope (Au sens strict)

Une antenne isotrope est une antenne dont le rayonnement est égal en puissance en toute direction et dont l'état de polarisation est uniforme en toute direction. La contrainte sur l'uniformité de l'état de polarisation peut être interprétée plus ou moins strictement :

- Le rayonnement présente un état de polarisation aussi uniforme que possible en toutes directions ;
- Le rayonnement présente un état de polarisation rigoureusement uniforme en toutes directions.

VI. Les antennes patch

Le développement du domaine des télécommunications ont fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants faisant appel à une technologie simple à manipuler. Les systèmes micro-ondes à structure micro ruban ont été à l'origine de développement des antennes imprimés.

Les antennes imprimées sont les plus utilisées puisqu'elles permettent de répondre à de nombreuses contraintes imposées par le système de transmission .Leurs dimensions favorisent leurs intégrations sur de nombreux mobiles (téléphone portable, avion. . .).

Dans cette partie du chapitre 1 on trouve une présentation générale sur les antennes patches ainsi que leurs caractéristiques, les différentes méthodes d'alimentation et principe de fonctionnement en terminant par les avantages et limitations de ces dernières[9].

A. Définition d'une antenne patch

Une antenne patch est un élément rayonnant, se compose d'une pièce métallique rayonnante (matériaux conducteur, patch ou élément rayonnant) de forme arbitraire, déposée sur un substrat diélectrique. Un plan de masse couvre la surface inférieure du substrat (Figure I - 16)

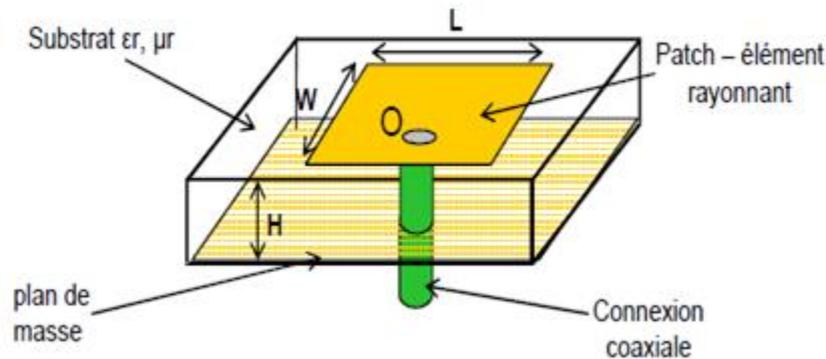


Figure I - 16 : Structure d'une antenne patch rectangulaire [9].

Le patch est généralement fabriqué à base d'un matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or, et il peut prendre n'importe quelle forme possible. L'élément rayonnant et les lignes d'alimentation sont photos gravées sur le substrat diélectrique[10, 11].

Les formes des éléments rayonnants sont montrés sur la (Figure I-17), leurs dimensions sont faibles et sont généralement de l'ordre de $\lambda/2$ à λ .

Une antenne patch rectangulaire est une forme de base, elle est facile à modéliser pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes micro bandes.

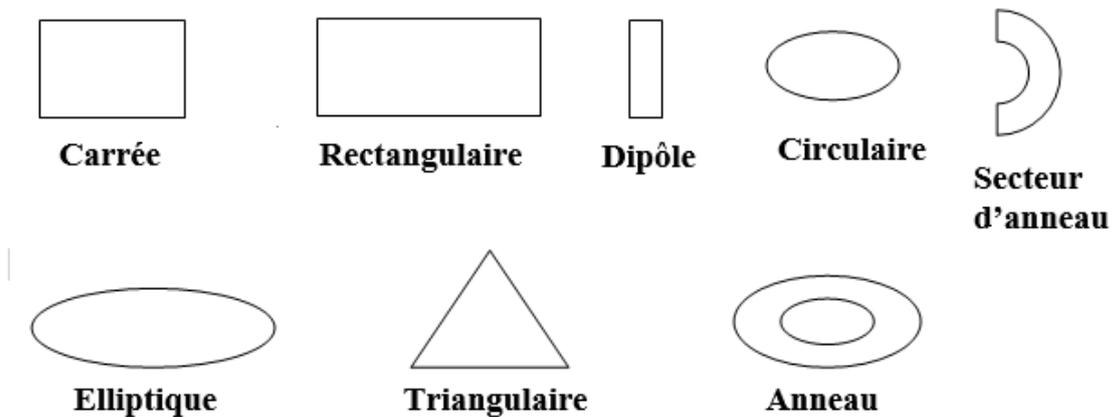


Figure I - 17 : Différentes formes de l'antenne patch [9].

B. Mécanisme de rayonnement d'une antenne patch

La forme géométrique de l'antenne patch nous permet de mieux comprendre son mécanisme de rayonnement. Après l'excitation de la ligne d'alimentation, une onde électromagnétique va se propager sur cette dernière pour rencontrer l'élément rayonnant qui est généralement

plus large que la ligne, Dans ce cas, on a une distribution de charge qui va s'établir sur et sous le composant rayonnant et entre le plan de masse et substrat.

(Figure I-18) illustre ce phénomène. Ces distributions avec l'association des densités de courants engendrent une distribution des champs électriques représentée à la (Figure I-19). Sa répartition s'étend autour et dans la structure dépend essentiellement : de la largeur w des circuits de métallisation, des caractéristiques du substrat : à savoir sa constante diélectrique et son épaisseur h [12, 13].

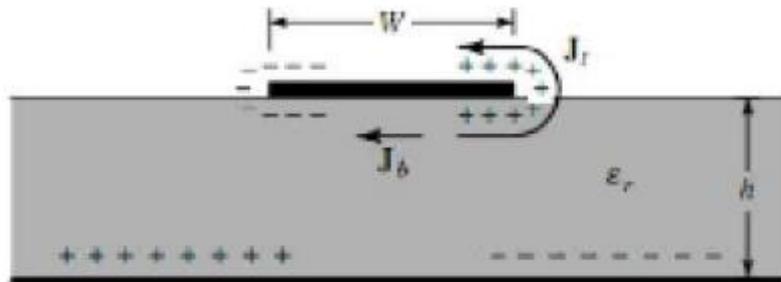


Figure I - 18: Distribution de charge [9].

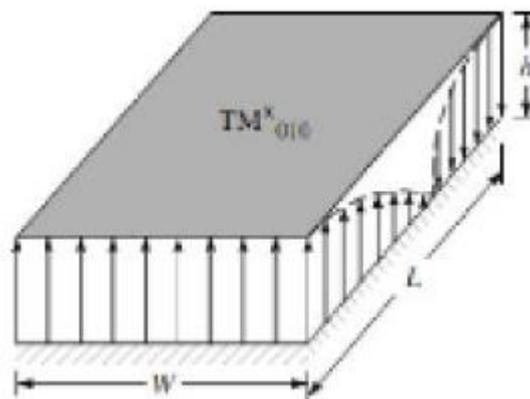


Figure I - 19: Distribution de champ [9].

C. Techniques d'alimentations

L'alimentation des antennes patches est l'une des parties les plus importantes dans le processus de la conception. Pour cela, plusieurs techniques ont été considérées dans ce but. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban).
- Les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente).

1. Alimentation directe par une ligne micro ruban

Dans cette alimentation, une ligne micro ruban est connectée directement au bord du patch voir (Figure I-20), Cette ligne est plus petite concernant la largeur par rapport au patch.

C'est l'une des techniques utilisée dans les antennes imprimés, l'avantage qu'elle a, est qu'elle est facile à fabriquer, et simple à adapter à la résonance, elle a l'inconvénient d'engendrer un rayonnement parasite[14].

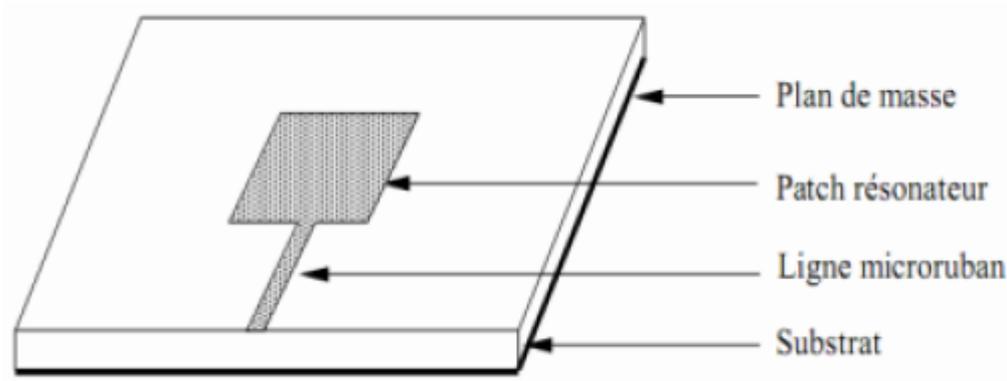


Figure I - 20 : Alimentation par une ligne micro ruban [9].

2. Alimentation par sonde coaxial

L'alimentation coaxiale est une autre méthode pour alimenter les antennes micro rubans, sa structure est montrée sur la (Figure I-21), Dans ce cas, le conducteur central (intérieur) est soudé directement à l'élément rayonnant (patch) après avoir traversé le diélectrique et le plan de masse, le conducteur extérieur est relié directement à ce dernier.

L'avantage de cette méthode est qu'elle peut appliquer à n'importe quel endroit du patch avec une facilité de fabrication et moins de rayonnement parasite[15].

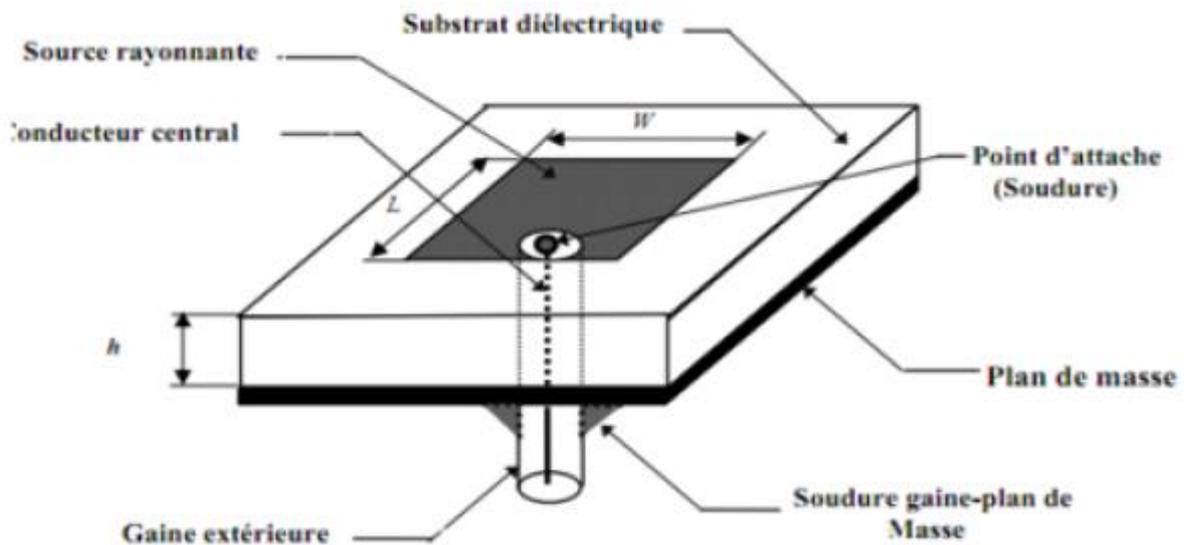


Figure I - 21 : Alimentation par sonde coaxial [9].

3. Alimentation couplée par ouverture

Dans ce type d'alimentation, le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation sont séparés en plan de masse comme indique sur la Figure (Figure I-22).La conjonction entre le patch et la

ligne d'alimentation est faite par une ouverture ou une fente dans le plan de masse. Pour optimiser mieux le rayonnement du patch, on opte pour l'utilisation des matériaux à permittivité élevée pour le substrat inférieur, et des matériaux à faible constante pour le substrat supérieure. L'avantage de cette alimentation est l'élargissement de la bande passante[16].

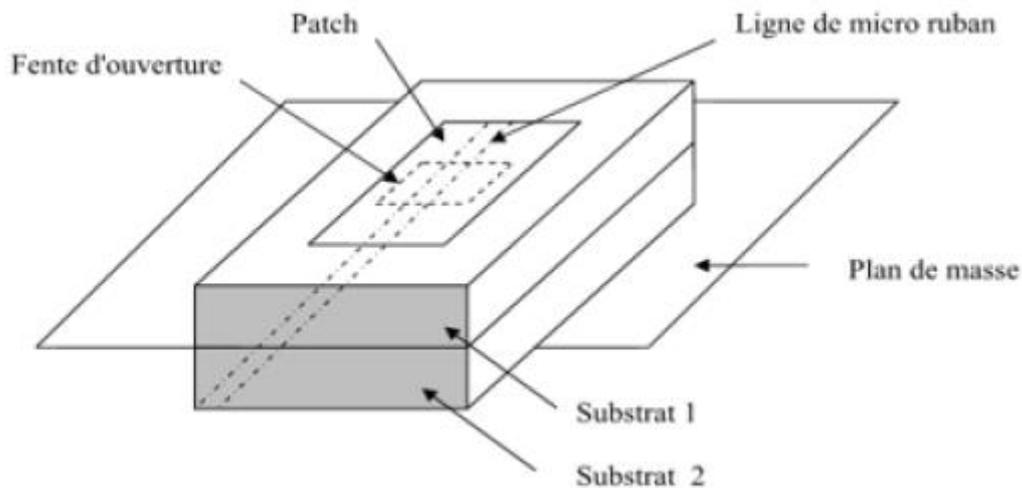


Figure I - 22 : Alimentation couplée par ouverture [15].

4. Alimentation couplée par proximité

Ce type d'alimentation est montré sur la (figure I-23). Deux substrats diélectriques sont employés de façon que la ligne d'alimentation soit insérée entre eux et le patch soit sur le substrat supérieur. L'avantage principal de cette technique d'alimentation est l'élimination du faux rayonnement d'alimentation et l'obtention d'une bande passante plus large et ce par l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne. Parmi les inconvénients de cette méthode d'alimentation, c'est la complexité de fabrication[9, 16].

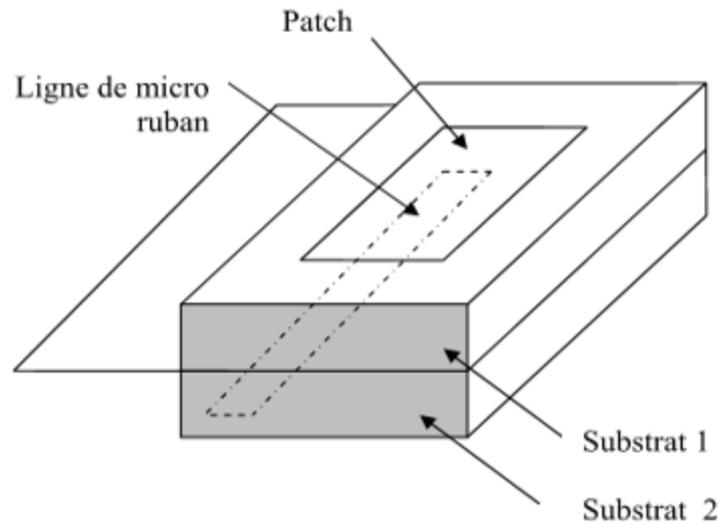


Figure I - 23 : Alimentation couplée par proximité [9]

Caractéristiques	Alimentation par micro ruban	Alimentation coaxial	Alimentation par ouverture	Alimentation par proximité
Rayonnement parasite	Plus	Plus	Moins	Minimum
Fiabilité	Meilleur	Pauvre	Bon	Bon
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage Requis	Alignement requis	Alignement Requis
Bande passante	2 à 5 %	2 à 5 %	2 à 5 %	15 %

Tableau I- 1 : Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation [9]

D. Technologie des antennes patches

1. Le matériau conducteur

Physiquement le patch est un conducteur mince (son épaisseur est de d'ordre de quelques microns). Les matériaux les plus utilisés pour le réaliser sont généralement le cuivre, l'argent et l'or, mais d'autres matériaux polymères conducteurs sont jusqu'à présent en étude. Les supraconducteurs ont prouvés une grande performance[17].

2. Substrat

La couche intermédiaire est le substrat diélectrique, son importance réside dans son influence directe sur la fréquence de résonance, la bande passante, et le rayonnement de l'antenne. Les substrats exploités dans la conception des antennes patches sont nombreux, Ils doivent être

de permittivité relative faible ($\epsilon_r \leq 3$) de façon à permettre le rayonnement, et éviter le confinement des champs , la constante diélectrique du substrat s'étale de 2.2 à 12 , et les matériaux les plus couramment utilisés sont des composites à base de téflon ($2 \leq \epsilon_r \leq 3$, et, $\tan \delta \approx 10^{-3}$), du polypropylène ($\epsilon_r = 2.18$, et, $\tan \delta = 3.10^{-4}$), ainsi que mousses synthétiques contenant beaucoup de minuscules poches d'air ($\epsilon_r = 1.03$, et , $\tan \delta \approx 10^{-3}$)[9, 12].

E. Les techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes [18]

Dans le réseau micro-ruban, les éléments peuvent être alimentés par une seule ligne ou plusieurs lignes disposés sous forme de réseau. Les méthodes d'alimentation sont classées comme suit:

- ❖ Réseau d'alimentation série
- ❖ Réseau d'alimentation parallèle
- ❖ Réseau d'alimentation série-parallèle

Le réseau d'alimentation a un effet majeur sur l'augmentation du gain et de la directivité de l'antenne en associant un nombre élevé d'éléments rayonnant (Figure I-24).

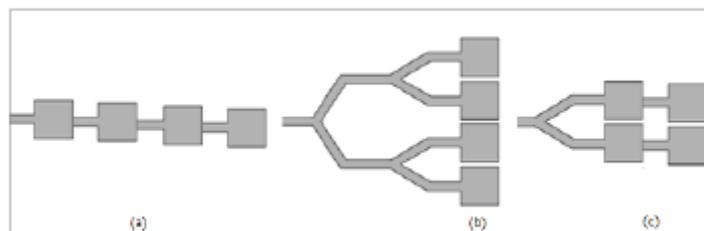


Figure I - 24 : (a) Alimentation séries (b) Alimentation parallèle (c) Alimentation série-parallèle[18]

Exemple du cas d'un réseau d'antenne à deux patchs triangulaires



Figure I - 25: Une antenne patch triangulaire

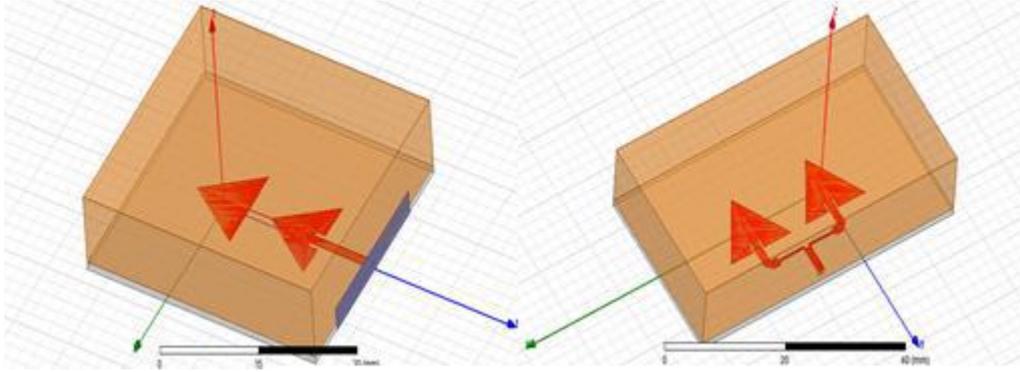


Figure 1 - 26: Réseau de deux antennes patch triangulaires en série et en parallèle

Le tableau I présente les valeurs simulés du gain, de la directivité et de la largeur du faisceau de rayonnement à -3dB pour l'antenne réseau à 2 patches triangulaires alimentés en série et en parallèle. On remarque que les paramètres de l'antenne sont meilleurs en utilisant l'alimentation parallèle.

Paramètres de l'antenne	Antenne réseau à 2 patches triangulaires	
	Alimentation série	Alimentation parallèle
Gain	9.61 dB	9.93dB
Directivité	9. dB	10.23 dB
Largeur de faisceau	69°	43°

Tableau I- 2 : Paramètres de l'antenne réseau à 2 patches triangulaires alimentés en série et en parallèle

F. Les techniques d'ajustement du diagramme de rayonnement [18]

Nous allons maintenant citer notre exemple cité ci-dessus, le cas d'un réseau d'antenne à deux patches triangulaires. Le diagramme de rayonnement de l'antenne est important pour la détermination des caractéristiques de rayonnement tel que la forme et la largeur du faisceau, la directivité et la puissance du rayonnement. La figure I-25 représente le diagramme de rayonnement de l'antenne réseau à 2 patches triangulaires alimentés en série et en parallèle.

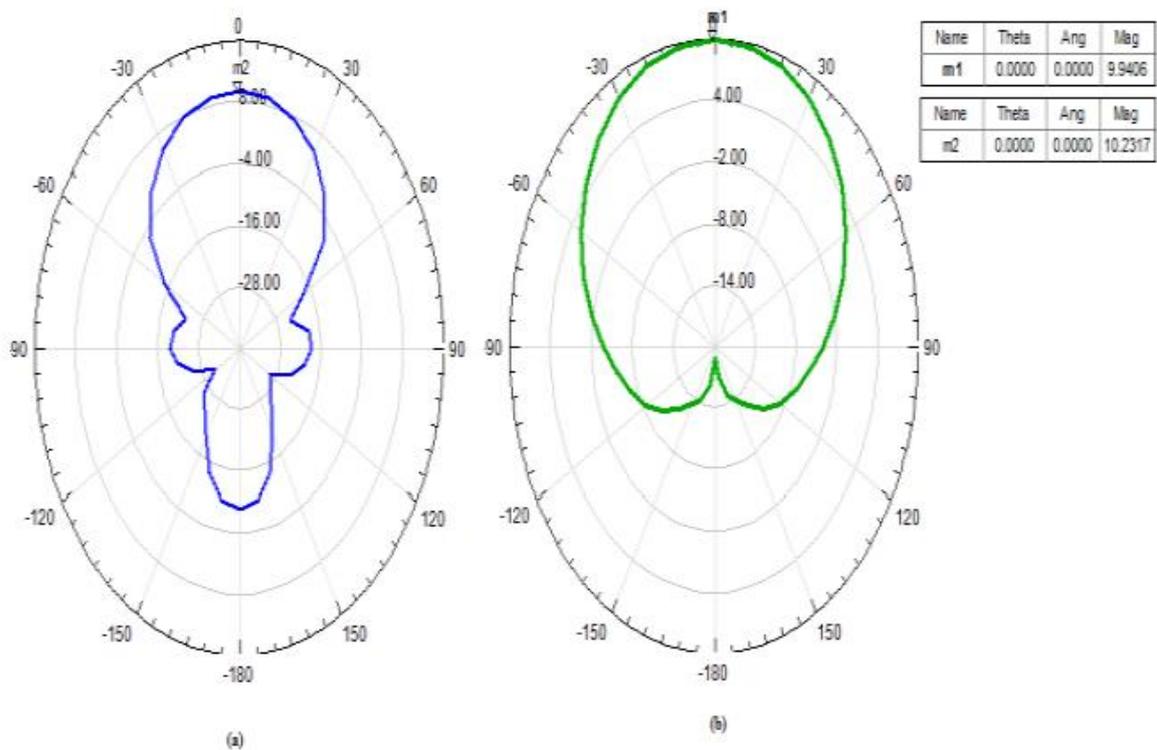


Figure 1 - 27 : Diagramme de rayonnement 2D en directivité de l'antenne réseau à 2 patches triangulaires alimentés en série et en parallèle.

D'après la figure ci-dessus on remarque que l'alimentation parallèle présente un faisceau de rayonnement plus rétrécie que l'alimentation série. On constate une diminution de la largeur de faisceau par 26° la chose qui rendra l'antenne réseau de patches alimentée en parallèle plus directive.

G. Types de réseaux d'antennes

Un réseau d'antennes est une association des différents éléments rayonnants. Le but du réseau d'antennes est d'atteindre des caractéristiques spécifiques, un gain élevé et/ou un lobe principal conformé. Il y a deux types de réseau, linéaires et bidimensionnels à alimentation en série ou en parallèle ou la combinaison série parallèle comme le montre les figure (Figure I-22)[9].



Figure I - 28: Réalisations de réseau à alimentation (a) linéaire en série, (b) linéaire en parallèle et (c) bidimensionnel en parallèle [9].

1. Réseaux linéaires à alimentation parallèle

2ⁿ Éléments rayonnants peuvent être alimentés en parallèle par des lignes micro rubans (Figure I-27) formant n étages de 2 diviseurs de puissance à chaque étage m. Cette alimentation présente des avantages car elle est large bande puisque, les distances parcourues jusqu'à chacun des éléments rayonnants sont les mêmes et il est possible de disposer, sur les voies d'accès à ces éléments, des déphaseurs et des atténuateurs (ou des amplificateurs) afin de faire varier la phase et l'amplitude de l'onde pour conformer localement ou globalement le diagramme de rayonnement[9].

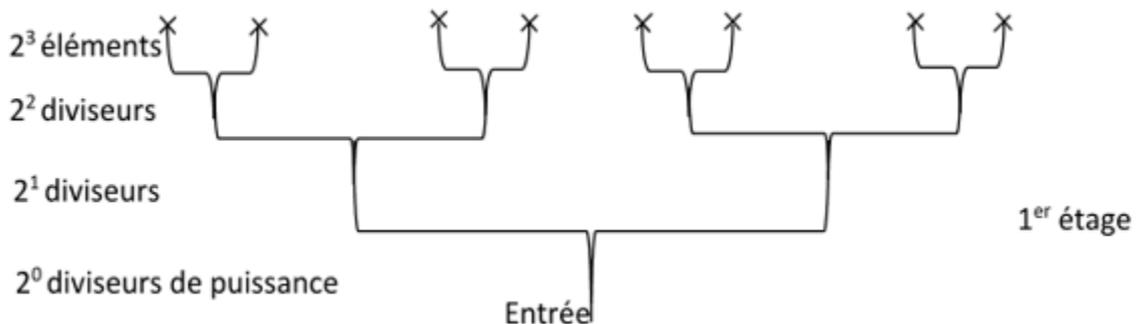


Figure I - 29 : Alimentation parallèle de 23 éléments rayonnants par 3 étages de diviseurs de puissances.

2. Réseaux bidimensionnelles

Afin d'obtenir un effet de réseau pouvant conformer le diagramme de rayonnement dans la direction souhaitée, dans les plans E et H, il est nécessaire d'avoir recours à des réseaux bidimensionnels et qui ont pour but d'augmenter le gain[9].

Ces réseaux augmentent le gain et l'alimentation peut être une combinaison série -série, série - parallèle ou parallèle - parallèle selon les figures (Figure I-25) et (Figure I-26).

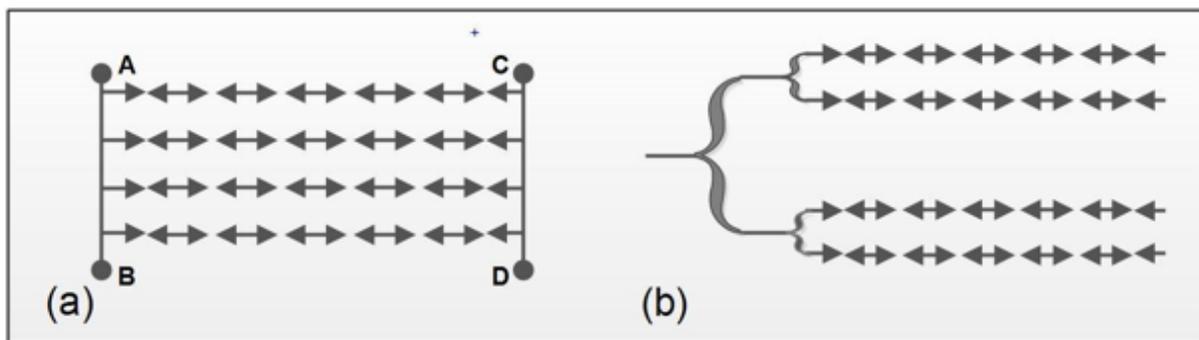


Figure I - 30 : Réseau bidimensionnel formé de réseaux linéaires à alimentation série et (b) réseau bidimensionnel formé de réseaux linéaires à alimentation parallèle-série [9].

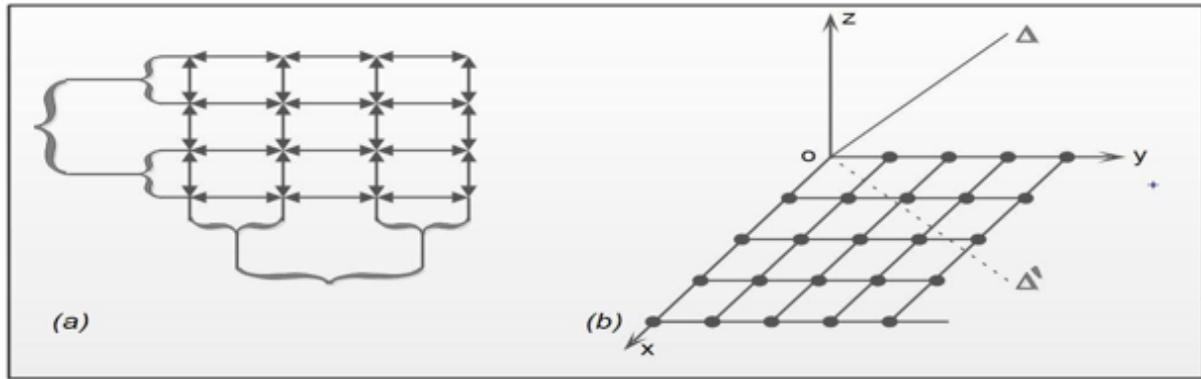


Figure I - 31 : (a) Réseau bidimensionnel à double alimentation parallèle et (b) grille dans le plan xOy , dont les nœuds représentent la position des éléments d'un réseau bidimensionnel rayonnant dans une direction $\Delta (\vartheta, \phi)$ [9].

H. Bilan de liaison [3]

L'utilisation d'antennes se justifie pour transmettre une onde d'un point à un autre. Cette onde, généralement appelée la porteuse, est le support de l'information transportée. Il est donc indispensable de connaître les caractéristiques de sa transmission.

Là, nous étudions le cas simple de deux antennes, en espace libre, en regard l'une de l'autre, correctement orientées, c'est-à-dire que leur axe de rayonnement est commun et enfin on suppose qu'elles sont bien orientées par rapport à leur polarisation. On suppose qu'elles sont suffisamment espacées pour considérer qu'elles sont en champ lointain l'une de l'autre.

Ce n'est souvent qu'une approximation car le rayonnement d'une antenne peut donner lieu à des réflexions multiples sur des objets se trouvant sur son trajet. Ces cas relèvent des études de propagation qui seront évoqués ultérieurement.

Cependant, le cas du rayonnement en espace libre est très important car il traduit les propriétés propres aux antennes.

Deux cas seront envisagés :

- celui de l'espace libre effectif, difficile à obtenir car nécessitant un espace important,
- celui de l'espace libre équivalent, obtenu dans une chambre anéchoïde.

La démonstration qui suit permet de connaître la valeur de la puissance reçue par une antenne en fonction de la puissance d'émission, en tenant compte de la distance des antennes et de leur gain. Les antennes sont supposées en champ lointain l'une de l'autre dans tout ce paragraphe.

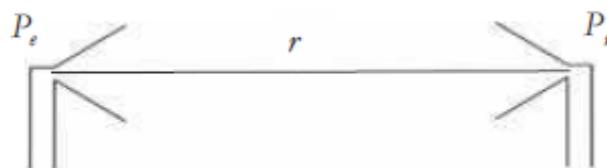


Figure I - 32 : Phénomène d'émission-réception

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES

Considérons une antenne d'émission dont la puissance d'émission est P_e et le gain G_e , la densité surfacique de puissance au voisinage de l'antenne de réception est donnée par l'expression (Equation I- 39).

Soit E_0 la norme du champ électrique au voisinage de l'antenne de réception, on obtient :

$$\frac{E_0^2}{2Z} = \frac{P_e}{4\pi r^2} G_e \quad \text{Equation I- 39}$$

La puissance reçue par l'antenne P_r est proportionnelle à la densité surfacique de puissance et à la surface d'absorption de l'antenne de réception S_{ar} :

$$P_r = \frac{E_0^2}{2Z} S_{ar} \quad \text{Equation I- 40}$$

Selon la définition du paragraphe de l'Equation I-39, la surface d'absorption est liée au gain par :

$$S_{ar} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \quad \text{Equation I- 41}$$

On en déduit la relation entre la puissance reçue et la puissance émise :

$$\frac{P_r}{P_e} = \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} G_r G_e \quad \text{Equation I- 42}$$

Les gains dans cette formule sont des gains linéaires.

Prenons l'exemple d'une puissance d'émission de 2 W, émise par une antenne ayant un gain de valeur 2 et un récepteur, situé à 100 m, ayant un gain de valeur 10. La fréquence de fonctionnement vaut 1 GHz. Cela correspond à une longueur d'onde de 0,3 m. La puissance reçue dans ce cas est :

$$P_r = 2,3 \mu W \quad \text{Equation I- 43}$$

Si l'on introduit la surface d'absorption S_{ae} de l'antenne d'émission qui est liée au gain d'émission selon :

$$S_{ae} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_e \quad \text{Equation I- 44}$$

Le rapport entre la puissance reçue et la puissance émise prend la forme :

$$\frac{P_r}{P_e} = \frac{S_{ae} S_{ar}}{r^2 \lambda^2} \quad \text{Equation I- 45}$$

Formule de Friis :

Cette dernière relation exprimée en échelle logarithmique s'appelle la formule de Friis. Elle s'exprime sous la forme suivante, lorsque les puissances sont exprimées en dBm, les gains en dB, la distance en km, la fréquence en MHz :

$$P_r = P_e + G_e + G_r - 20 \log r - 20 \log f - 32,44 \quad \text{Equation I- 46}$$

I. Le bilan de liaison satellitaire [19]

Lors de la définition d'un système de communications avec un satellite, il est nécessaire de déterminer la taille des antennes d'émission et de réception, la puissance d'émission et le rapport signal à bruit nécessaire pour pouvoir effectuer la transmission avec la qualité requise. Effectuer cet ensemble de déterminations constitue le Bilan de Liaison.

Considérons une antenne omnidirectionnelle, dite isotrope (Isotropic Antenna) rayonnant P_T Watts.

La densité de puissance P à une distance d de l'antenne qui rayonne dans une sphère de surface $4\pi d^2$ est alors égale à :

$$P = \frac{P_T}{4\pi d^2} \text{ Watts/m}^2 \quad \text{Equation I- 47}$$

Supposons maintenant que l'antenne est directive et rayonne principalement dans une direction définie par un azimut et une élévation (θ_0, φ_0) . Par rapport à l'antenne omnidirectionnelle la densité de puissance dans cette direction sera multipliée par un coefficient $G_T(\theta_0, \varphi_0)$ qui représente le gain de l'antenne dans cette direction.

Pour simplifier les écritures, supposons que l'on s'intéresse dans la suite à cette direction privilégiée (θ_0, φ_0) et omettons de le préciser dans l'expression du gain G_T .

La densité de puissance à une distance d est alors égale à :

$$P = \frac{G_T P_T}{4\pi d^2} \text{ Watts/m}^2 \quad \text{Equation I- 48}$$

Le produit $G_T P_T$ est appelé la Puissance Isotrope Rayonnée Effective : PIRE (Effective Isotropic Radiated Power :EIRP)

On rappelle que la PIRE est la puissance rayonnée par rapport à une antenne isotrope pour laquelle $G_T = 1$

Une antenne de réception dirigée dans la direction de rayonnement principal de l'antenne d'émission va recevoir une fraction de la puissance rayonnée. Cette fraction est proportionnelle à la surface de l'antenne de réception et à son orientation par rapport à la direction de propagation de la puissance émise. En supposant les antennes d'émission et de réception parfaitement alignées, la puissance reçue s'écrit :

$$P_R = \frac{G_T P_T A_R}{4\pi d^2} \quad \text{Equation I- 49}$$

Le terme A_R est l'aire effective de l'antenne de réception. Pour une antenne parabolique de diamètre D , on a :

$$A_R = \eta \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{Equation I- 50}$$

Dans cette expression le coefficient η représente l'efficacité de l'antenne. Il varie généralement entre 50% et 70%.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES

Le gain d'une antenne parabolique de diamètre D s'exprime quant à lui par l'équation :

$$G_R = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad \text{Equation I- 51}$$

L'aire effective et le gain sont ainsi reliés par l'équation suivante :

$$A_R = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \quad \text{Equation I- 52}$$

La puissance reçue par l'antenne s'écrit finalement :

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2} \quad \text{Equation I- 53}$$

On introduit alors le facteur $L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$ qui est appelé la perte en espace libre (free-space path loss).

La puissance reçue s'écrit alors :

$$P_R = P_T G_T G_R L_s \quad \text{Equation I- 54}$$

En prenant en compte des pertes de propagation atmosphérique sous la forme d'une terme L_a , la puissance reçue devient :

$$P_R = P_T G_T G_R L_s L_a \quad \text{Equation I- 55}$$

Prise en dB cette expression devient :

$$(P_R)_{dB} = (P_T)_{dB} + (G_T)_{dB} + (G_R)_{dB} + (L_s)_{dB} + (L_a)_{dB} \quad \text{Equation I- 56}$$

Pour terminer le bilan de liaison il faut prendre en compte le bruit additif du canal et du récepteur. Le bruit thermique est défini par sa densité mono-latérale de puissance :

$$N_0 = kT \text{ Watts/Hz}$$

avec k : constante de Boltzmann : $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ et T température de bruit en Kelvin

La puissance de bruit P_n dans une bande de fréquence W est alors égale à :

$$P_n = N_0 W \quad \text{Equation I- 57}$$

En introduisant l'énergie par bit E_b dans la bande de réception et le débit binaire R_b , il vient :

$$P_R = E_b R_b \quad \text{Equation I- 58}$$

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES

Le rapport $\frac{E_b}{N_0}$ est alors égal à

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{R_b} \frac{P_R}{N_0} \quad \text{Equation I- 59}$$

Pour obtenir un taux d'erreurs spécifié lors de la démodulation, il est nécessaire d'avoir un rapport $\frac{E_b}{N_0}$ requis que l'on note

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} \quad \text{Equation I- 60}$$

Il faut donc ajuster les puissances d'émission et les tailles des antennes afin que :

$$\frac{P_R}{N_0} = R_b \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} \quad \text{Equation I- 61}$$

En remplaçant P_R par sa valeur ainsi que N_0 dans cette expression, on obtient :

$$\frac{P_R}{N_0} = \frac{P_T G_T L_s L_a G_R}{k T} \quad \text{Equation I- 62}$$

On voit alors faire apparaître le terme $\frac{G_R}{T}$ qui est une caractéristique très importante pour qualifier la chaîne de réception d'un système satellitaire.

Remarque: Cet exposé du bilan de liaison a supposé une chaîne de réception parfaite sans dégradation du rapport signal sur bruit. Une chaîne "réelle" sera caractérisée par son facteur de bruit qu'il faudra donc soustraire au rapport signal sur bruit idéal.

Exemple:

Considérons un satellite Géostationnaire avec une puissance rayonnée de 100 Watts (20 dBW). L'antenne d'émission a un gain de 17 dB. La PIRE est alors égale à 37 dBW.

L'antenne de réception de la station terrienne est une parabole de 3 mètres de diamètre avec une efficacité de 50%. La fréquence porteuse est égale à 4 GHz.

Le gain de l'antenne de la station terrienne est donc égal à $G_R = 39$ dB

La perte en espace libre est égale à $L_s = 195.6$ dB

On suppose qu'il n'y a ici aucune autre perte atmosphérique à prendre en compte. La puissance reçue est égale à :

$$(P_R)_{dBW} = 20 + 17 + 39 - 119,6$$

$$(P_R)_{dBW} = - 119,6 \text{ dBW}$$

La température de bruit du récepteur est égale à 300°K . La densité de bruit est alors :

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ANTENNES

$N_0 = 4,1 \cdot 10^{-21} \text{ W/Hz}$ ou encore -203 dBW / Hz

D'où :

$$\frac{P_R}{N_0} = -119,6 + 203,9 = 84,3 \text{ dBHz}$$

Supposons que le rapport

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} = 10 \text{ dB} \quad \text{Equation I- 63}$$

Le débit maximum sera alors égal à :

$$(R_b)_{dB} = 84,3 - 10 = 74,3 \text{ dB}$$

D'où :

$$R_b = 107,43 = 26,9 \text{ Mbits/s}$$

Donc, avec ces antennes et avec cette puissance d'émission, ce satellite Géostationnaire peut transmettre au plus 26.9 Mbits/sec. Si l'on souhaite augmenter cette valeur, on peut augmenter la puissance émise par le satellite, augmenter la taille de l'antenne du satellite ou enfin augmenter la taille de l'antenne de la station terrienne.

Note :

Pour une antenne parabolique de diamètre D le gain est donné par la formule

$$G_R = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad \text{Equation I- 64}$$

et l'aire effective

$$A_R = \eta \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{Equation I- 65}$$

avec η égal à 50-60%.

Pour une antenne cornet avec une aire A, le gain est donné par

$$G_R = \frac{10A}{\lambda^2} \quad \text{Equation I- 66}$$

et l'aire effective est

$$A_R = \eta A \quad \text{Equation I- 67}$$

avec η égal à 80%[19].

J. Avantages et inconvénients des antennes patches

1. Avantage

- Faible poids, et encombrement minimal.
- Faible coût de production, et possibilité de production en masse.
- Polarisation linéaire et circulaire.
- Multi-polarisation possible.
- Réseau d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.

2. Inconvénients

- Bande étroite à cause des limitations physiques et géométriques et un faible gain arrivant jusqu'à 5 à 6 dB au maximum.
- Rayonnement dans le demi-plan.
- Pertes de radiation impliquées par les ondes de surface.

VII. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la description et le mécanisme de fonctionnement des antennes en général, les avantages et les inconvénients des antennes patches, ainsi que les différents types d'alimentation.

CHAPITRE II : SATELLITES DE TELECOMMUNICATION

I. Introduction

Dès 1945, Arthur C. Clarke décrit dans son ouvrage *De l'autre côté du ciel* un système de satellites artificiels de la Terre pouvant être utilisé dans le domaine des communications toutes les régions du globe afin de relier entre elles toutes les régions du globe. Le satellite serait mis en place dans l'espace à une altitude de quelque 35 790 km, de telle sorte que sa vitesse de révolution autour de la Terre soit la même que celle de la rotation de notre planète.

II. Principe de télécommunication par satellite

Un satellite est une sorte de relais hertzien. En effet il ne s'occupe pas seulement de la compréhension des données : ce n'est qu'un simple miroir. Son rôle est de régénérer le signal qu'il a reçu et de le retransmettre sous formes amplifié à la station réceptrice. Il offre également une capacité de diffusion, c'est-à-dire qu'il peut retransmettre les signaux captés depuis la terre vers plusieurs stations. Il peut aussi récolter des informations venant de plusieurs stations différentes et de les retransmettre vers une station particulière. De plus ; il est possible d'établir des liaisons directes entre satellites[20].

Trois formes principales de radiocommunication spatiale sont utilisées aujourd'hui :

- Entre l'espace et la terre.
- Entre stations spatiales.
- Entre stations terriennes par l'intermédiaire de station spatiale.

La figure II.1 représente schématiquement un système de télécommunication par satellite. Comme nous le voyons, un système de télécommunication est constitué d'une station spatiale (satellite) et de stations terriennes coopérant pour assurer des radio communications spatiales à des fins déterminées, dans le cas le plus simple on a un satellite et deux stations terriennes, l'une émettrice et l'autre réceptrice. Pour échanger une telle communication, la première station émet vers le satellite une onde porteuse de haute fréquence modulée par le signal informatif (trajet montant ou Up-Link). Le répéteur du satellite transpose cette porteuse en fréquence, l'amplifie puis la réémet vers la deuxième station (trajet descendant ou Down-Link)[20].

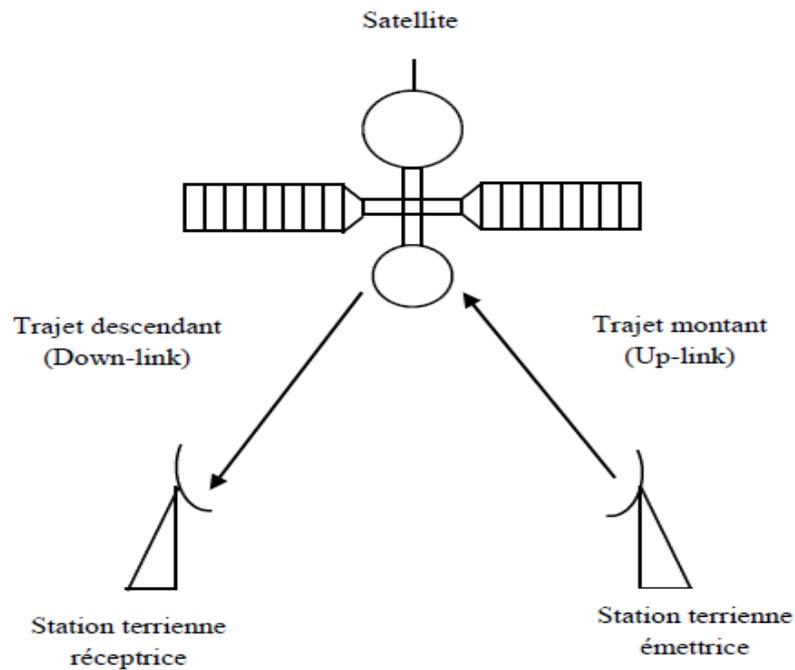


Figure II - 1: Principe des communications par satellite[20].

III. Les services de communication par satellite

L'utilisation initiale des satellites se résumait à un simple relais permettant d'assurer des communications point à point. La large couverture géographique qu'offrait le satellite n'était utilisée que pour mettre en place des liens à longue distance : les communications étaient essentiellement transmises d'une station terrestre vers une autre, toutes deux fixes et dotées de larges antennes (environ 30 m de diamètre). Le satellite EARLY BIRD, par exemple, connectait deux stations de part et d'autre de l'Atlantique ; des relais permettaient ensuite d'acheminer les communications dans les foyers. Les premiers services par satellite étaient donc essentiellement des communications téléphoniques à longue distance et l'échange de programmes de télévision entre deux grosses stations terrestres[21].

Avec les technologies, les performances des satellites se sont accrues (taille, puissance de transmission...) et les tailles des antennes de réception se sont amenuisées, devenant du coup transportables. Ces innovations techniques ont permis de fournir des services de communications entre points mobiles, notamment les services maritimes mobiles (système INMARSAT).

Par la suite, la capacité de diffusion des satellites combinée à la petite taille des antennes, de type VSAT (Very Small Aperture Terminals) a favorisé l'introduction des services de télécommunication, principalement la diffusion de télévision et de vidéo (connu sous le terme DVB-S pour Digital Video Broadcasting by Satellite), dans les foyers de milliers d'utilisateurs. Ces services point à multipoint sont connus sous le terme DTH (Direct To Home). Une autre réduction dans les tailles d'antenne a permis de fournir des services de diffusion d'audio numérique (connu sous le sigle DAB pour Digital Audio Broadcasting [21]).

Les premiers services par satellite étaient orientés essentiellement vers la diffusion de programmes aux usagers dont les antennes n'agissaient qu'en mode réception. Avec les progrès technologiques réalisés à la fois pour les performances et les tailles des satellites et des antennes, et les procédures de partage de ressource, de nouveaux services bidirectionnels et interactifs ont été conçus. Pour ces services, une voie retour, des terminaux utilisateurs vers les terminaux des fournisseurs de service, a été mise en place. Ainsi les systèmes de communication par satellite peuvent fournir des services interactifs de télévision et d'accès à l'internet. Ces services s'apparentent à ce qui est offert par l'ADSL terrestre où un lien asymétrique est utilisé. En effet, dans les services interactifs par satellite, le lien aller opère avec des débits de plusieurs mégabits par seconde (Mbps) alors que la voie retour opère avec seulement quelques centaines de kilobits par seconde (kbps) 1[21].

IV. Les types de satellite

L'évolution des services proposés par les systèmes de télécommunication par satellite a été rendue possible par la mutation des satellites tant par la forme (poids, taille d'antenne...) que par les principes de transmission des signaux radios. Cependant la mutation la plus marquante des satellites a concerné les techniques de transmission et de couverture des zones de service, aboutissant à plusieurs types de satellite.

A. Satellite passif ou miroir

Les premiers satellites artificiels étaient de simples miroirs de signaux radioélectriques. Ils réfléchissaient donc les signaux transmis par une station terrestre vers une autre station terrestre. Ce type de satellite est dit passif. Le premier exemple de ce type de satellite est celui de la Nasa, au début des années soixante, baptisé Echo. Les satellites passifs n'émettaient qu'avec de faible puissance vers les stations terrestres, obligeant ces dernières à être dotées de larges antennes (de 20 à 30 m de diamètre) pour, à la fois, recevoir les faibles puissances et transmettre à forte puissance.

B. Satellite actifs

La seconde évolution des satellites s'est traduite par le passage aux satellites dits actifs capables de traiter les signaux captés. Deux types de satellites actifs existent : les satellites transparents et les satellites régénératifs.

1. Satellite transparent

La première génération des satellites actifs est représentée par les satellites transparents. Avec les satellites transparents, les signaux sont reçus sur une fréquence, puis ils sont amplifiés avant d'être retransmis aux antennes réceptrices sur une fréquence plus basse. L'amplification des puissances captées à bord des satellites permet de réduire la taille des antennes de réception au sol (antenne VSAT de quelques mètres). La conversion des fréquences permet, quant à elle, de réduire les interférences entre les liens montants et les liens descendants.

2. Satellite régénératif

Les satellites régénératifs représentent la seconde génération des satellites actifs. Ces satellites ont la capacité de démoduler les signaux en bande de base puis de les ré-moduler avant de les retransmettre. La démodulation au sein du satellite permet d'avoir des trains binaires sur lesquels un traitement peut être effectué. Le traitement embarqué dans le satellite, connu sous le sigle OBP, pour On-Board Processing, permet donc d'effectuer les opérations suivantes : la conversion des signaux en fréquence RF (Radio Fréquence) ou en bande de base, la démodulation, la régénération du signal, le multiplexage, la bufferisation, la commutation et le routage des paquets ou cellules [17].

Les satellites régénératifs requièrent une plus faible puissance de signal.

En outre le traitement embarqué permet de découpler les bruits introduits sur les liens montants et descendants. Ainsi les niveaux d'interférence sont réduits, et les antennes, qui émettent à plus faible puissance, peuvent être de taille plus petite. Les satellites régénératifs, du fait du traitement embarqué, permettent la commutation des paquets de données et leur routage d'un faisceau à un autre. De plus, les traitements qui avaient lieu sur un segment sol dans le cas des satellites transparents ont lieu dans le satellite même, réduisant du coup les temps de transfert des paquets entre faisceaux et entre utilisateurs. En définitive, les satellites régénératifs présentent l'avantage majeur de fournir un routage flexible entre différents faisceaux et une plus faible taille d'antenne des terminaux terrestres. En contrepartie, le satellite régénératif doit être sûr et fiable. La fiabilité est assurée le plus souvent par de la redondance introduite dans la charge utile du satellite ; ce qui malheureusement alourdit le satellite[21].

V. Evolution des satellites de télécommunication

Les premiers satellites de communication :

1960 : 1 er satellite de communication ECHO

1963 : 1 er satellite géostationnaire SYCHOM

1965 : 1 er satellite commercial géostationnaire « EARLY BIRD » INTELSAT 240canaux de téléphone + 1 canal TV

1976 : 3 satellites MARISAT pour la communication maritime

1982 : 1 er système satellite de téléphone mobile INMARSAT-A

1988 : 1 er satellite privé de télécom.internet PAN AMERICAN

1993 : 1 er système satellitaire de téléphone digital

1998 : 1 er système global de téléphone portable par satellite[22].

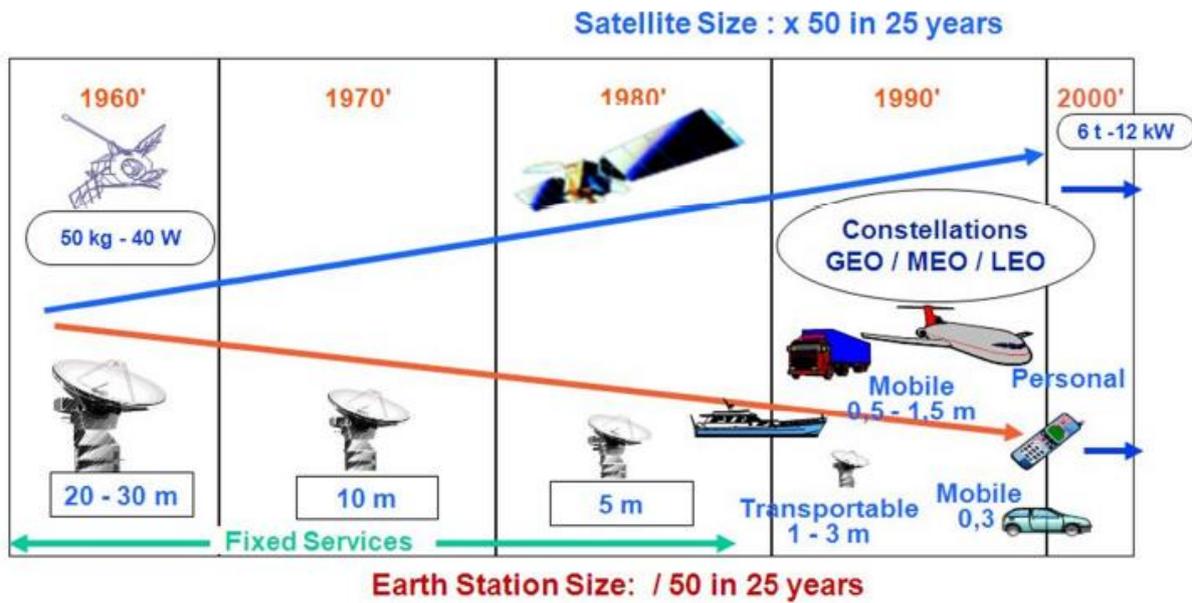


Figure II - 2: Evolution des systèmes de communication par satellite [23].

VI. Les fréquences

Les bandes de fréquences mises en œuvre pour les communications par satellite sont le plus souvent comprises entre 1 et 30 GHz. En dessous de 1 GHz les ondes sont principalement réfléchies et diffusées par l'atmosphère. Au-dessus de 30 GHz les liaisons satellitaires sont possibles mais l'absorption atmosphérique est importante et la technologie d'amplification plus complexe.

La bande de fréquence 1-30 GHz est divisée en sous bandes désignées par des lettres [19] :

Bande	Fréquences	Services
L	1-2 GHz	communications avec les mobiles
S	2-3 GHz	communications avec les mobiles
C	4-6 GHz	communications civiles internationales et nationales
X	7-8 GHz	communications militaires
Ku	11-14 GHz	communications civiles internationales et nationales
Ka	20-30 GHz	nouveaux systèmes d'accès au réseau large bande
EHF	21-45 GHz	communications militaires

Tableau II- 1 : Les bandes de fréquence pour les communications par satellites.

VII. Caractéristiques principales des systèmes satellitaires

Les satellites de télécommunication transmettent donc des informations d'un point à l'autre de la Terre, notamment des programmes télévisés en diffusion mais aussi des communications téléphoniques ou de données. Un satellite est constitué d'une plateforme ("service module") assurant le maintien à poste dans l'espace et d'une charge utile ("payload") permettant de remplir la mission du satellite. Pour un satellite de télécommunication, elle est constituée de différents transpondeurs qui reçoivent, amplifient et retransmettent des signaux sur des fréquences différentes.

Le médium satellite a donc des caractéristiques particulières :

- une grande couverture pouvant aller du tiers de la planète à 100 km pour les plus petits faisceaux ;
- une diffusion naturelle, qui a naturellement aidé à développer la télévision par satellite ou toute application de diffusion ;
- une accessibilité totale dans la zone de couverture, ce qui a permis de conserver cette technologie, non dépendante de facteurs terrestres (montagnes ou autres) ;
- un délai qui peut être important avec un temps de propagation plus grand que le temps d'émission (autour de 250 ms pour une orbite géostationnaire) ;
- peu d'infrastructures terrestres nécessaires ;
- un coût important du fait du satellite lui-même mais aussi des équipements de transmission et de gestion du satellite et du réseau ;
- une robustesse des composants et des systèmes ; il est trop dangereux d'envoyer des technologies non matures sur des satellites car elles doivent avoir une longue durée de vie en raison des coûts.[24]

A. Les systèmes de télécommunication et orbites

Les systèmes de télécommunications par satellites sont classés en fonction de l'altitude (orbites) des satellites. On distingue ainsi 3 différents type d'orbite.

1. Les systèmes GEO (Geostationary Earth Orbit)

Ils correspondent à des satellites évoluant sur l'orbite géostationnaire. Les systèmes GEO ont été les premiers utilisés et restent aujourd'hui majoritaires. L'orbite est extrêmement encombrée et l'on trouve presque un satellite tous les deux degrés. L'avantage de cette orbite est évidemment le fait que le satellite reste fixe par rapport à la Terre et qu'il n'est pas nécessaire de le poursuivre au moyen d'antennes mobiles au sol. L'avantage vient aussi du fait que l'altitude du satellite étant très élevée (ce dernier "voit" environ 42% de la surface de la Terre (Trois satellites suffisent pour couvrir tout le globe)

Les inconvénients sont le temps de propagation, il faut compter environ 250 ms pour un aller et retour vers le satellite.

2. Les systèmes MEO (Medium Earth Orbit.)

Ils correspondent à des satellites évoluant en orbite moyenne.

Le système ICO (Intermediate Circular Orbit) se base sur une constellation de 10 satellites sur 2 plans inclinés de 45°.

3. Les systèmes LEO (Low Earth Orbit)

Ils correspondent à des satellites évoluant en orbite basse. Plusieurs grands systèmes (Iridium, Globalstar, SkyBridge, Teledesic) se basent sur de telles constellations. L'avantage de ces systèmes est le temps de propagation très court, typiquement 10 ms de temps de propagation pour un satellite à 1.500 km d'altitude. Cet avantage fait de ces systèmes d'excellents candidats pour des applications interactives mettant en jeu des terminaux mobiles avec des antennes omnidirectionnelles et des amplificateurs de faibles puissances.

4. Les systèmes elliptiques

Ils correspondent à des satellites évoluant en orbite elliptique.

Ce type de satellite est utilisé depuis 1967 par le système Molnya qui assure des télécommunications pour la Sibérie. Son orbite est inclinée de 63° par rapport au plan équatorial[22].

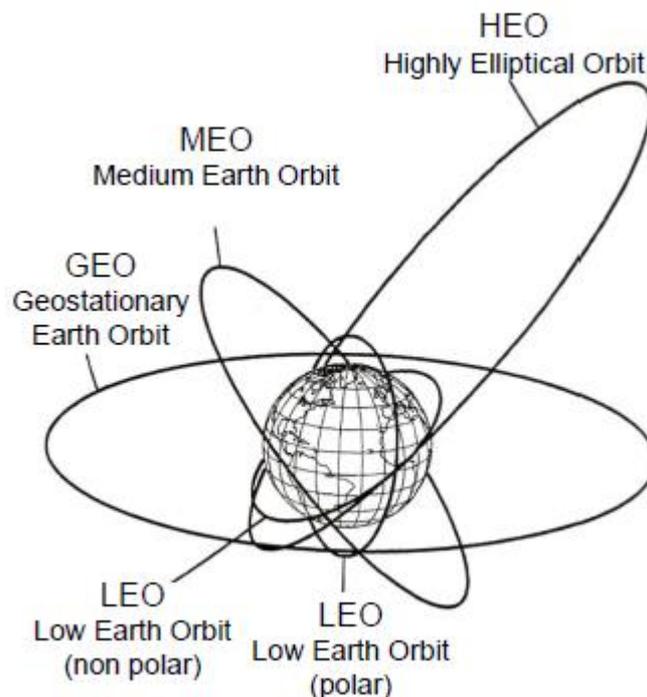


Figure II - 3 : Les différents types d'orbites

B. Les six paramètres orbitaux [23]

Six paramètres permettent de connaître la position et la trajectoire d'un satellite dans l'espace

1. Forme de l'orbite

a : demi grand-axe

e : excentricité ($e = c/a$)

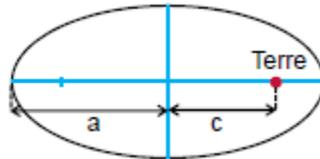


Figure II - 4: Paramètres en rapport avec la forme de l'orbite

2. Position du satellite sur l'orbite

v : anomalie vraie en degré

3. Position de l'orbite dans son plan

ω : argument du périhélie

4. Orientation du plan orbital

i : inclinaison du plan orbital

Ω : longitude du noeud ascendant

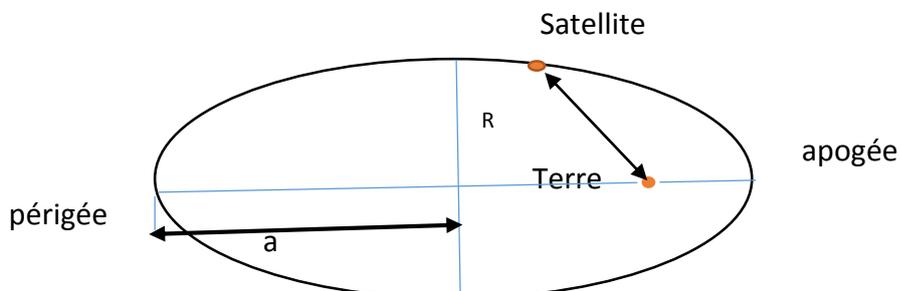
C. Lois de Kepler appliquées aux satellites artificiels [23]

1ère loi :

L'orbite du satellite est une ellipse dont le centre de la Terre est un des foyers

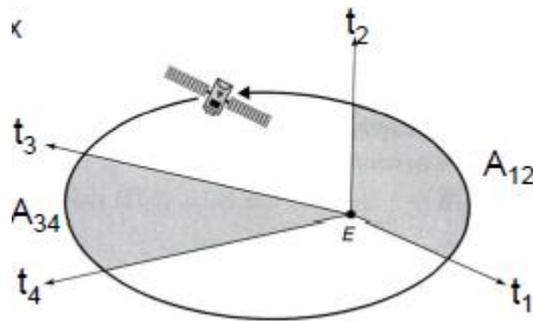
Périhélie : point de l'orbite le plus proche de la Terre

Apogée : point de l'orbite le plus éloigné de la Terre



2ème loi : Le satellite se déplace d'autant plus vite qu'il est proche de la Terre

Le rayon vecteur du centre de la Terre au satellite balaye des aires égales pendant des intervalles de temps égaux



$$t_2 - t_1 = t_4 - t_3 \rightarrow A_{12} = A_{34}$$

Equation II - 1

3ème loi : La période de révolution du satellite sur son orbite est :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$$

Equation II - 2

où a : demi grand axe de l'ellipse et $\mu = G \cdot M_{Terre} = 3.986 \cdot 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$

D. Connectivité [22]

On distingue 3 formes génériques de connectivité

1. Liaison point à point

Le satellite relie les réseaux téléphoniques de deux continents, de deux îles, ou de deux régions très éloignées dans un pays vaste et peu dense (Canada, Australie, Russie, Brésil, ...). Il permet ainsi les communications longue distance, Communications téléphoniques, fax, données internet sont indifféremment transmises entre station. C'est par exemple la tâche principale des INTELSAT. Chaque transpondeur peut relayer des centaines d'appels téléphoniques, les données étant compressées.

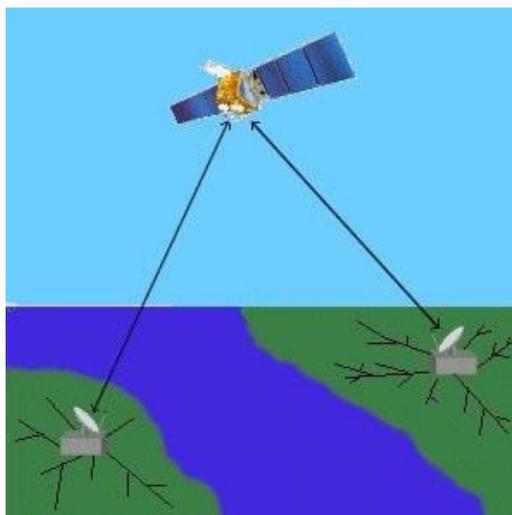


Figure II - 5:Liaison point à point

2. Liaison point à multipoints

Le satellite transmet les programmes télévisés des studios de la chaîne à l'émetteur local, qui les revoit par ondes hertziennes à destination des particuliers de la région. La plupart des programmes hertziens passent ainsi par satellite. Cela est particulièrement intéressant pour les pays étendus, ou quand des obstacles empêchent la diffusion directe. Radiodiffusion, télédiffusion, (Astra 1A, Hotbird en Europe, Galaxy1 aux USA)

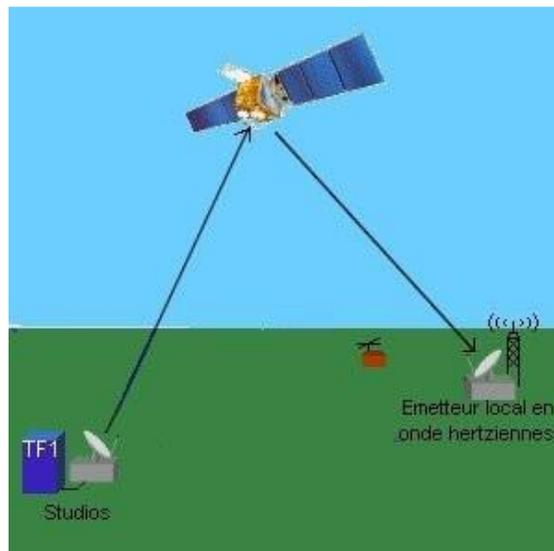


Figure II - 6:Liaison point à multipoints

3. Liaison multipoints interactifs

Un satellite très puissant (car les signaux sont reçus par de petits récepteurs) reçoit des programmes télévisés de studios au sol et les réémet sur une large région, pour les particuliers équipés d'une antenne parabolique. Ce procédé permet une transmission numérique, avec une qualité d'image bien meilleure, et l'accès à une palette de chaînes bien plus large.

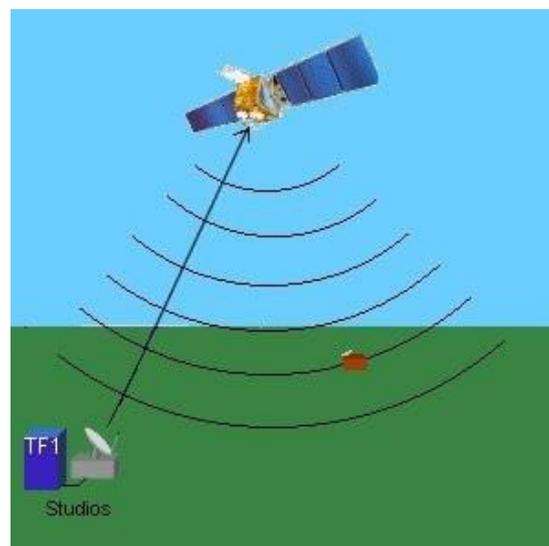


Figure II - 7:Liaison multipoints interactifs

VIII. Architecture d'un satellite de télécommunication

Les principales caractéristiques d'un satellite sont

- Sa charge utile.
- Sa plate-forme.
- Sa masse.
- Sa durée de vie opérationnelle et son orbite.

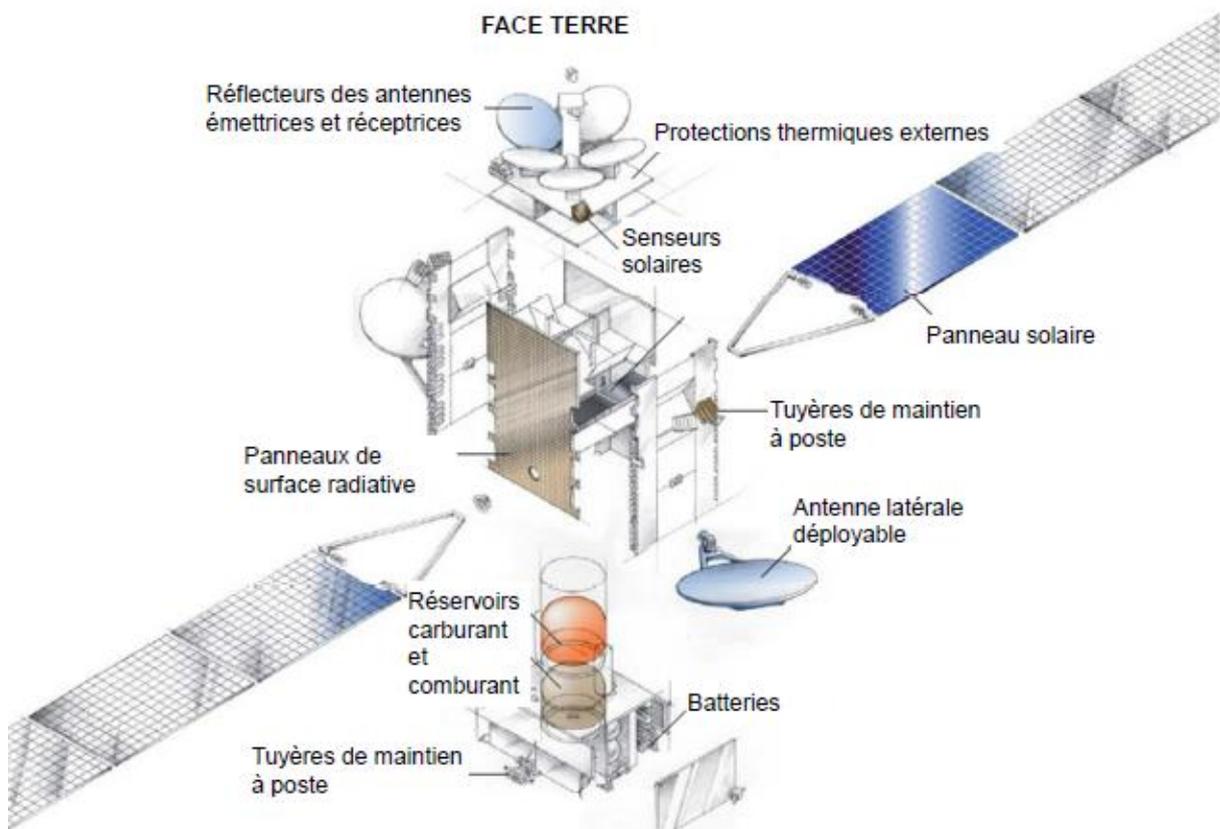


Figure II - 8: La station spatiale [22]

A. Les différents modules des satellites [22]

Un satellite de télécommunications est une sorte de relais hertzien. Des fréquences de longueurs d'onde centimétriques sont utilisées pour acheminer les signaux. Le rôle du satellite est de palier à l'affaiblissement du signal qu'il reçoit, de le régénérer pour le transmettre amplifié en fréquences vers la station terrienne réceptrice. Il ne s'occupe pas de la compréhension des données qu'il reçoit et qu'il doit retransmettre. En réalité, il doit simplement les régénérer pour permettre à la station terrienne de les recevoir convenablement : c'est une sorte de miroir.

Les satellites comprennent plusieurs modules (figure II-8).

1. Le module de propulsion

Groupe le moteur de stabilisation avec ses réservoirs d'ergols et ses tuyères trois axes.

2. Le module de service

Assure la télémétrie, la télécommande, le contrôle de l'altitude et de l'orbite au moyen de la liaison radio avec le sol. Il oriente les panneaux solaires de façon à obtenir la puissance maximale de l'alimentation. Il comprend la batterie pour la télécommande et l'alimentation pendant les éclipses du soleil. Il contrôle l'installation électrique et la température des principaux composants.

3. Le générateur solaire

Groupe un grand nombre de cellules au silicium en fonction de la puissance du satellite. Il faut plusieurs dizaines de milliers de cellules pour obtenir la puissance souvent supérieure à 3kW en fin de vie. En effet les cellules reçoivent l'impact des microparticules à haute énergie provenant de l'espace qui diminue leur rendement.

4. Le module de communication

Il reçoit le signal de la terre, le démodule, l'amplifie, le ré-module par translation de fréquence et enfin le dirige vers l'antenne d'émission.

5. Le module des antennes

Il est établi en fonction des zones à desservir. Il comprend : l'antenne de réception, là ou les antennes d'émission, l'antenne de télémétrie et de la télécommande. Les signaux captés sont réémis sur une fréquence différente, en général plus basse. Ce changement de fréquence entre les antennes de réception et d'émission est assuré par des appareils appelés répéteurs, chargés également d'amplifier massivement le signal.

Le satellite est un répéteur transparent, il n'intervient pas sur le standard du signal transmis

6. Les transpondeurs

Les satellites commerciaux transportent un certain nombre de transpondeurs. Par exemple un signal télévisé peut disposer d'un transpondeur à lui seul alors qu'un autre transpondeur achemine des centaines d'appels téléphoniques. Les plus grands des satellites commerciaux peuvent être munis d'une cinquantaine de transpondeurs. Le signal capté par un satellite est affaibli par la distance qu'il a parcourue. Avant d'être amplifié par des préamplificateurs à faible bruit, il est déphasé du bruit de fond qui l'accompagne, converti en une fréquence différente et transmise.

7. Empreinte de pas

Les satellites emploient un faisceau concentré pour donner un signal plus fort au-dessus d'une plus petite zone de la terre. Cette zone s'appelle : l'empreinte de pas du satellite.

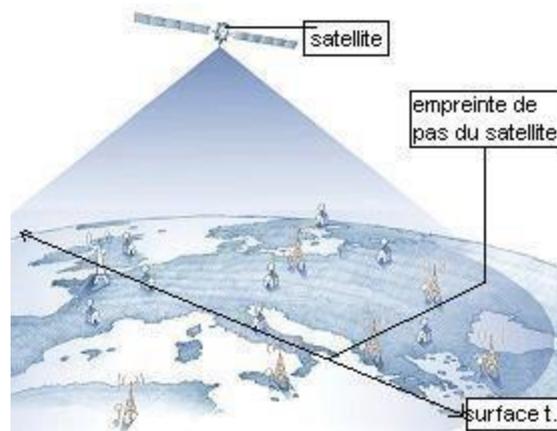


Figure II - 9 : l'empreinte de pas du satellite

B. Les stations terrestres [22]

Les stations terrestres peuvent être de diverses échelles. Les grandes stations, dont les antennes paraboliques peuvent avoir jusqu'à 30 m de diamètre, permettent de collecter les communications d'une zone à un niveau international. Elles sont réservées aux grands opérateurs. Et les petites stations plus légères, les VSAT (Very Small Aperture Terminal), qui sont dotées d'antennes paraboliques d'un mètre de diamètre.

1. Parabole

Elément incontournable de la réception satellite.

Comme pour une antenne de télévision, c'est elle qui capte le signal venant du satellite et qui le concentre vers le convertisseur. Plus une parabole est grande, meilleur est son gain.



Figure II - 10:parabole

2. LNB (Low Noise Block)

En réception satellite, le signal recueilli par l'antenne parabolique est trop faible pour pouvoir l'exploiter directement ; il faut l'amplifier, c'est l'un des rôles du LNB nommé également tête.

3. Modem

Aussi appelé récepteur. Cet appareil peut recevoir un signal modulé en hautes fréquences et le transformer en informations basses fréquences. En réception satellite, il permet l'obtention des signaux audio, vidéo et données véhiculées par une onde porteuse, afin de les restituer via les circuits du téléviseur, d'un ordinateur. Il transforme les fréquences en tensions et traite l'information de façon à ce qu'elle soit lue par un ordinateur.

4. Mode d'utilisation des Satellites

Un satellite de télécommunications peut être utilisé comme un simple relais hertzien entre deux stations terrestres, mais il comprend également d'autres options intéressantes. Il offre ainsi une capacité de diffusion, pouvant retransmettre les signaux émis depuis la Terre vers plusieurs stations espacées. Réciproquement, le satellite peut capter des informations en provenance de différentes stations d'émission, présentant dans ce cas une capacité de collecte. De plus, il est maintenant possible de concevoir des systèmes de liaisons directes entre satellites. Bien qu'ils soient très complexes à mettre en œuvre, Iridium a mis en place en 1999, un système de téléphonie mobile mondiale assuré par un réseau de 66 satellites en orbite basse, où chacun est relié à quatre autres satellites.

C. Les sous-systèmes d'un satellite de télécommunications [23]

Un satellite se compose de 2 parties :

- la charge utile qui reçoit et transmet les signaux radioélectriques
- la plateforme qui assure le fonctionnement de la charge utile

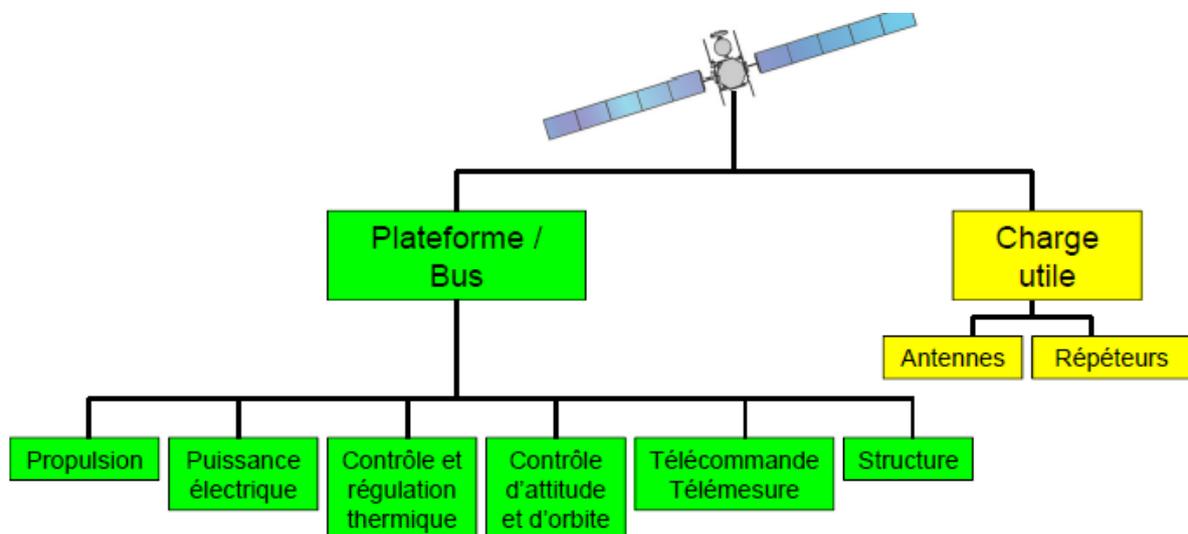


Figure II - 11: Les sous-systèmes d'un satellite de télécommunications

CHAPITRE II : LES SATELLITES DE TELECOMMUNICATION

La charge utile désigne la partie du satellite qui lui permet de remplir la mission pour laquelle il a été conçu.

La charge utile d'un système de télécommunications :

- reçoit un signal émis par une station terrienne dans une bande de fréquence et une polarisation donnée
- capte le minimum de signaux parasites
- amplifie le signal reçu avec le minimum de distorsion et de bruit ajouté
- transpose la fréquence du signal de fréquence UpLink à fréquence DownLink
- émet le signal utile dans la bande de fréquence de descente avec la polarisation voulue et vers la zone de destination souhaitée
- fournit un signal de forte puissance à l'accès de l'antenne émission
- rayonne le minimum de signaux inutiles

La complexité de la charge utile dépend de la fonction réalisée.

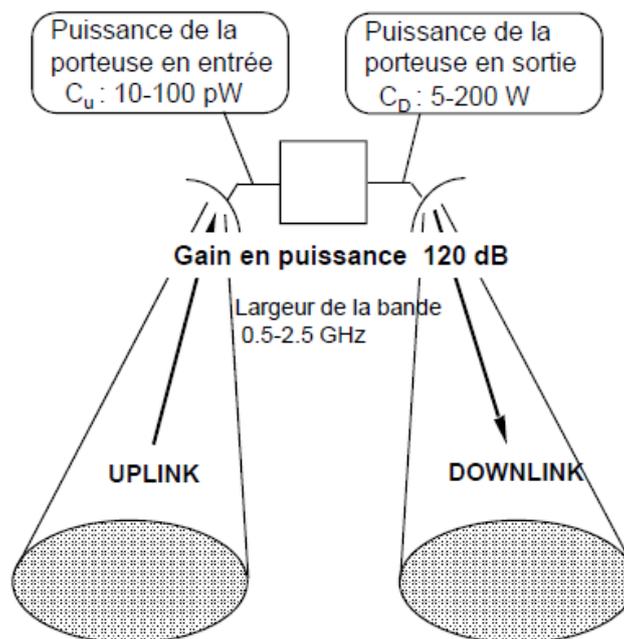


Figure II - 12: La charge utile d'un satellite de télécommunications

On distingue :

- Les répéteurs transparents (bent pipe) : conversion de fréquence et amplification
- Les répéteurs régénérateurs : Conversion de fréquence, démodulation, ré-modulation et amplification.

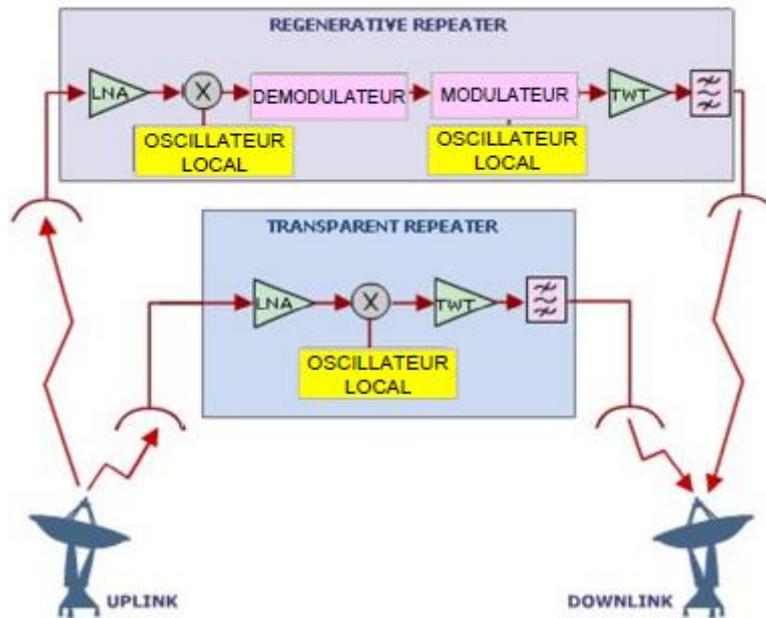


Figure II - 13 : Schéma simplifié de la fonction charge utile d'un satellite.

Charge utile nécessite plusieurs canaux :

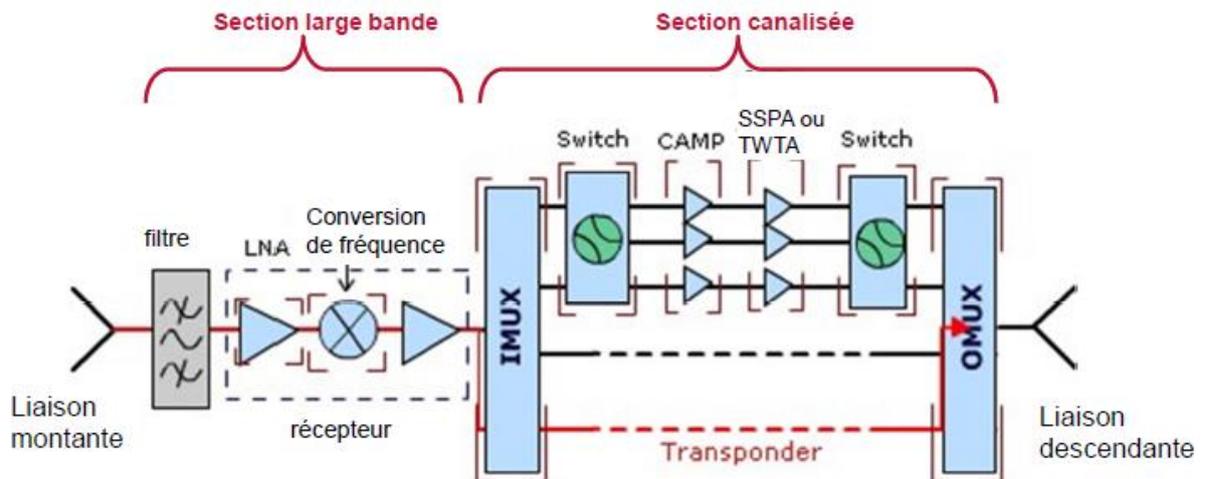


Figure II - 14 : Les canaux de la charge utile.

LNA : Low Noise Amplifier (amplificateur faible bruit)

IMUX : Input Multiplexer (multiplexeur d'entrée)

SWITCH : interrupteur

CAMP : Channel Amplifier (amplificateur de canal)

TWTA : Travelling Wave Tube Amplifier (amplificateur à tube)

SSPA : Solid State Power Amplifier (amplificateur de puissance à semi-conducteur)

OMUX : Output Multiplexer (multiplexeur de sortie)

Répéteur transparent :

- Consomme moins de puissance, masse plus faible,
- Fiabilité accrue : moins complexe et moins d'équipements
- Architecture non dédiée à une application donnée → flexibilité → peut suivre l'évolution du type d'applications et du trafic (changement des standards de la couche physique)
- Inconvénient : Modulation et codage identiques en uplink et downlink

Répéteur régénérateur :

- Amélioration de la couche physique : meilleur bilan de liaison par des modulations et codage différents en uplink et downlink
- Connectivité améliorée par routage paquet et multiplexage
- Inconvénients : Grande consommation

Les équipements de bord ne suivent pas l'évolution rapide des technologies terrestres (procédure de qualification spatiale)

Difficulté d'allier flexibilité et traitement de données haut débit.

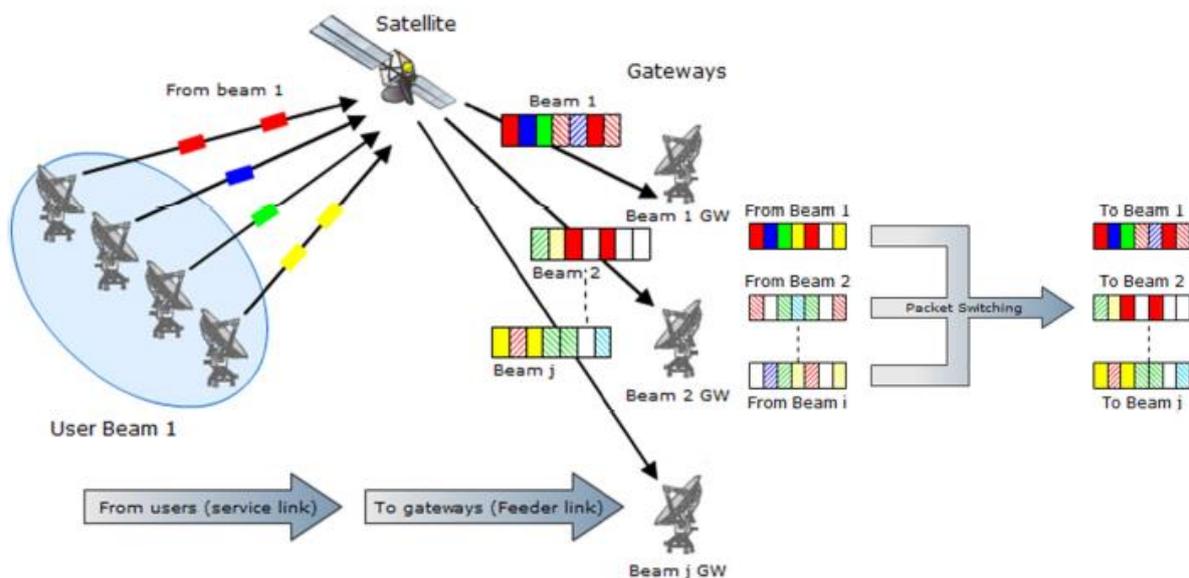


Figure II - 15 : Exemple d'application d'un répéteur régénérateur

IX. Conclusion

Dans ce chapitre, nous relatons explicitement l'évolution des télécommunications par satellites et cela dans ses domaines d'utilisation. Il énumère également les caractéristiques principales des satellites de télécommunication, les différentes connectivités, les fonctions utiles d'une station... bref, le fonctionnement de fond en comble d'un satellite de télécommunication grâce à sa généreuse plate-forme soutenant la charge utile qui à son tour est indispensable au service fonctionnel.

CHAPITRE III :
SIMULATION
ET
RESULTATS

I. Introduction

Dans ce chapitre intitulé « Simulation et résultats », notre objectif est de simuler une antenne patch avec CST (Computer Simulation Technology) dans la bande KA (20-30 GHz) en utilisant une technique d'augmentation du gain enfin que l'antenne puisse rayonner.

II. Simulation d'une antenne patch dans la bande KA

A. Simulation 1

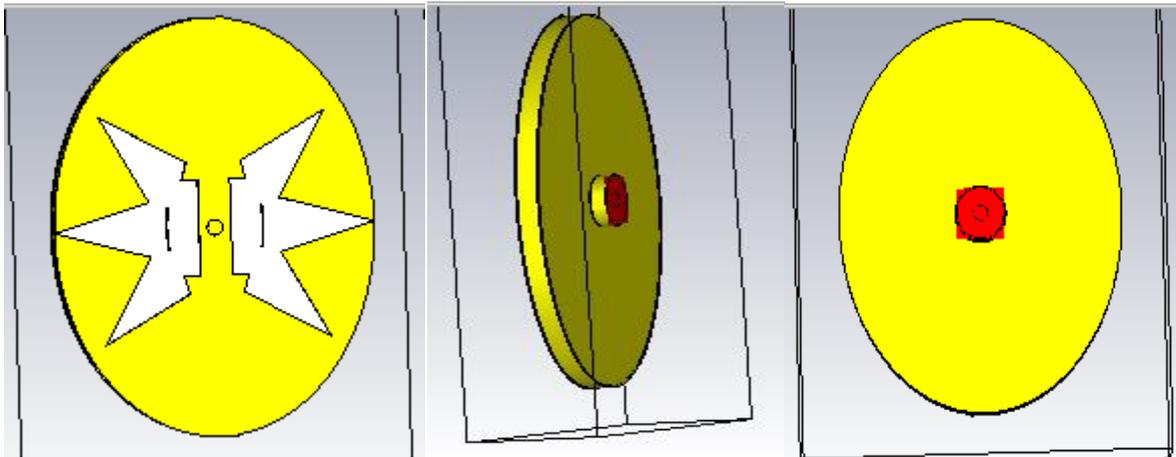


Figure III- 1 : Simulation 1 : antenne patch de forme elliptique

Nous avons fait la simulation d'une antenne patch de forme elliptique de rayon 10 et 13 mm, et la source d'alimentation (sonde coaxiale) est située au centre, de forme cylindrique de rayon interne 0.5 (hauteur =2.54 mm) et rayon externe 1.674 mm (hauteur= 1.12 mm).

La figure III-1 nous présente notre antenne patch sous ses différentes faces possibles enfin que nous puissions visiblement identifier les fentes en triangles sur le patch. Ce triangle est construit à partir de trois coordonnées (10,0), (3,2) et (3,-2). Après nous avons fait plusieurs copies de ce triangle avec une rotation d'angle de 45°. Puis on a enlevé le centre du patch de forme elliptique de rayon 3 et 5 mm. Ensuite on a ajouté une ligne de patch au milieu de notre patch. La ligne de patch a pour dimension 2 et 26 mm. Puis on a soustrait tous les triangles sauf deux (2) d'entre eux situés à 90° et 270° du triangle modèle.

Parameter List				
Name	Expression	Value	Description	
mz	= 0.12	0.12	l'epaisseur de la masse	
sz	= 1.3	1.3	l'epaisseur du substrat	
rin	= 1/2	0.5	rayon interne de la source	
rp2x	= 3	3	rayon sur l'axe OX	
rex	= 3.348/2	1.674	rayon externe de la source	
rp2y	= 5	5	rayon sur l'axe OY	
rmx	= 10	10	rayon de la masse sur l'axe OX	
rmy	= 13	13	rayon de la masse sur l'axe Oy	

Les éléments	Matériaux	Dimensions(mm)
Masse	Copper(annealed)	Epaisseur=0.12
Substrat	PTFE(lossy)	Epaisseur=1.3
Patch	Copper(annealed)	Epaisseur=0.12

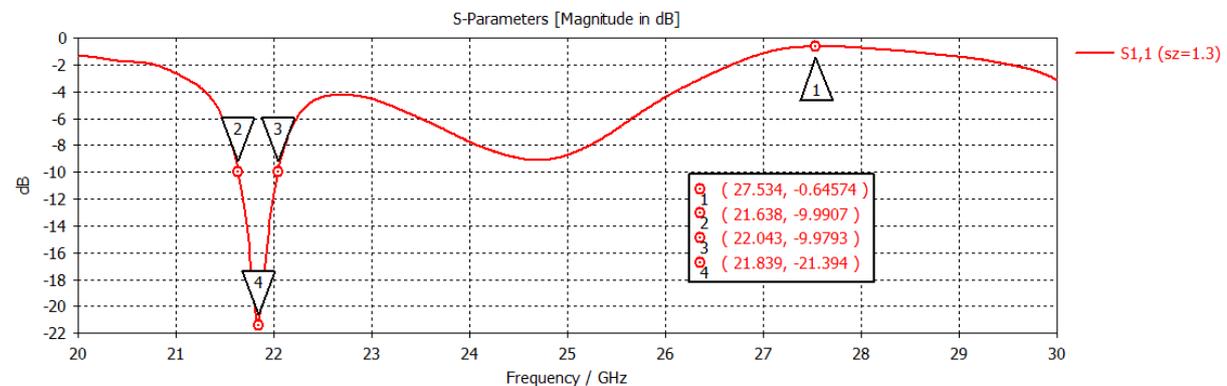


Figure III- 2 : S-Paramètre de la simulation 1

Le paramètre S (ou coefficient de réflexion) permet de visualiser le niveau d'adaptation à la fréquence de résonance (21.839 GHz). Dans la simulation 1, le paramètre S vaut -21.394 dB avec une bande passante allant de 21.638 à 22.043 GHz (Bande Passante=0.405 GHz).

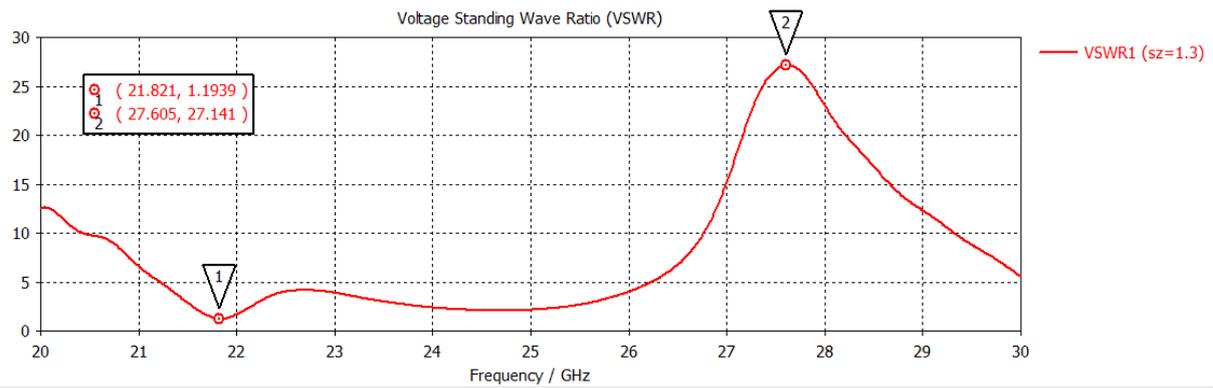


Figure III- 3 : VSWR de la simulation 1

Le paramètre VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ou rapport d'onde stationnaire permet d'exprimer la qualité d'adaptation de l'antenne, à une ligne de transmission. La valeur du VSWR de la simulation 1 vaut 1.186 à la fréquence de résonance (21.839GHz).

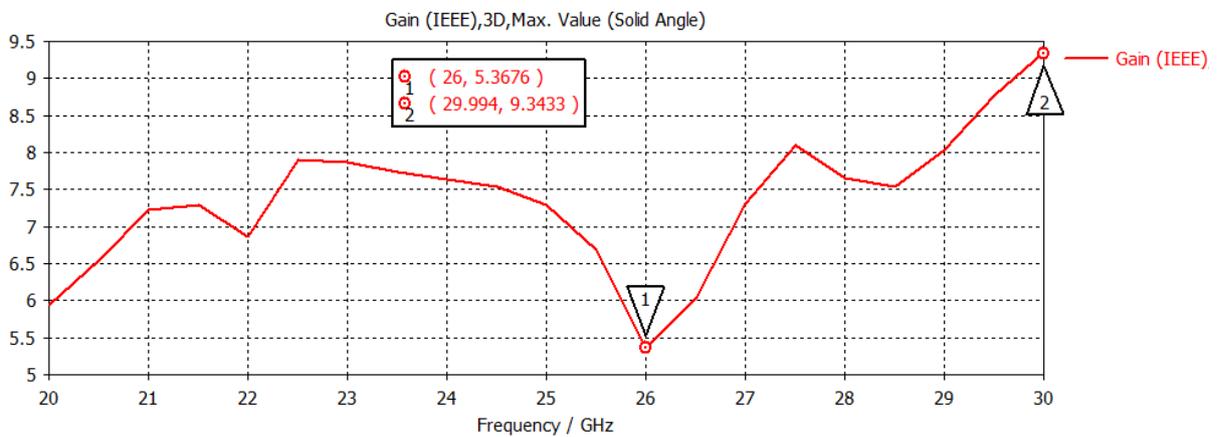


Figure III- 4 : Gain (IEEE) de la simulation 1

Dans la simulation 1, le gain de l'antenne est 7.005 dBi à fréquence de résonance (21.839GHz). Le gain maximal de l'antenne est 9.3433 dBi à 30 GHz donc l'antenne rayonne grandement.

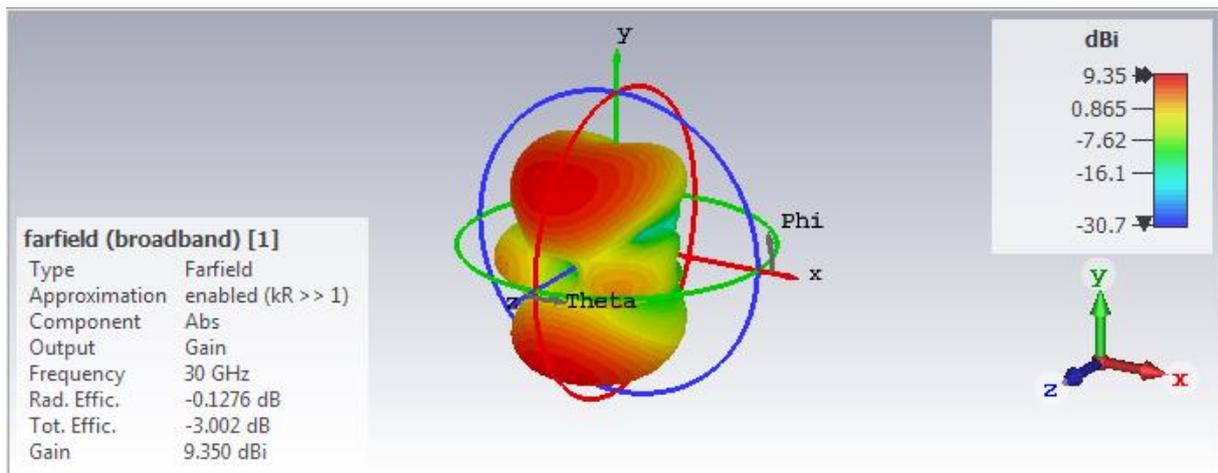


Figure III- 5 : Représentation du diagramme d'antenne en 3D pour une fréquence de 30 GHz

Farfield Gain Abs (Phi=0)

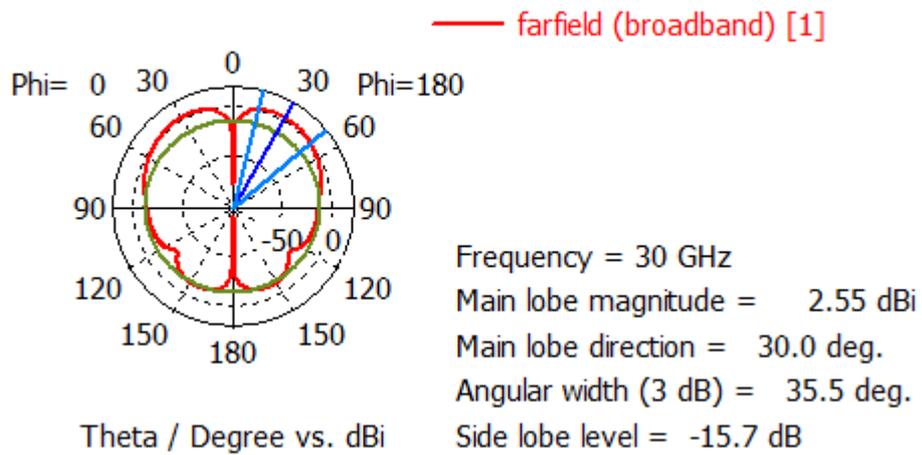


Figure III- 6 : Diagramme d'antenne en 1D

Farfield Theta/Phi (Phi=0)

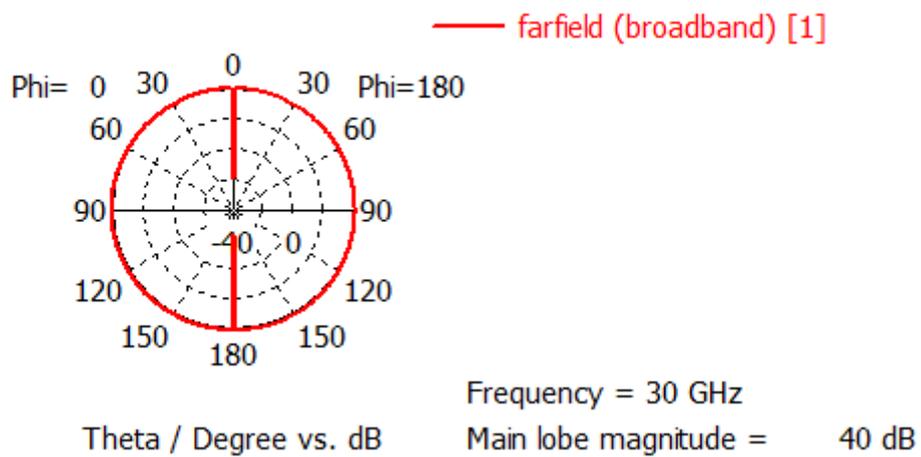


Figure III- 7 : Diagramme d'antenne pour Theta

Farfield Phi/Theta (Phi=0)

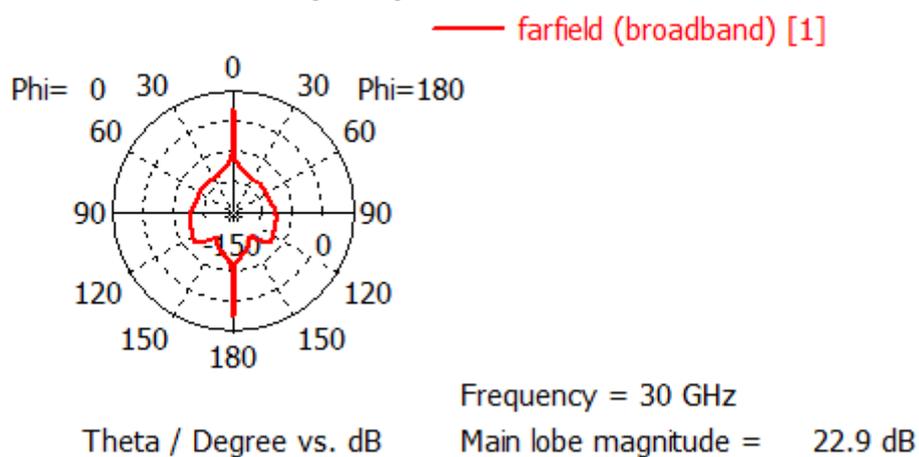


Figure III- 8 : Diagramme d'antenne pour Phi

B. Simulation 2

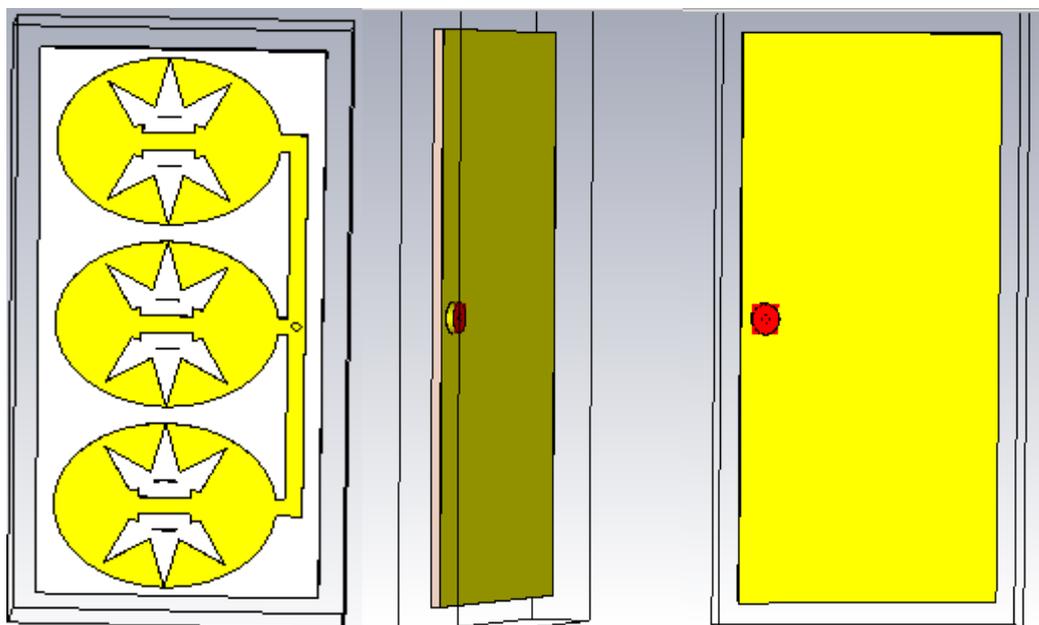


Figure III- 9 : Simulation 2 : Réseau d'antenne patch à trois éléments parallèles.

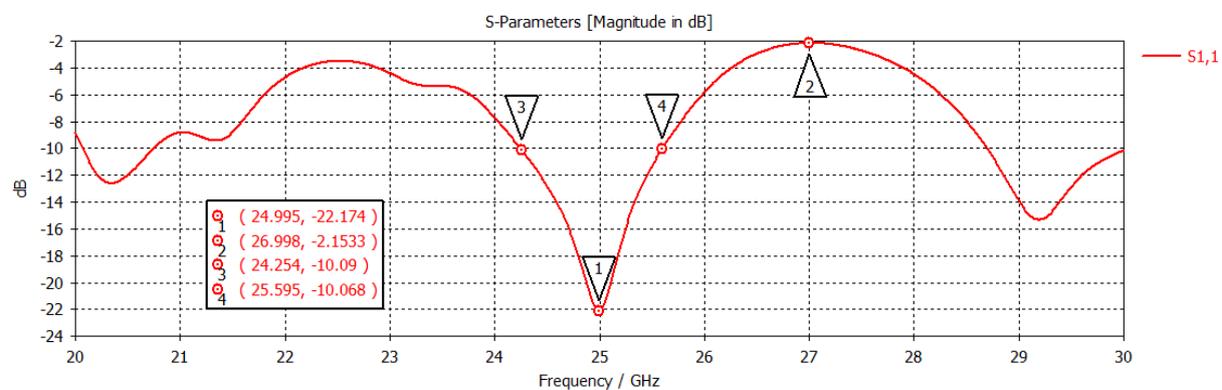


Figure III- 10 : S-Paramètre de la simulation 2

Dans la simulation 2, le paramètre S vaut -22.174 dB avec une bande passante allant de 24.254 à 25.595 GHz (Bande Passante=1.341 GHz).

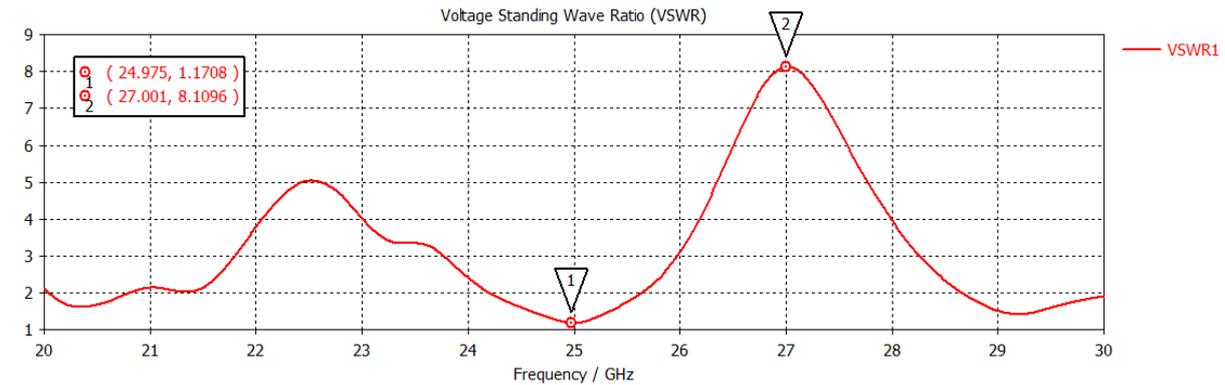


Figure III- 11 : VSWR de la simulation 2

Dans la simulation 2, le paramètre VSWR admet une valeur diminutive considérable par rapport à la simulation précédente. C'est qui nous donne une qualité d'adaptation plus meilleure que précédemment. La valeur du VSWR de la simulation 2 vaut 1.168 à la fréquence de résonance (24.995 GHz),

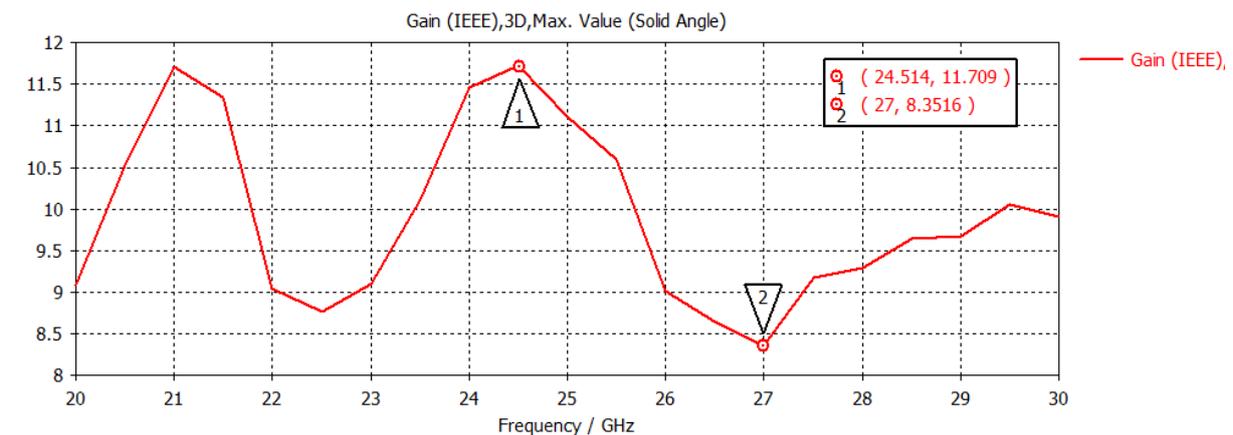


Figure III- 12 : Gain (IEEE) de la simulation 2

Dans la simulation 2, le gain de l'antenne est 11.125 dBi à la fréquence de résonance (24.995 GHz). Le gain maximal de l'antenne vaut 11.709 dBi à 24.514 GHz donc l'antenne admet un rayonnement beaucoup mieux que la précédente.

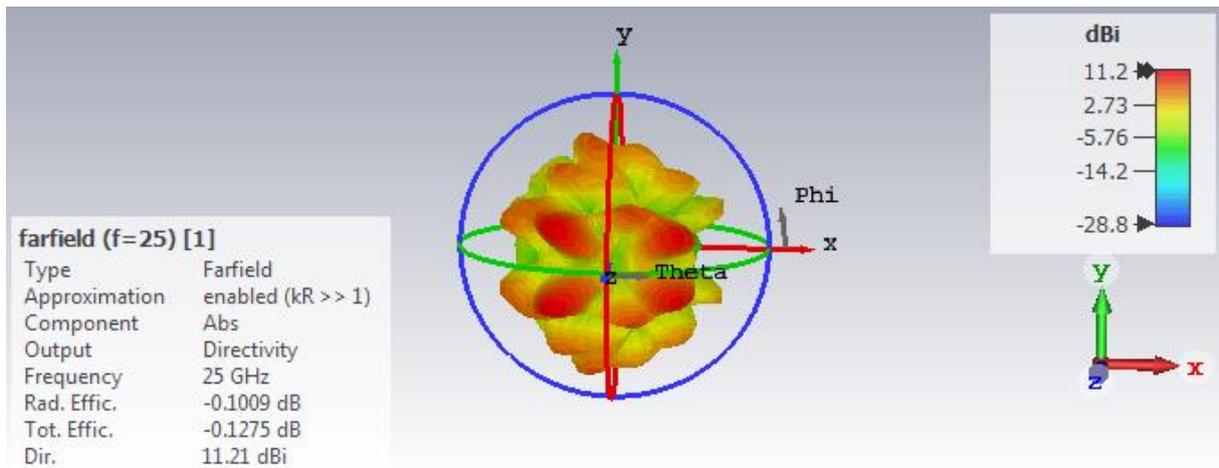


Figure III- 13: Représentation du diagramme d'antenne en 3D pour une fréquence de 30 GHz

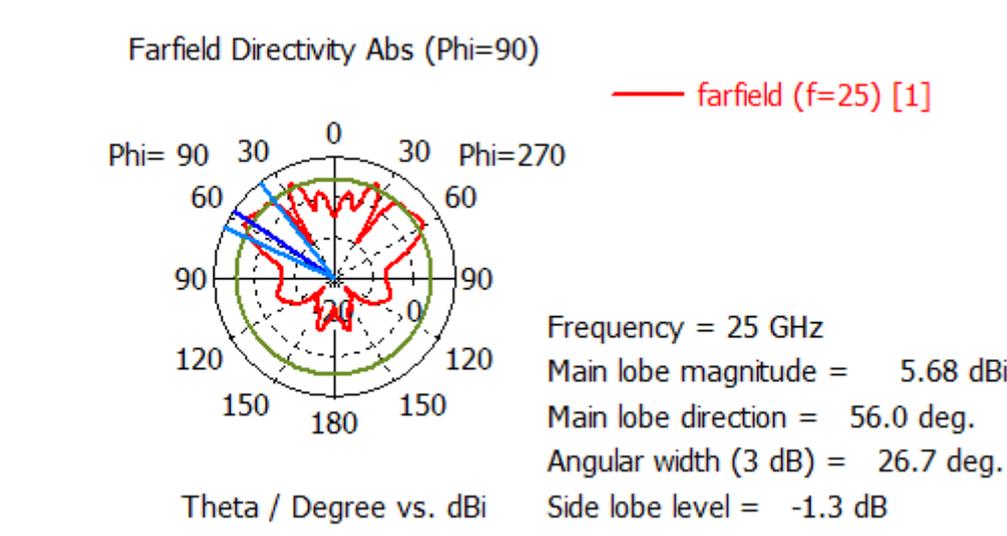


Figure III- 14: Diagramme d'antenne en 1D

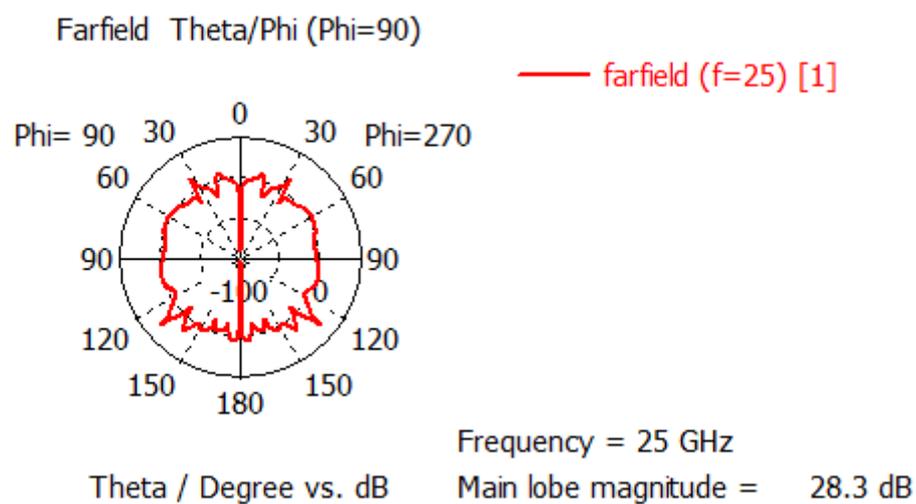
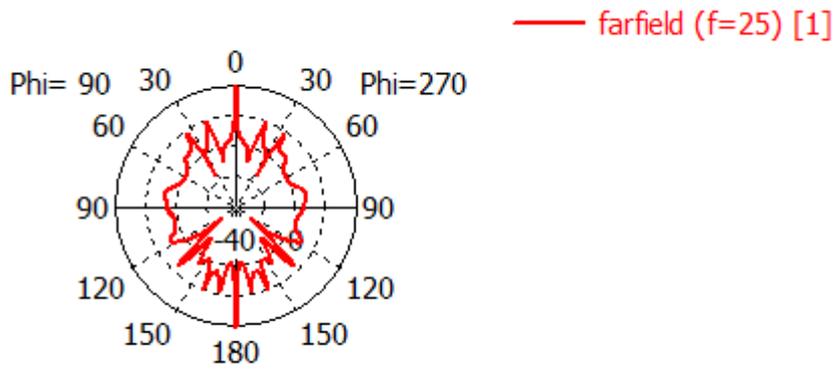


Figure III- 15: Diagramme d'antenne pour Theta

Farfield Phi/Theta (Phi=90)



Frequency = 25 GHz
 Main lobe magnitude = 40 dB
 Theta / Degree vs. dB

Figure III- 16: Diagramme d'antenne pour Phi

C. Simulation 3

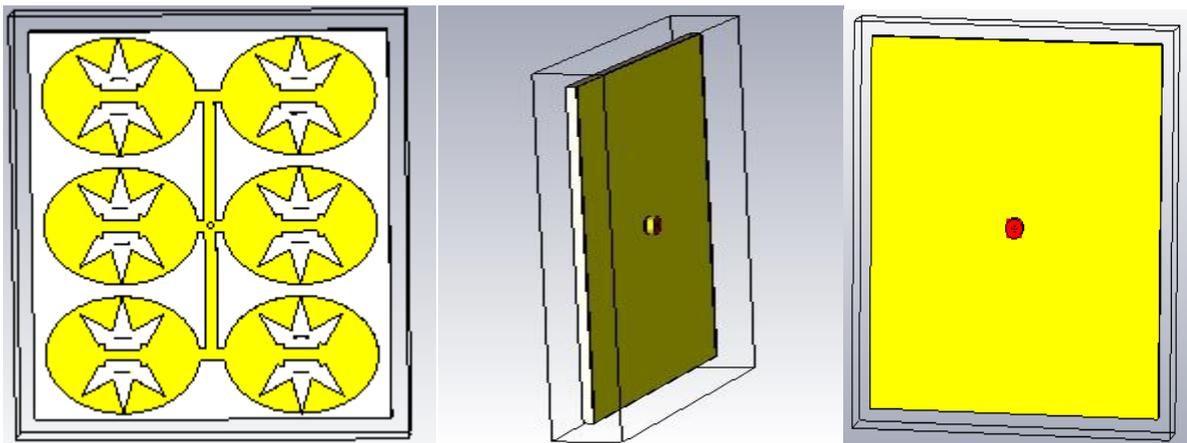


Figure III- 17 : Simulation 3 : Réseau d'antennes patch à six éléments parallèles.

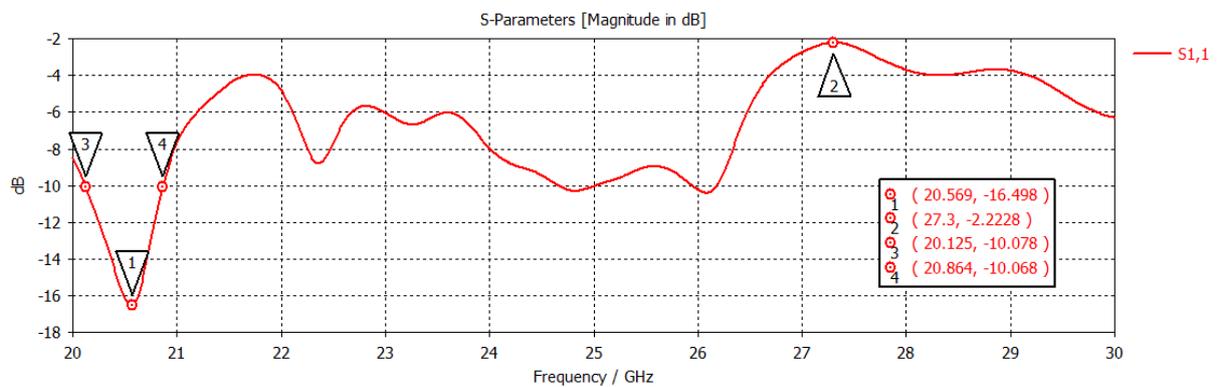


Figure III- 18 : S-Paramètre de la simulation 3

Dans la simulation 3, le paramètre S vaut -16.498 dB avec une bande passante allant de 20.125 à 20.864 GHz (Bande Passante=0.739 GHz).

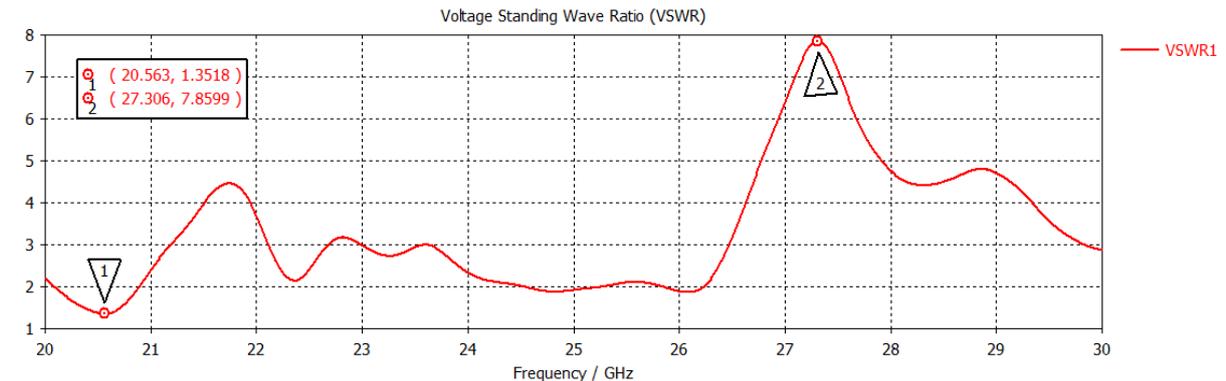


Figure III- 19 : VSWR de la simulation 3

Dans la simulation 3, le paramètre VSWR reste toujours favorable à la qualité d'adaptation de l'antenne donc elle diminue. La valeur du VSWR de la simulation 3 vaut 1.351 à la fréquence de résonance (20.569 GHz),

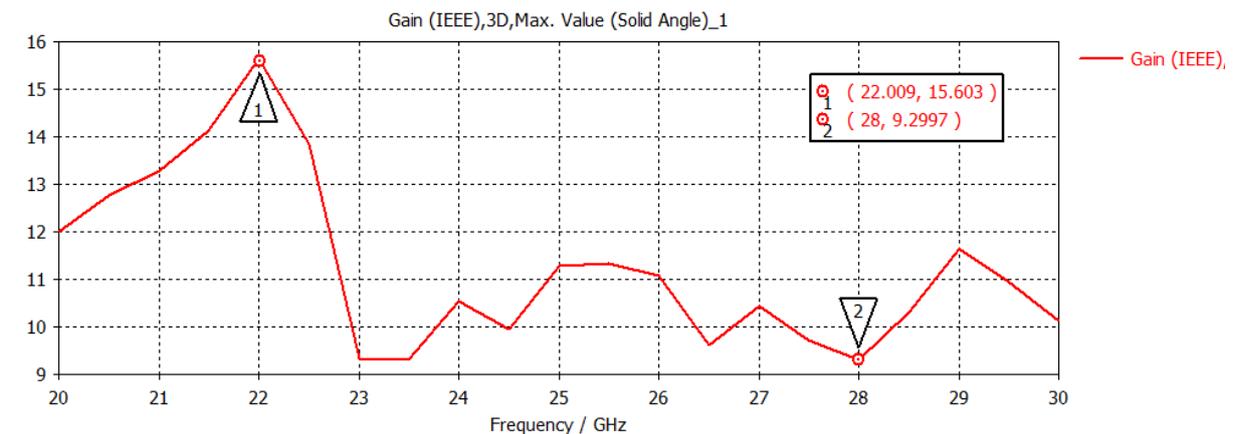


Figure III- 20 : Gain (IEEE) de la simulation 3

Dans la simulation 3, le gain de l'antenne est 12.838 dBi à la fréquence de résonance (20.569 GHz).

Le gain maximal de l'antenne vaut 15.602 dBi à 22.009GHz. Le gain minimum est presque égal au gain maximum de la simulation 1. Nous avons donc un rayonnement plus élevé.

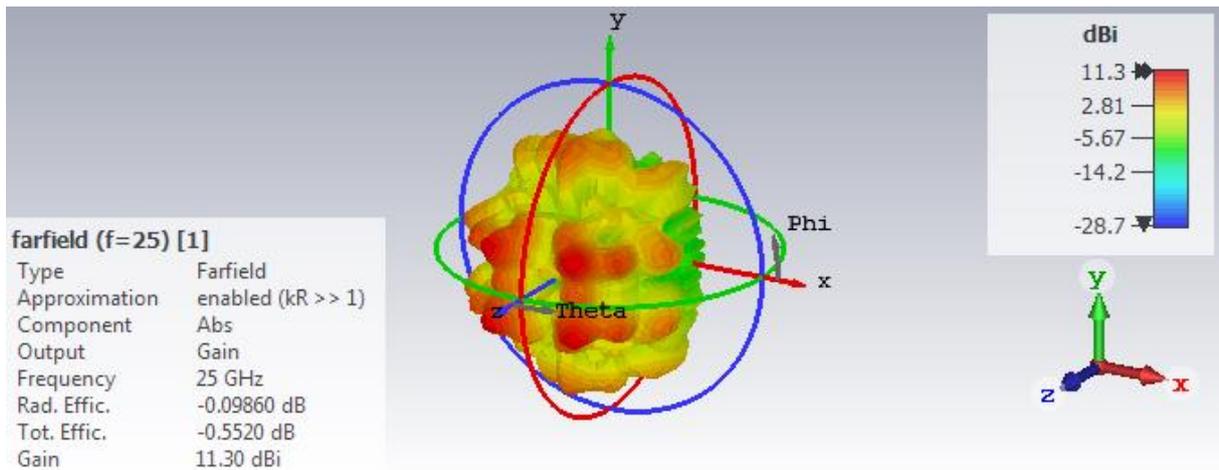


Figure III- 21: Représentation du diagramme d'antenne en 3D pour une fréquence de 30 GHz

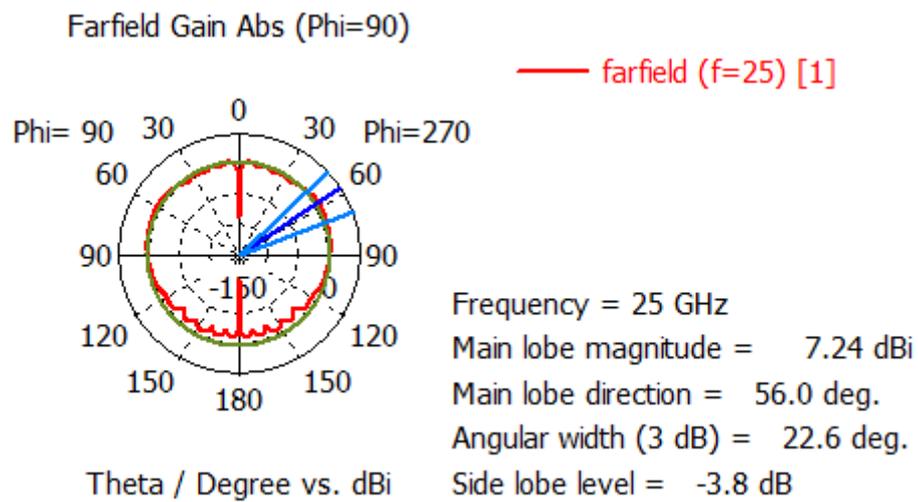


Figure III- 22: Diagramme d'antenne en 1D

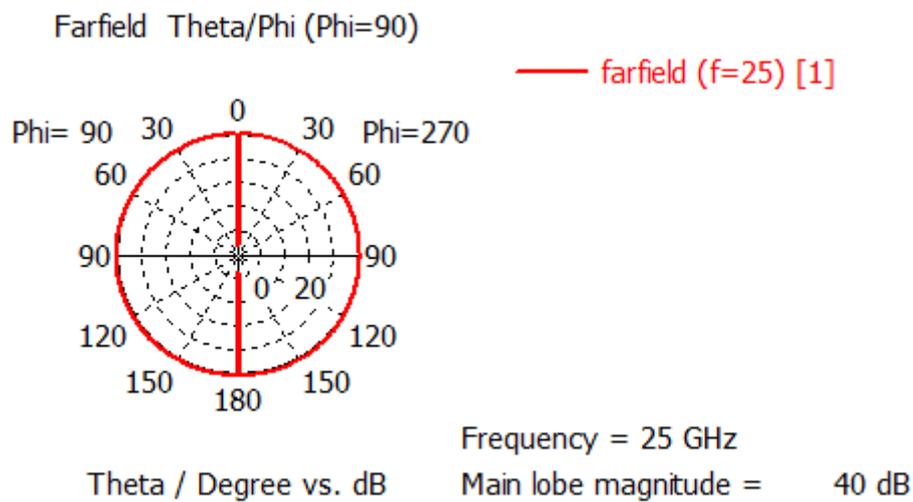


Figure III- 23: Diagramme d'antenne pour Theta

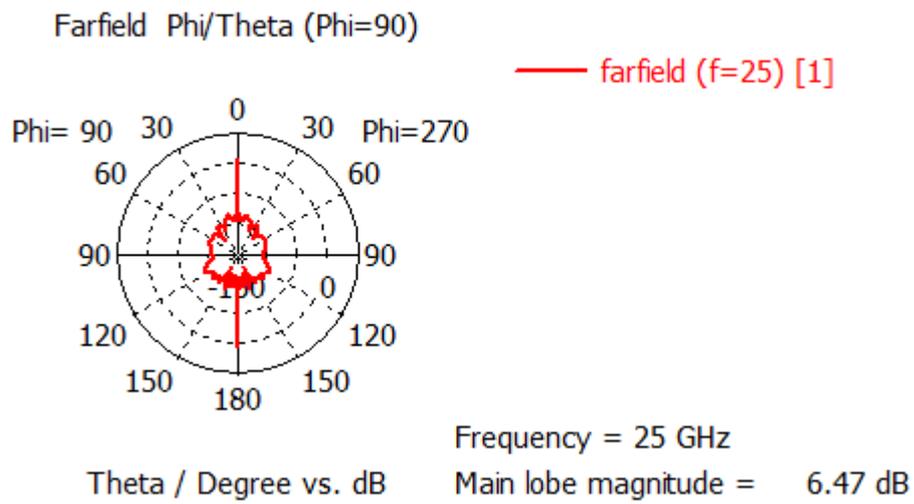


Figure III- 24:Diagramme d'antenne pour Phi

Résultats	S-Paramètres (dB)	Bande passante (GHz)	Fréquence de résonance (GHz)	VSWR à la résonance	Gain à la résonance (dBi)	Gain maximal (dBi)
Simulations						
Simulation 1	-21.394	0.405	21.839	1.186	7.005	9.3433 à 30GHz
Simulation 2	-22.174	1.341	24.995	1.168	11.125	11.709 à 24.514GHz
Simulation 3	-16.498	0.739	20.569	1.351	12.838	15.603 à 22.009GHz

Tableau III- 1 : Tableau comparatif des résultats issus des trois simulations.

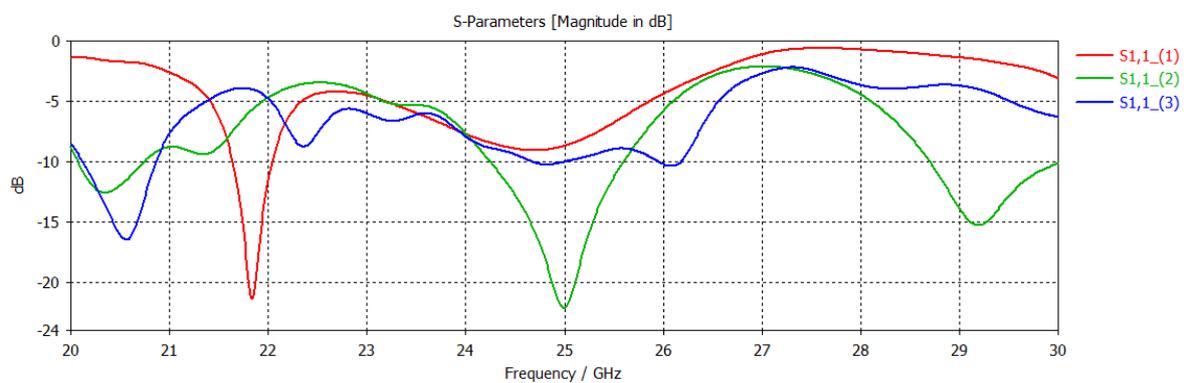


Figure III- 25 : Graphe du Paramètre S issu des 3 simulations.

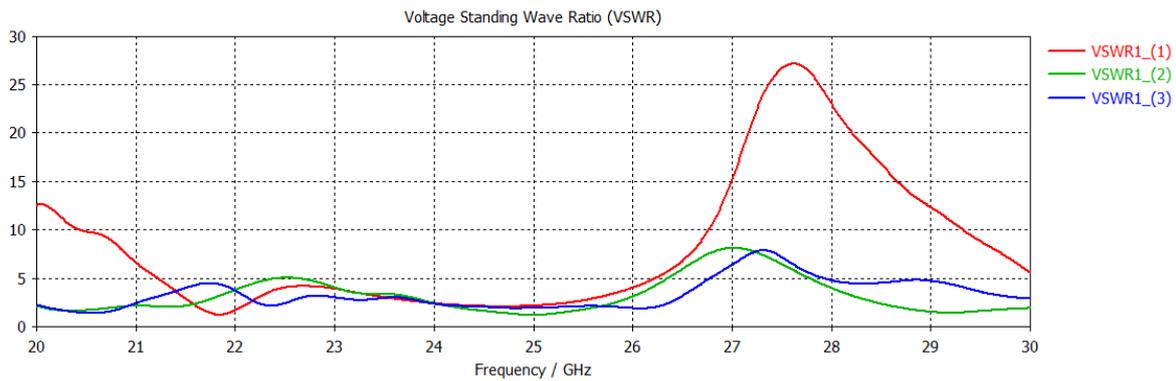


Figure III- 26 : Graphe du VSWR issu des 3 simulations

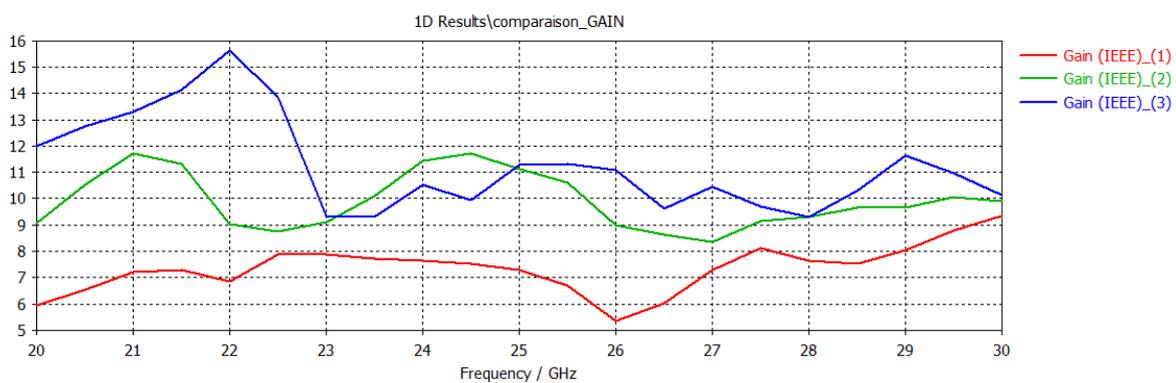


Figure III- 27 : Graphe du gain issu des 3 simulations.

Nous constatons une diminution par rapport au paramètre S et le paramètre VSWR de la simulation 1 à la simulation 3. Plus le paramètre VSWR est petit, plus la qualité d'adaptation de l'antenne à la ligne de transmission est meilleure.

Nous remarquons également une augmentation du gain d'où un rayonnement plus élevé.

III. Conclusion

A partir de la simulation d'une antenne patch à forme elliptique ,en mettant en jeu des paramètres (paramètre S, VSWR...) et en utilisant une technique d'augmentation de gain par un réseau d'antennes parallèles ,nous avons finalement réussi à avoir une antenne patch qui rayonne grandement.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les généralités sur les antennes ont démontrées leur principe de fonctionnement et les caractéristiques qu'il regorge.

Quant aux satellites de télécommunications, nous avons observé une merveilleuse architecture dont le fonctionnement est assuré par la charge utile.

La particularité des antennes patch réside dans leur coté miniature. Les principales applications de ces éléments rayonnants sont : communications par satellites, antennes pour l'aéronautique, téléphonie mobile, identification sans contact, antennes pour le biomédical, objets communicants, etc.

Comme l'on prouvés, les résultats issus des tests, l'élément rayonnant ou patch rayonne intensément en présence d'un réseau d'antennes utilisé comme technique d'augmentation du gain. Cette technique nous a permis d'améliorer le gain tout en assurant une qualité meilleure d'adaptation de l'antenne grâce à l'expression et l'implication des paramètres comme le paramètre S, le VSWR...

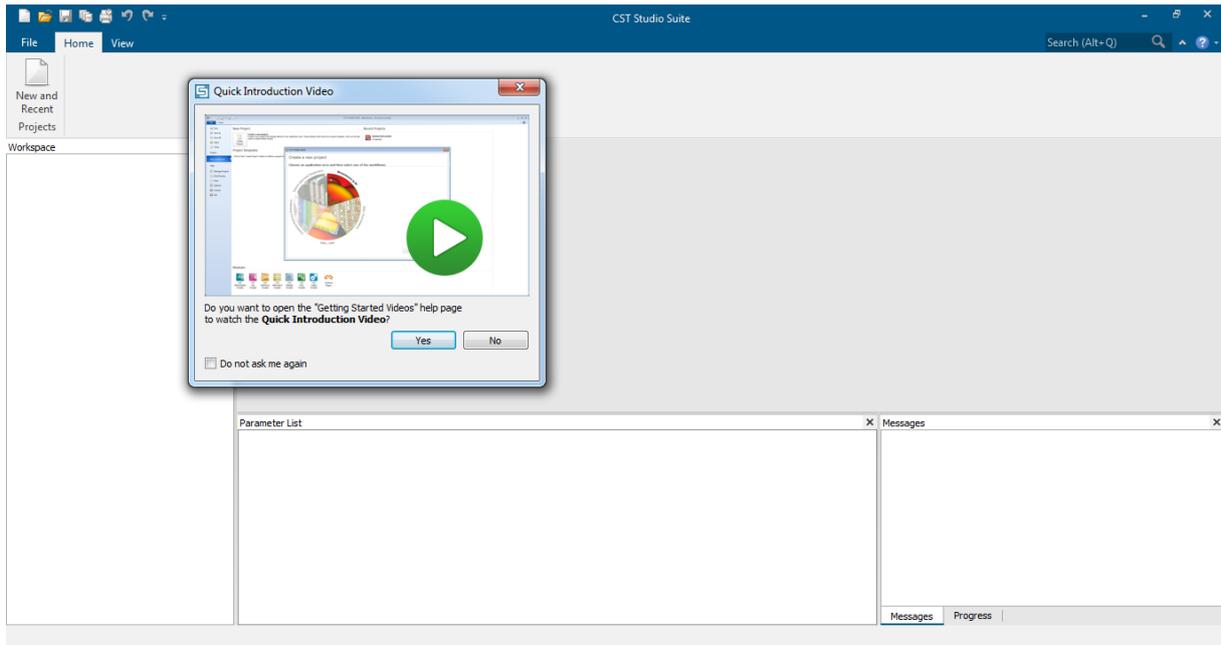
Comme perspectives, on peut aller au de-là d'un réseau de plus de six (6) antennes, cela nous permettra d'augmenter de façon exponentielle le gain de l'antenne. Nous pouvons également utiliser la partie descendante de la bande KA car on a juste travailler dans sa partie montante. On peut procéder à des réalisations de nos modèles conçus lors de la simulation (c'est-à-dire matérialiser la partie théoriquement simulée). On peut également augmenter la bande passante pour un gain plus élevé.

Annexes

Description du logiciel CST

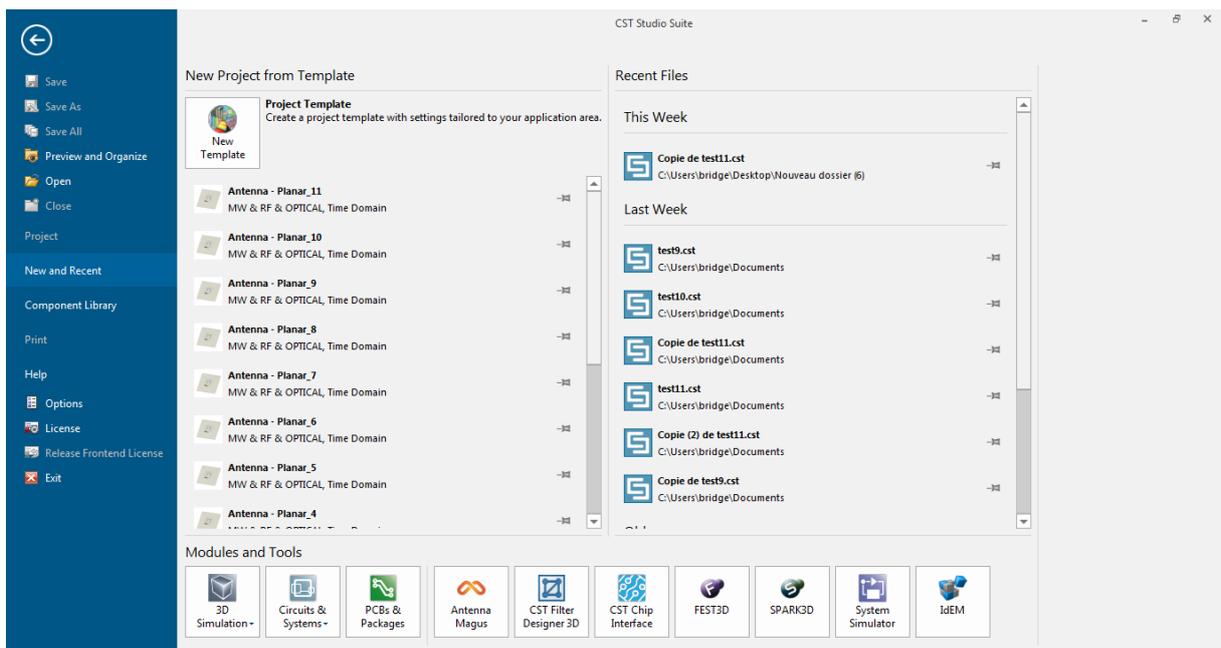
CST STUDIO SUITE propose un large panel d'outil d'analyse des systèmes électromagnétiques. Il permet d'effectuer des simulation de systèmes complexes (comme les antennes patch et autres) avec une précision inégalée sur un spectre de fréquence extrêmement large.[25]

Lorsque vous lancez le logiciel, vous aurez comme interface d'accueil, l'image suivante :



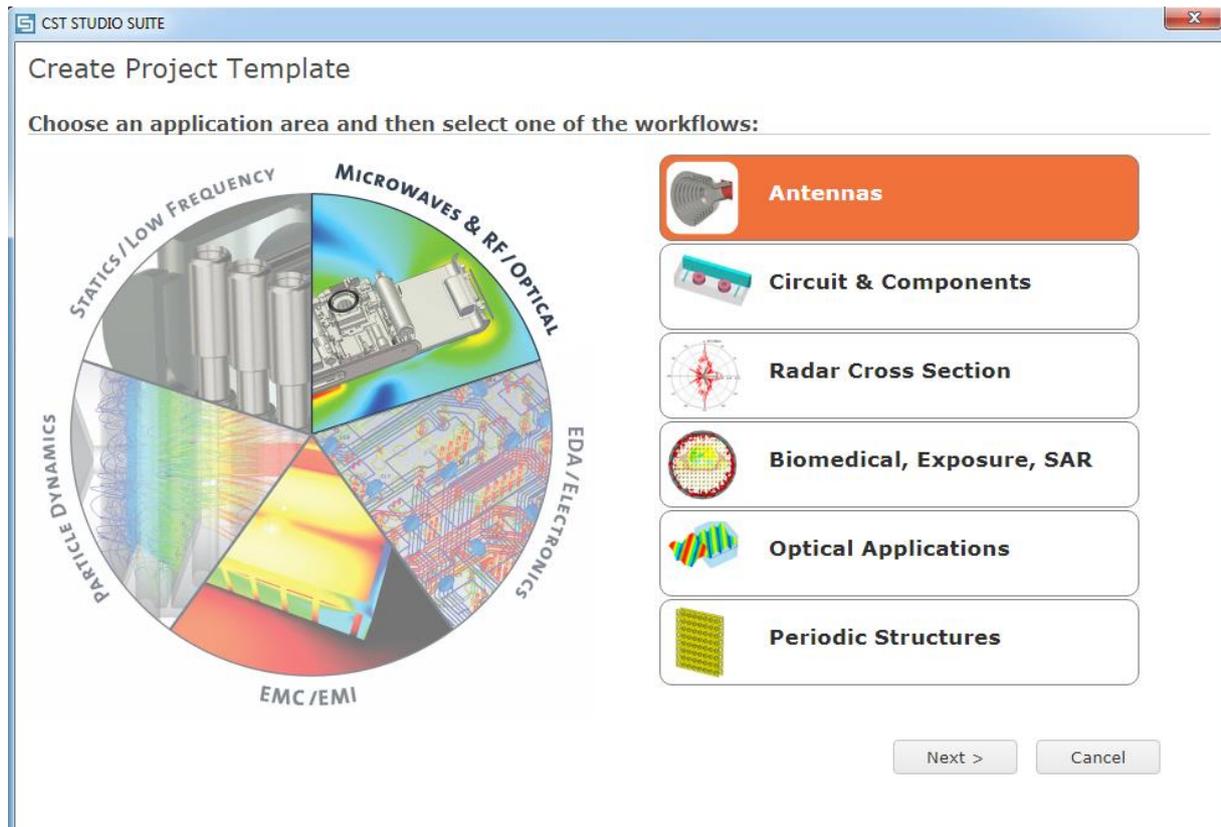
L'interface d'accueil nous propose de visionner une vidéo tutorielle pour débutants.

Si vous choisissez « NO », vous passez à l'interface suivante illustrée ci-dessous :

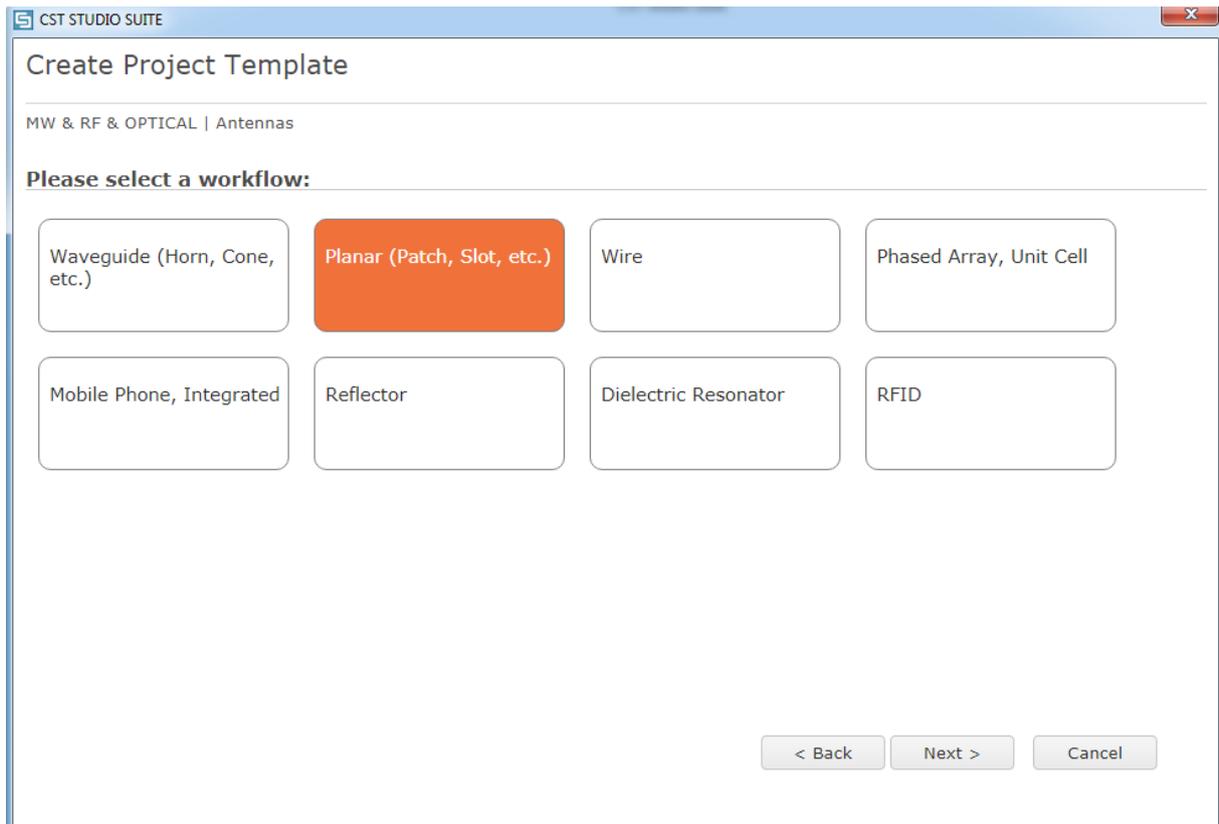


Vous remarquerez les fichiers récents à droite. Pour créer un nouveau projet, il vous suffit de cliquer sur la zone « New Template ».

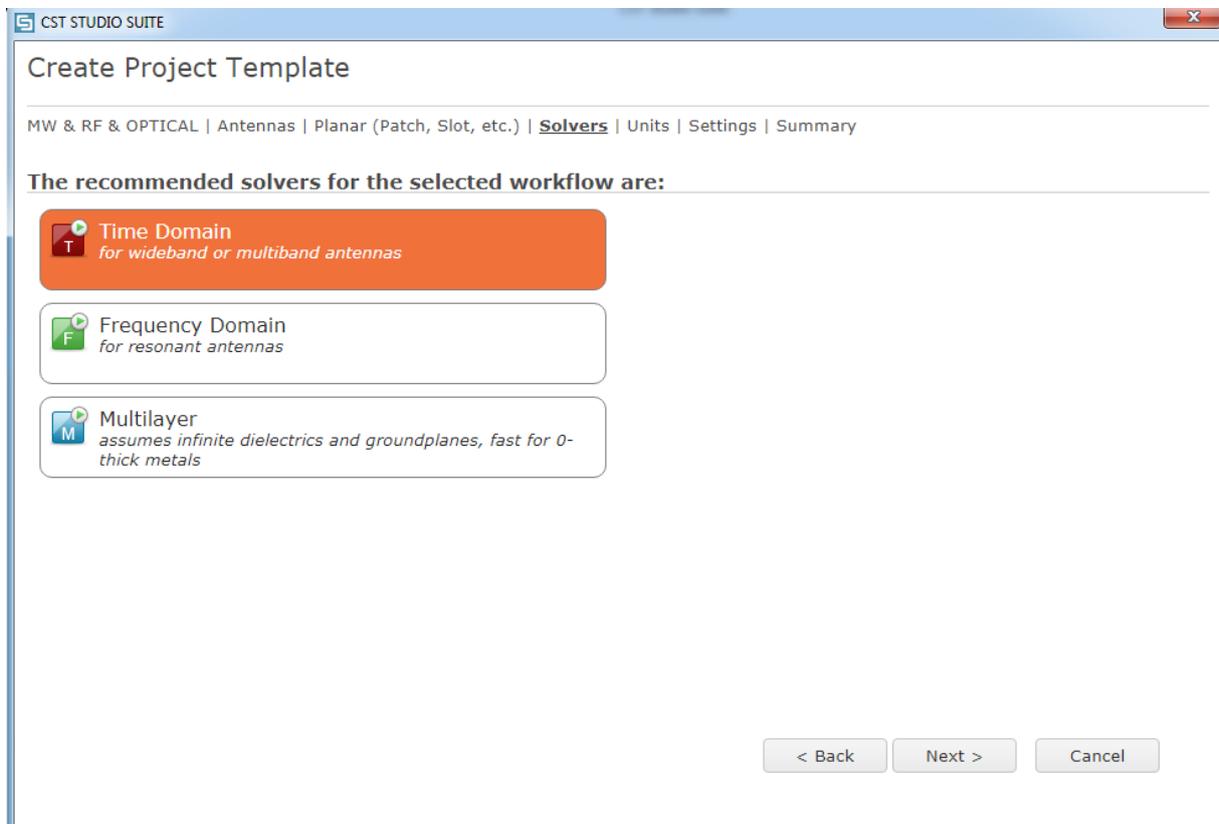
Il y a plusieurs domaines d'applications, choisissez-en un puis sélectionnez une branche d'études. Nous avons choisi Antennes comme branche d'études.



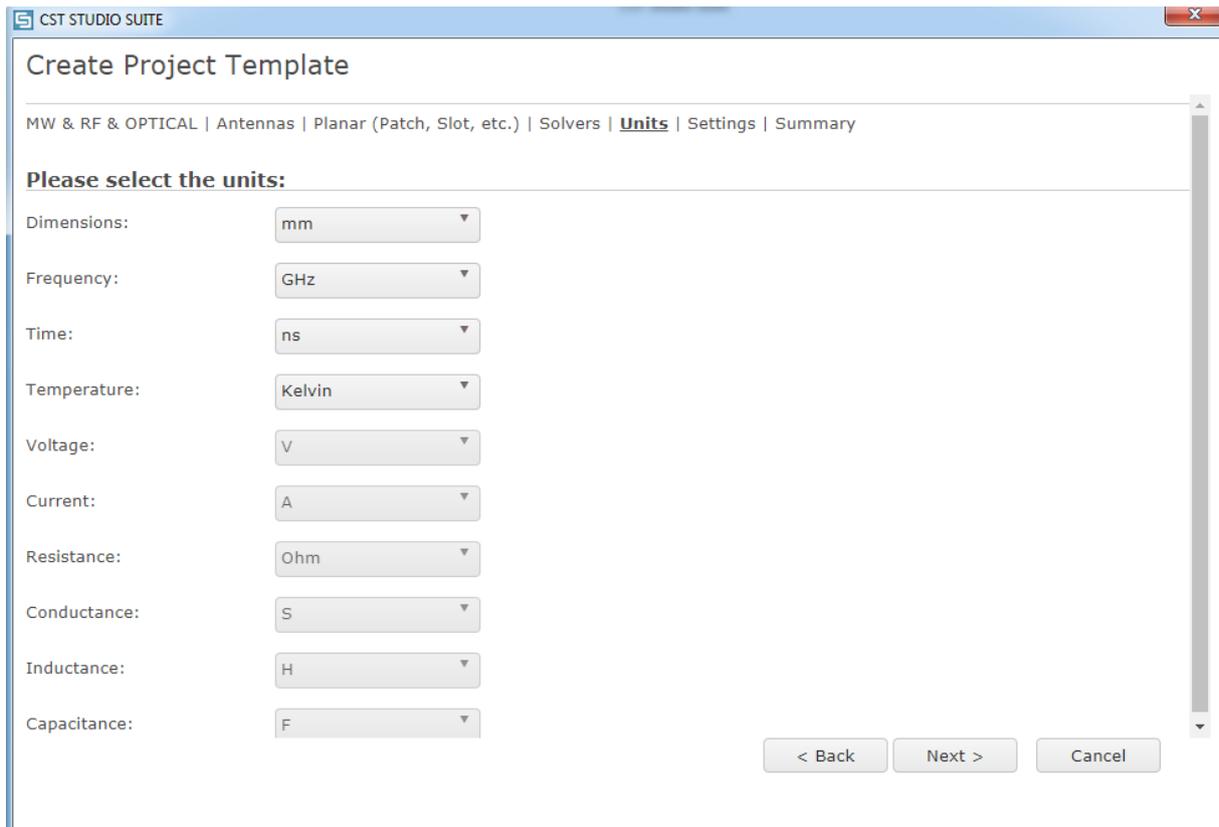
Par la suite, on doit choisir le type d'antenne à étudier. Nous avons opté pour « Antenne Planaire ou Patch »



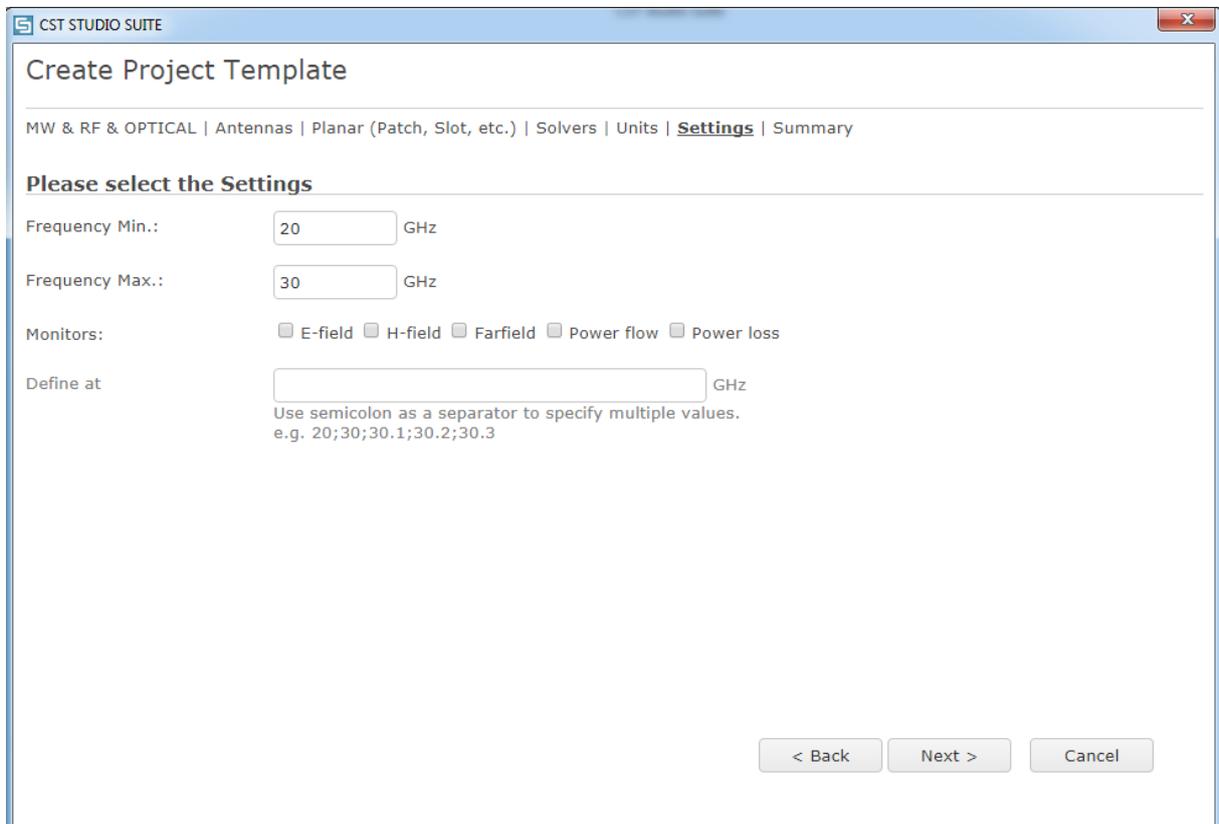
Le logiciel nous propose trois solveurs recommandés propres aux types de branches à étudier. Notre choix s'est posé sur « Time Domain ».



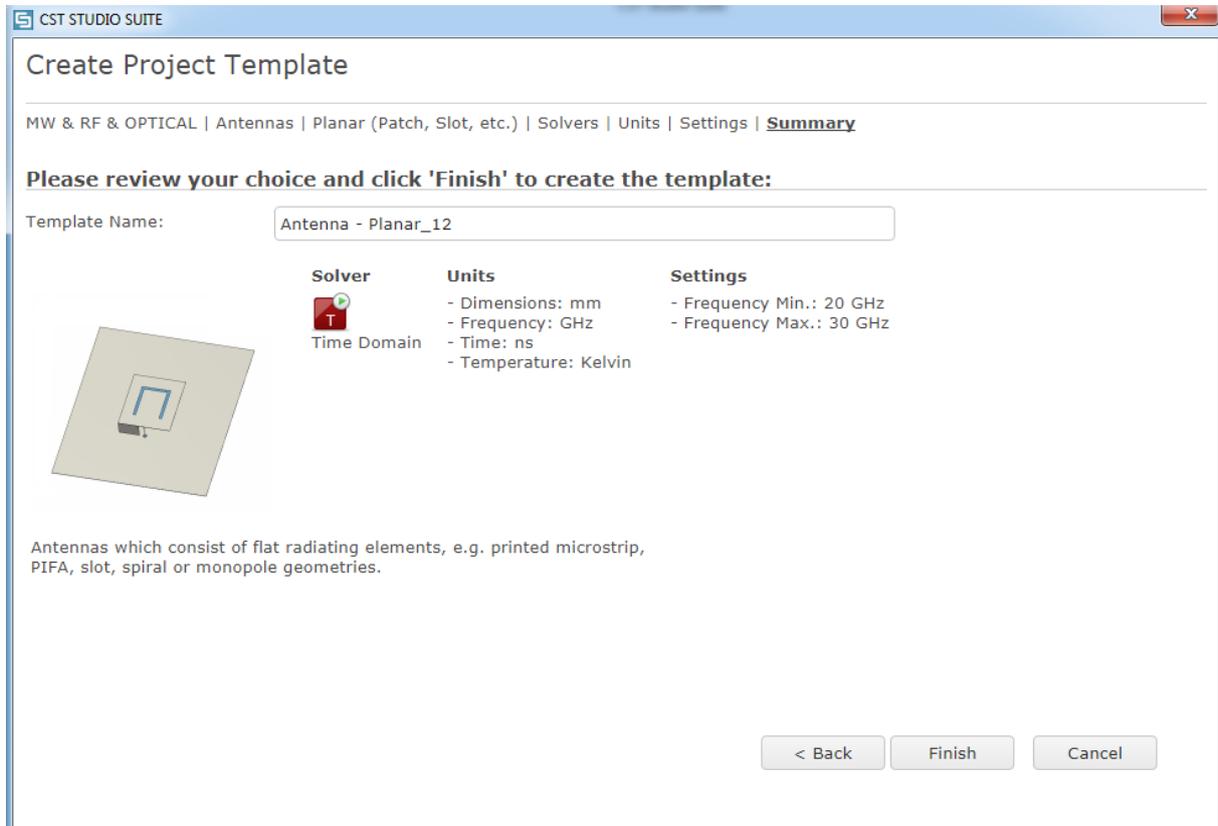
En pressant sur « Next », nous aurons l'interface suivante :



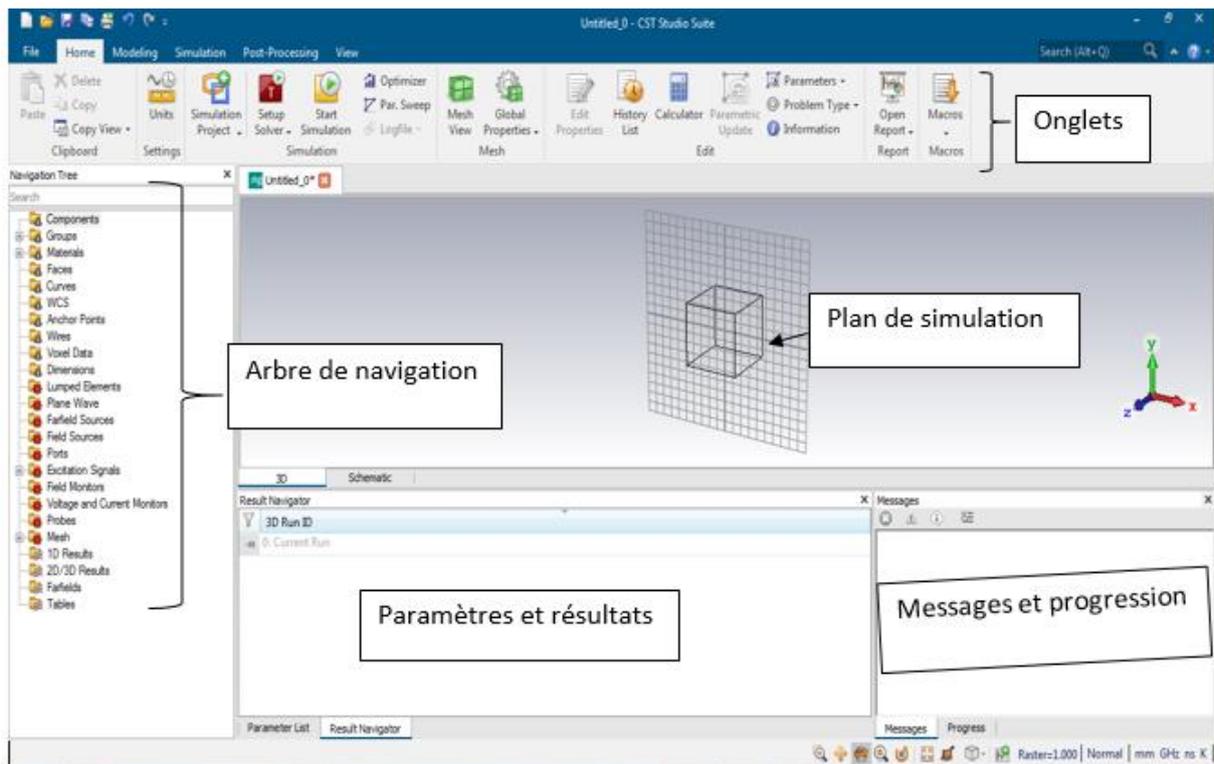
On doit choisir la bande de fréquence propre à notre étude.



En pressant sur « Finish », nous procédons ainsi à la création d'un nouveau projet.



Ci-dessous, nous avons l'interface de travail du logiciel CST.



Références

Références

- [1] A. Boyer, "Cours_antennes_oct11_v4_5RT," *INSA Toulouse, octobre, 2011.*
- [2] D. Grenier, "Electromagnétisme et transmission des ondes," *quebec (qc), g1v0a6, dg-2000, vol. 2004, 2001.*
- [3] D. Bensoussan and D. Bensoussan, *Les antennes.* Dunod, 1980.
- [4] G. Clementi, "Conception et caractérisation fréquentielle et temporelle d'antennes réseaux planaires à très large bande passante," 2011.
- [5] S. Melihi, T.-h. Fengal, and M. Rouha, "Antenne De Téléphonie Mobile Caractérisation Et Optimisation," Université abderrahmane mira béjaia, 2016.
- [6] B. Fayçal, "Propagation d'ondes et Antennes," *Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel, vol. 2017, 2016.*
- [7] M. L. BOUSSADA and B. RAHICHE, "Etude et simulation d'un métasubstrat pour la réalisation des antennes patch," 2017.
- [8] M. Huchard, "Caractérisation et Conception d'Antennes Isotropes Miniatures pour Objets Communicants," 2007.
- [9] B. Atti, M. Mekaouche, and M. Rouha, "L'effet des caractéristiques de l'antenne patch sur sa directivité," Université abderrahmane mira béjaia, 2014.
- [10] G. Kumar and K. P. Ray, *Broadband microstrip antennas.* Artech house, 2003.
- [11] V. Palanisamy and R. Garg, "Analysis of arbitrarily shaped microstrip patch antennas using segmentation technique and cavity model," *IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 34, no. 10, pp. 1208-1213, 1986.*
- [12] H. Chorfi, "Conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique," Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2012.
- [13] A. Benomar, "Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques.: Application aux Réseaux de Télécommunications," 2015.
- [14] A. K. Bhattacharyya, "Long rectangular patch antenna with a single feed," *IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 38, no. 7, pp. 987-993, 1990.*
- [15] C. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design "2nd edition, John Wiley & Sons Inc," *New York, 1997.*
- [16] L. Chouti, "Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage," 2009.
- [17] Z. Cai and J. Bornemann, "Generalized spectral-domain analysis for multilayered complex media and high-T/sub c/superconductor applications," *IEEE transactions on microwave Theory and Techniques, vol. 40, no. 12, pp. 2251-2257, 1992.*
- [18] H. Errifi, A. Baghdad, A. Badri, and A. Sahel, "Conception et simulation d'une antenne réseau directive à deux patch triangulaires pour les applications dans la bande X," in *Colloque international Télécom, 2015.*
- [19] M. Terré, "terre@ cnam. fr."
- [20] L. Zine, "Performance d'un code convolutif concaténé à un code Reed solomon via un canal satellite non linéaire," 2011.
- [21] T. Ferdinand, "L'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace," 2008.
- [22] M. B. Mohamed, "Les Satellites et leurs applications," 2006.
- [23] A. C. Lepage, "Introduction aux télécommunications par satellites."
- [24] E. Dubois, "Convergence dans les réseaux satellite," 2008.
- [25] *dps-fr.com.*