

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT TELECOMMUNICATIONS

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention

du DIPLOME d'INGENIEUR

Spécialité : Télécommunications

Option : Radiocommunications

par : ANDRIATSIHOARANA Malalaniaina Volasoa

***LA PREPONDERANCE DE L'HYPERFREQUENCE
DANS LA TELECOMMUNICATION***

Soutenu le 11 décembre 2007 à 14h devant la Commission d'Examen composée de :

Président :

M. RANDRIAMITANTSOA Paul Auguste

Examineurs :

M. RAKOTOMIRAHO Soloniaina

M. RAZAKARIVONY Jules

M. BOTO ANDRIANANDRASANA Jean Espérant

Directeur de mémoire :

M. RADONAMANDIMBY Edmond Jean Pierre.

REMERCIEMENTS

Je rends grâce à Dieu pour sa bonté, de m'avoir donné la force et la santé durant la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à adresser mes vifs remerciements aux personnes suivantes sans qui ce travail de mémoire n'aurait pas pu être réalisé :

Monsieur **RAMANANTSIZEHENA Pascal**, Professeur, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) ;

Monsieur **RANDRIAMITANTSOA Paul Auguste**, Professeur, Chef du Département Télécommunication à l'ESPA, qui nous fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire ;

Monsieur **RADONAMANDIMBY Edmond Jean Pierre**, Assistant, Enseignant Chercheur au sein du Département Télécommunication à l'ESPA, Directeur de ce mémoire, qui malgré ses responsabilités m'a toujours prodigué ses conseils. Je tiens à lui adresser toute ma gratitude ;

Monsieur **RAKOTOMIRAHIO Soloniaina**, Professeur au sein du Département Electronique à l'ESPA, membre du Jury ;

Monsieur **RAZAKARIVONY Jules**, Maître de Conférences, Enseignant Chercheur au sein du Département Télécommunication à l'ESPA, membre du Jury ;

Monsieur **BOTO ANDRIANANDRASANA Jean Espérant**, Assistant, Enseignant Chercheur au sein du Département Télécommunication à l'ESPA, membre du Jury.

Je n'oublierai pas ma famille pour leur soutien moral et affectif ainsi que leurs encouragements, pendant l'élaboration de ce mémoire. Ma profonde reconnaissance va à l'endroit de mes parents pour leurs sacrifices durant ces longues années afin que je puisse arriver à ce niveau, et à mon mari qui n'a cessé de m'apporter tout son appui

Enfin, que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire trouvent ici toute ma gratitude.

AVANT PROPOS

L'ensemble du domaine fréquentiel des ondes électromagnétiques fait l'objet d'une subdivision conventionnelle en gammes qui correspond en gros à des modes de propagation et à des types d'utilisation très différents.

Dès le début de la radiotechnique, l'attribution des gammes d'ondes à des services et à des utilisateurs particuliers a dû faire l'objet de conventions internationales.

Les faisceaux hertziens qui constituent une part importante du réseau de télécommunications à grande distance occupent des fréquences situées entre 250 MHz et 22 GHz

Les liaisons par satellite constituent un cas particulier auquel on attribue des fréquences pouvant aller jusqu'à 30 GHz.

TABLES DES MATIERES

TABLES DES MATIERES.....	i
NOTATIONS	vi
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 . EVOLUTION DE LA TELECOMMUNICATION.....	3
1.1 Communication visuelle.....	3
1.2 Télégraphe visuel et mécanique.....	3
1.3 Télégraphe électrique.....	4
1.4 Téléphone	4
1.5 La radio.....	5
1.6 La télévision.....	5
1.7 Les satellites.....	6
1.8 Internet	7
1.9 Les réseaux sans fils.....	7
1.9.1 L'idée de réseau sans fil	7
1.9.2 Leur catégorie.....	8
1.10 Le GSM	9
1.10.1 Conception	9
1.10.2 Caractéristique de l'interface radio.....	9
1.10.3 Les services	10
1.11 Le CDMA	11
1.11.1 Historique	11
1.11.2 Description	11
1.11.3 Les méthodes utilisées par le CDMA.....	11
1.11.4 Bande de fréquence utilisée	12
1.12 Les réseaux locaux WiFi (ou Wireless Fidelity)	12
1.12.1 Présentation	12
1.12.2 Disponibilité	13
1.12.3 Les fréquences utilisées.....	13
1.13 Le WiMax.....	14
1.13.1 Généralités	14
1.13.2 La gamme de fréquence utilisée	14
1.13.3 Les contraintes techniques.....	14
1.13.4 Usages du WiMAX.....	15
CHAPITRE 2 . PRINCIPES ET METHODES.....	16
2.1 Objectif des télécommunications.....	16

2.1.1	Définition	16
2.1.2	Commentaire	16
2.1.3	Les types de services.....	17
2.2	<i>Milieu ou canal de transmission</i>	18
2.2.1	Définitions de « lignes et ondes ».....	18
2.2.2	Description d'une transmission.....	18
2.3	<i>La transmission analogique</i>	19
2.3.1	Principe	19
2.3.2	Les fréquences transmises	20
2.3.3	Caractéristique des signaux transmis.....	20
2.3.4	Caractéristiques du canal de transmission	20
2.3.5	Critère de qualité de transmission analogique	20
2.4	<i>La transmission numérique</i>	21
2.4.1	Principe	21
2.4.2	Représentation de l'information numérique	22
2.4.3	Mode de transmission	22
2.4.4	Influence du canal	23
2.4.5	Notion de perturbation	23
2.5	<i>Intérêt du numérique face à l'analogique (transmission vocale)</i>	24
2.6	<i>Modulations</i>	25
2.6.1	Modulations analogiques	25
2.6.1.1	Principe.....	25
2.6.1.2	Modulation analogique discrète.....	25
2.6.2	Modulations numériques	25
2.6.2.1	Principe.....	25
2.6.2.2	Types.....	26
CHAPITRE 3 .ETUDE FREQUENTIELLE		27
3.1	<i>Les basses et moyennes fréquences</i>	27
3.1.1	Etude	27
3.1.2	Inconvénients	27
3.2	<i>Les hautes fréquences</i>	28
3.2.1	Gamme de fréquence	28
3.2.2	Présentation	28
3.2.3	Inconvénients	29
3.2.3.1	Problème de distance.....	29
3.2.3.2	Solution pour la distance	29
3.2.3.3	Problème en fréquence.....	30
3.2.3.4	Solution pour la fréquence.....	30
3.3	<i>Les hyperfréquences</i>	30
3.3.1	Très hautes et ultra hautes fréquences	30

3.3.1.1	<i>Avantages et conditions.....</i>	<i>30</i>
3.3.1.2	<i>Inconvénient et limite.....</i>	<i>31</i>
3.3.1.3	<i>Principes.....</i>	<i>31</i>
3.3.2	<i>Modulation.....</i>	<i>32</i>
3.3.3	<i>Mode de transmission de l'hyperfréquence</i>	<i>32</i>
3.3.3.1	<i>Moyen de transport.....</i>	<i>32</i>
3.3.3.2	<i>Charges.....</i>	<i>32</i>
3.3.4	<i>Les faisceaux micro-ondes</i>	<i>33</i>
3.3.4.1	<i>Généralités.....</i>	<i>33</i>
3.3.4.2	<i>Les satellites de télécommunication.....</i>	<i>33</i>
3.3.4.3	<i>Orbites géostationnaires.....</i>	<i>33</i>
CHAPITRE 4 .	LES ONDES.....	35
4.1	<i>Propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère</i>	<i>35</i>
4.1.1	<i>Mode de propagation d'ondes.....</i>	<i>35</i>
4.1.2	<i>Puissance de rayonnement.....</i>	<i>35</i>
4.1.3	<i>Polarisation d'une onde</i>	<i>36</i>
4.1.3.1	<i>Les types de polarisation</i>	<i>36</i>
4.1.3.2	<i>Applications des polarisations.....</i>	<i>37</i>
4.2	<i>Fréquence et longueur d'onde.....</i>	<i>38</i>
4.3	<i>Génération d'onde.....</i>	<i>38</i>
4.4	<i>Présentation de l'atmosphère.....</i>	<i>39</i>
4.4.1	<i>L'atmosphère terrestre</i>	<i>39</i>
4.4.2	<i>Particularité de l'ionosphère</i>	<i>39</i>
4.5	<i>Les types de propagation.....</i>	<i>40</i>
4.5.1	<i>Propagation superficielle</i>	<i>40</i>
4.5.2	<i>Propagation ionosphérique.....</i>	<i>41</i>
4.5.2.1	<i>Avantages</i>	<i>41</i>
4.5.2.2	<i>Désavantages.....</i>	<i>41</i>
4.5.3	<i>Propagation troposphérique.....</i>	<i>41</i>
4.6	<i>Condition aux limites</i>	<i>41</i>
4.6.1	<i>Les ondes d'espace</i>	<i>41</i>
4.6.2	<i>Choix de l'hyperfréquence pour les satellites</i>	<i>42</i>
4.6.3	<i>Rayon équivalent de la terre</i>	<i>42</i>
4.6.4	<i>Rayon de courbure de la trajectoire de la transmission</i>	<i>43</i>
4.6.5	<i>Propagation en visibilité directe.....</i>	<i>44</i>
4.7	<i>Classification des gammes d'ondes</i>	<i>45</i>
4.8	<i>Gammes d'ondes attribuées à la radiodiffusion.....</i>	<i>45</i>
4.9	<i>Gammes d'ondes attribuées aux radiocommunications</i>	<i>46</i>
4.10	<i>Réception en diversité.....</i>	<i>48</i>
CHAPITRE 5 .	NOTIONS SUR LES ANTENNES.....	50

5.1 Les antennes	50
5.1.1 Définition des antennes	50
5.1.2 Source isotrope : définition et propriétés	50
5.1.3 Caractéristique d'une antenne à l'émission	50
5.1.4 Caractéristiques d'une antenne à la réception	52
5.1.5 Propriétés des antennes de grande surface	53
5.1.6 Antennes filiformes	53
5.2 Transmission par ondes	55
5.2.1 Hypothèses	55
5.2.2 Affaiblissement de la liaison	55
5.3 Comparaison critique des milieux de transmission	57
5.3.1 Cas des liaisons point-à-point.....	57
5.3.2 Cas des réseaux de diffusion.....	57
5.4 Etude sur l'antenne	58
5.4.1 Onde plane	58
5.4.2 Les équations de Maxwell.....	58
5.4.3 Le vecteur de Poynting	60
5.4.4 Potentiels de Lorentz (Potentiels retardés)	61
5.4.5 Formules pour le champ rayonné par l'antenne	62
5.4.6 Diagramme de rayonnement	62
5.5 Gain et directivité de l'antenne	65
5.5.1 Définition : Gain.....	65
5.5.2 Définition : directivité	65
5.5.3 Relation entre le gain et le diagramme de rayonnement	66
5.6 Adaptation d'une antenne. Bande de fonctionnement]	67
5.7 Résistance de rayonnement	68
CHAPITRE 6 . GUIDE D'ONDE RECTANGULAIRE	70
6.1 Fréquence critique dans un guide d'onde rectangulaire.....	70
6.2 Impédance d'onde dans le guide d'onde rectangulaire de longueur infinie	71
6.3 Impédance d'onde dans le guide d'onde rectangulaire de longueur finie.....	72
6.4 Puissance électromagnétique dans le guide d'onde rectangulaire	72
6.5 Rapport d'onde stationnaire	72
6.6 Une étude simple sur une antenne parabolique.....	73
CHAPITRE 7 . SIMULATION SOUS MATLAB	75
7.1 Organigramme	75
7.2 La page d'accueil	76
7.3 La longueur d'onde critique	77

7.4 La puissance électromagnétique dans le guide.....	78
7.5 Impédance d'onde.....	78
CONCLUSION GENERALE.....	81
ANNEXE 1 : DEMONSTRATION DES EXPRESSIONS.....	82
A.1.1 Guide d'onde rectangulaire	82
A.1.1.1 L'impédance d'onde	82
A.1.1.2 La puissance électromagnétique	82
A.1.2 Guide d'onde circulaire	83
A.1.2.1 Onde E.....	83
A.1.2.2 Onde H.....	84
A.1.2.3 Fonction de Bessel	84
A.1.2.4 Les impédances.....	84
A.1.2.5 Vitesse de variation de phases	85
A.1.2.6 Vitesse de groupe harmonique	85
A.1.2.7 Vitesse de propagation de l'onde ou vitesse de la première harmonique.....	85
ANNEXE 2 : CODES SOURCES.....	87
A.2.1 Longueur d'onde critique.....	87
A.2.2 Fréquence critique	87
A.2.3 Puissance électromagnétique.....	88
A.2.4 Impédance d'onde	89
BIBLIOGRAPHIE.....	91
RESUME :.....	94

NOTATIONS

a, b, l	Dimensions du guide d'onde
a_k	Coefficient pouvant prendre m valeurs
c	Célérité de la lumière
$d = d_E + d_R$	Distance entre deux antennes en vue directe
$\frac{dn}{dz}$	Gradient de l'indice de réfraction n par rapport à l'altitude z
d_1	Taux de distorsion harmonique
$d\Omega$	Elément d'angle solide
$d\tau$	Elément de volume
f	Fréquence
f_0	Fréquence critique du résonateur volumineux
g	Gain maximum d'un réflecteur à ouverture circulaire
$g_{E\alpha}$	Gain du réflecteur à l'émission dans la direction α
$g_{R\beta}$	Gain à la réception dans la direction β
g_α	Gain dans la direction α
g_β	Gain de l'antenne dans la direction β
h_E	Altitude de l'antenne d'émission par rapport à la terre
h_R	Altitude de l'antenne de réception par rapport à la terre
$h(t)$	Réponse impulsionnelle dans le domaine temporel du canal

i	Courant électrique
k	Paramètre variant de 0,5 à 0,8
l	Distance de l'antenne par rapport à la source isotrope
m	Valeurs des moments des signaux élémentaires
m -aire	m nombres d'états du signal numérique
m, n, p	Mode de l'onde
n	Indice du milieu
n_{sol}	Indice de réfraction au sol
p_r	Intensité de puissance
$p(u_N)$	Variable aléatoire continue
r	Distance
$r(\theta, \Phi)$	Courbe représentant le diagramme de rayonnement de l'antenne
t	Temps
u_{Ek}	Signal élémentaire de base
u_{BE}	Signaux élémentaires qui sont des multiples d'un signal élémentaire de base à l'émission
$u_{BR}(t)$	Caractéristiques correspondantes des signaux élémentaires de base à la réception, en l'absence de perturbations
$u_{BE}(t)$	Forme des signaux élémentaires de base à l'émission
$u_p(t)$	Porteuse est un signal sinusoïdal
v	Vitesse de propagation du champ

A	Affaiblissement de la liaison
$\vec{A}$	Potentiel vecteur
A_e	Surface effective ou surface de captation de l'antenne
A_{eiso}	Surface effective de l'antenne isotrope
A_{eq}	Surface équivalente
$A_{\text{eE}\alpha}$	Affaiblissement à l'émission dans la direction α
$A_{\text{eR}\beta}$	Affaiblissement à la réception provenant de la direction β
$A_{\text{e}\beta}$	Surface effective ou surface de captation dans la direction β
A_{iso}	Affaiblissement en espace libre
$A_{\text{rayonnement}}$	Rayonnement
$\vec{B}$	Induction magnétique
D	Diamètre d'un réflecteur à ouverture circulaire
$\vec{D}$	Induction électrique
D_0	Portée de visibilité directe
$D(\theta, \Phi)$	Directivité de l'antenne
E	module de $\vec{E}$
$\vec{E}$	Champ électrique
E_R	Rayon dans la polarisation elliptique
E_1, E_2	Axes des composantes de $\vec{E}$
E_θ, E_ϕ	Composantes de $\vec{E}$
F	Facteur de modification du rayon de la terre
G_E	Gains de l'antenne d'émission (en dB)
$G_{\text{E}\alpha}$	Gain à l'émission dans la direction α

G_R	Gains de l'antenne de réception (en dB)
$G_{R\beta}$	Gain à la réception dans la direction β
$G(\theta, \Phi)$	Gain d'une antenne dans une direction (θ, Φ)
$\vec{H}$	Champ magnétique
$H(f)$	Fonction de transfert dans le domaine fréquentiel du canal
I_{eff}	Valeur efficace du courant
$\vec{J}$	Densité de courant en A/ m ²
L_{NR}	Niveau (puissance) du bruit à la réception à la sortie du système
L_{SE}	Niveau des signaux à l'émission
L_{SR}	Niveau (puissance) absolu de réception du signal à la sortie du système
O	Centre de la terre
P'	Puissance électromagnétique dans le guide
P_a	Puissance d'alimentation de l'antenne
P_E	Puissance totale rayonnée (émise) par une source radioélectrique
P_{iso}	Puissance surfacique à une distance l_1
P_R	Puissance reçue à la sortie de l'antenne réceptrice adaptée
P_{Riso}	Puissance reçue si les deux antennes (émission et réception)
P_{SE}	Puissance ou niveau des signaux $u_E(t)$ aléatoires
P_t	Puissance de rayonnement
P_α	Puissance surfacique dans le cas général
P_β	Puissance surfacique rayonnée à la sortie d'une antenne

R	Rayon de la terre
R_E	Rayon équivalent de la terre
R_j	Résistance ohmique
R_r	Résistance de rayonnement de l'antenne utilisé
Telstar	Nom de satellite sur une orbite basse
T_M	Durée des signaux élémentaires
$U_{BE}(f)$	Transformée de Fourier des signaux élémentaires de base à
$U_{BR}(f)$	Transformée de Fourier des signaux élémentaires de base à la
$U_n (n \geq 2)$	Ensemble des harmoniques
U_p	Amplitude maximale du signal sinusoïdal
U_1	Fondamentale
V	Potentiel scalaire
W_0	Energie incidente
W_r	Energie transmise au feeder
Z_E', Z_R'	Altitudes induites
Z_{onde}	Impédance d'onde
α	Direction définie en azimut et en élévation
β	Direction par rapport à l'antenne réceptrice
ϵ	Permittivité du milieu
ϵ'	Probabilité (caractère principal d'appréciation de la qualité de la transmission numérique)

ϵ_0	Permittivité dans le vide
γ	Constante de propagation ou constante de transmission
η	Rendement
ξ_R	Rapport signal sur bruit à la sortie du système
λ	Longueur d'onde
λ_0	Longueur d'onde critique dans le résonateur volumineux
μ	Nombre de moments nécessaire pour représenter un des n caractères dont dispose la source
μ_0	Perméabilité dans le vide
θ	Colatitude de l'antenne
θ_E	Ouvertures dans le plan E de l'antenne
θ_H	Ouvertures dans le plan H de l'antenne
θ_0	Angle représente l'angle de réflexion
θ_3	Ouverture du diagramme de rayonnement
ρ	Rayon de courbure de la trajectoire de la transmission
$\rho(t)$	Densité de charge variant en fonction du temps
σ	Conductivité du milieu
τ	Taux d'onde stationnaire
ω	Pulsation du champ de fréquence f
ω_p	Vitesse angulaire du signal sinusoïdal
Ψ	Ouverture du lobe principal (ψ_{3dB} : gain réduit à 3dB)

Φ	Gisement de l'antenne
$\Phi_{SE(f)}$	Densité spectrale (unilatérale) de puissance des signaux $u_E(t)$
Λ	Longueur d'onde dans le résonateur volumineux
$\vec{\Pi}$	Vecteur de Poynting
Γ_R	Coefficient de réflexion
Ω	Angle solide
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ATV	Télévision Amateur
BTS	Station de base
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	Conférence des Administrations Européennes des Postes et Télécommunications
DS-CDMA	Direct Sequence ou CDMA à séquences directes
EN 60335-1	Norme européenne
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FH-CDMA	Frequency Hop ou saut de fréquence-CDMA
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying (type de modulation)
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile
HF	Haute Fréquence
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LBS	Location Based Services
LOS	Line Of Sight
NLOS	Non Line Of Sight

OFDM	Modulation multiporteuse
PDA	Assistants personnels
SMS	Short Message Service
TS	Time slot
UHF	Ultra High Frequencies
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UUNET	Premier véritable réseau planétaire
VHF	Very High Frequencies
WAP	Wireless Application protocol
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

INTRODUCTION

Au début des radiocommunications, les ondes de basses fréquences, c'est-à-dire de grandes longueurs d'ondes étaient très utilisées. Depuis lors, l'histoire de ces communications a été une escalade vers les hautes fréquences qui s'est faite pas à pas à chaque fois que les nouvelles technologies le permettaient dans des conditions compatibles avec leur exploitation.

Notons à ce propos qu'il n'est pas exact d'attribuer à une onde de radio une fréquence bien définie. En fait, pour transmettre une information quelconque, l'onde doit recéler toutes les fréquences comprises entre deux limites et occupant une bande dans le spectre radioélectrique. Plus ces fréquences sont étalées dans le spectre, plus la largeur de bande est grande, et plus l'onde peut véhiculer d'informations. Une onde est tout simplement définie par la fréquence moyenne de cette bande. Chaque émetteur de radio se voit donc accorder un canal de modulation, c'est-à-dire une bande de fréquences qui, pour permettre une reproduction fidèle de la parole et de la musique, doit avoir une largeur minimale de 9 kHz. Etant donné que la partie du spectre occupée par les moyennes fréquences s'étale de 300 à 3 000 kHz, il s'en suit que sur cette largeur de 2 700 kHz, ne peuvent trouver place que 300 émetteurs. La situation est meilleure dans la gamme des très hautes fréquences puisque, de 30 à 300MHz, elle recèle une capacité cent fois supérieure.

Les limites inférieure et supérieure d'une bande de données sont quelque peu arbitraires puisque le spectre radio électrique est continu, mais les grandes divisions adoptées par convention sont commodes et correspondent d'ailleurs à certaines caractéristiques techniques des postes. C'est ainsi que les appareils employés pour l'émission et la réception des très hautes fréquences, bien qu'étant moins coûteux et volumineux que ceux conçus pour les moyennes fréquences, rayonnent ou captent 100 fois plus d'informations. C'est précisément parce que la capacité d'informations croît avec la fréquence que l'intérêt du radio technicien s'est porté vers des fréquences de plus en plus hautes.

Au-dessous de 10 kHz, il n'est plus pratique de communiquer par radio parce qu'un courant électrique oscillant si lentement dans l'antenne rayonne très peu d'énergie et que, d'autre part, des antennes efficaces seraient des constructions aussi imposantes qu'antiéconomiques. Les fréquences dépassant 12 000 MHz commencent à être mises à profit mais, au-delà de 300 000 MHz, se trouve une région du spectre encore inaccessible aux moyens techniques existants. L'hyperfréquence, dont la gamme de fréquence se trouve entre 300MHz et 30GHz, est très utilisée en télécommunications. La télécommunication est un moyen de transmettre des informations, que ce soit des voix, des images fixes ou mobiles, ou des données, à une distance quelconque.

Actuellement, les générations des mobiles essaient toujours d'accroître leur gamme de fréquence. Malgré la mobilité des utilisateurs à des positions différentes, les télécommunications se

concentrent surtout sur une large bande de fréquence, vu que le nombre d'utilisateurs ne cesse d'augmenter.

Pour une meilleure qualité de service, l'hyperfréquence est très directive malgré sa portée limitée en vue directe. Par ailleurs, les guides d'ondes permettent aux ondes électromagnétiques de l'hyperfréquence d'éviter les obstacles tels que les hydrométéores (pluie par exemple), grâce à leur émission d'onde concentrée à forte énergie. Dans l'atmosphère, l'hyperfréquence permet une transmission de signal sans distorsion (Effet Fading) dans un environnement appelé ellipsoïde de Fresnel.

« La prépondérance de l'hyperfréquence dans la télécommunication » : tel est le thème du présent mémoire qui comprendra 6 chapitres :

- On peut suivre l'évolution de la télécommunication depuis les temps anciens jusqu'à nos jours dans le chapitre 1
- Dans le chapitre 2, les différents types ainsi que les méthodes de transmission seront évoqués
- Des études sur les différentes gammes de fréquences ainsi que leurs domaines d'utilisation respectifs occuperont le chapitre 3
- La propagation des ondes dans l'atmosphère sera étudiée dans le chapitre 4 tandis que le chapitre 5 traitera des notions sur les antennes
- Enfin, le chapitre 6 concerne quelques caractéristiques des ondes de l'hyperfréquence dans un guide d'onde rectangulaire qui fera l'objet de la partie simulation.

CHAPITRE 1 . EVOLUTION DE LA TELECOMMUNICATION

Le terme « télécommunications » fut inventé en 1904 par E. Estaunié et signifie « communiquer à distance ».

1.1 Communication visuelle [22]

On a vu naître divers dispositifs de communication depuis des temps très anciens.

Les Romains avaient un système de signaux militaires qui permettait de faire circuler assez vite, de poste en poste, les ordres et les nouvelles d'importance. Cependant, ce n'était que l'échange de quelques signes conventionnels qui codaient une signification globale du message (victoire, défaite, attaquer à l'ouest, etc).



Figure 1.01 : Ancien phare

La figure 1.01 montre un ancien phare et son emplacement à très haute altitude pour permettre aux signaux lumineux qu'elle transmet à aller le plus loin possible.

1.2 Télégraphe visuel et mécanique

Il fallut attendre la fin du XVIIIe siècle pour voir apparaître le premier système permettant de communiquer à distance des messages complets construits avec des phrases. Cette réalisation des frères Chappe, en 1794, était basée sur un dispositif mécanique : trois règles mobiles au haut d'un mât codaient, par leur position, des mots d'un lexique. Grâce à l'utilisation d'une "chaîne" d'observateurs relayant la transmission, des messages pouvaient être communiqués en quelques minutes sur des distances importantes. L'ancêtre du télégraphe était né.

Le télégraphe de Chappe fut en usage en Algérie jusqu'en 1859.

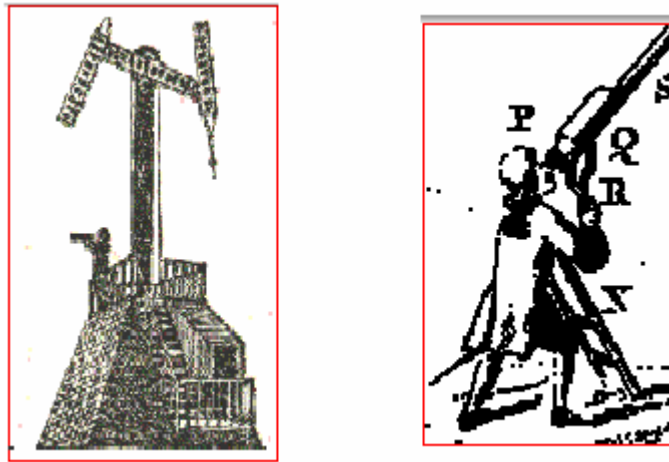


Figure 1.02 : Télégraphe visuel et mécanique

La figure 1.02 permet de montrer une notion sur ce qu'était le télégraphe visuel et mécanique.

1.3 Télégraphe électrique

La révolution suivante fut celle du télégraphe électrique inventé par Samuel MORSE en 1832. Cette fois, un véritable alphabet était utilisé, le fameux code morse. Cette invention était rendue possible par les avancées révolutionnaires successives de la physique en électricité (courant électrique, électro-aimant par exemple).

C'est ce principe qui servira plus tard pour réaliser les premières liaisons radio.



Figure 1.03 : Télégraphe électrique

La figure 1.03 montre clairement un télégraphe électrique.

1.4 Téléphone

En 1876, l'Américain Graham Bell inventa le téléphone (voir la figure 1.04) : enfin, la voix humaine pouvait être transportée au-delà de l'horizon sonore. De nombreuses améliorations du téléphone de Bell (comme l'invention du microphone à charbon par Hughes en 1878 et l'introduction dans le circuit de piles et transformateurs) conduisirent au développement que l'on connaît.

Paris fut la première ville à posséder un réseau de "téléphonie urbaine".



Figure 1.04 : Téléphone de Bell

1.5 La radio

Mais le fil de cuivre qui était à la base même de ces dispositifs de communication était très pénalisant : coûts de construction et de maintenance très importants, impossibilité de communiquer avec un bateau en mer. La découverte des ondes hertziennes allait ouvrir l'ère du "sans fil" et métamorphoser les lourds, fragiles et coûteux câbles de cuivre en liaisons invisibles que constituent les ondes électromagnétiques.

MARCONI Guglielmo (Italo-irlandais) est reconnu comme l'inventeur de la radio sans fil. Il permit à plusieurs stations d'émettre simultanément, et sans interférence, sur des longueurs d'ondes différentes. En 1921 des émissions expérimentales sont diffusées depuis la Tour Eiffel d'où sont transmis les premiers journaux parlés et émissions musicales en direct.

La figure 1.05 montre des prototypes de radios de premières générations.



Figure 1.05 : Ancienne radio

1.6 La télévision

C'est dans les années 1920 que les premiers prototypes de télévision (voir figure 1.06)

apparaissent. En 1929, la BBC émet des émissions expérimentales malgré des images de mauvaise qualité. En France, les émissions de télévision sont quotidiennes à partir de 1938, mais en cette période de pré-guerre le public n'est pas au rendez-vous (200 récepteurs commercialisés contre 20 000 en Angleterre).

En 1947, trois Américains inventent le transistor, qui peu à peu va détrôner les lampes, et faire accélérer les évolutions techniques.

Dans l'histoire de la télévision, un des grands moments restera l'alunissage en direct de la capsule spatiale Apollo, le 20 juillet 1969, devant des millions de téléspectateurs.



Figure 1.06 : Prototype des premières télévisions

1.7 Les satellites

Au début des années 1960, les communications téléphoniques internationales restent très difficiles car les câbles sous-marins ont une capacité réduite. De même, la télévision ne permet pas encore de réaliser des "directs" sur de très longues distances. Un projet est alors avancé : construire un satellite de télécommunications. En 1961, un accord est signé entre la Grande Bretagne, la France et les Etats-Unis pour sa réalisation. Ce satellite (Telstar) (voir la figure 1.07) est construit par "Bell Telephone Laboratories" et sera lancé de Cap Canaveral le 10 juillet 1962. Pour l'occasion, la France construit en Bretagne (Pleumeur-Bodou) une antenne réceptrice composée entre autres, d'une portion de sphère de 64 mètres de diamètre. Le 11 juillet 1962, l'antenne capte dans d'excellentes conditions des images émises des Etats-Unis.

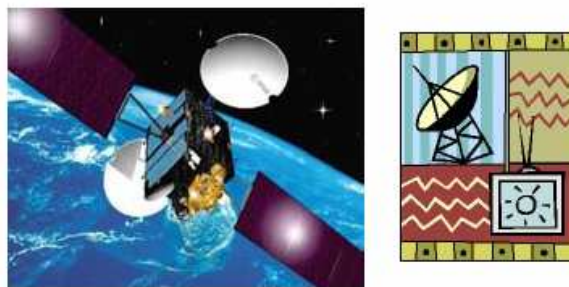


Figure 1.07 : Satellites

1.8 Internet

En 1974, les laboratoires Bell mettent au point un programme, qui permet d'échanger des données par modem via le réseau téléphonique. Grâce à cette innovation, débute le premier véritable réseau planétaire, UUNET. En 1981, les Français découvrent l'univers de la télématique avec le Minitel.

En 1994, avec l'introduction de Netscape, doté d'une interface graphique spectaculaire qui intègre les ressources multimédias, l'Internet connaît une explosion phénoménale. L'expression "Internet" sert à désigner un ensemble de réseaux connectés entre eux. La collectivité y a actuellement accès, par l'intermédiaire des fournisseurs de services (Wanadoo, free, etc). La figure 1.08 montre une liaison par satellite.

Aujourd'hui, l'ADSL2+ est planifiée : c'est une technologie qui permet d'atteindre un débit de 20 mégabits/s sur des liaisons de moins de 2 km entre le répartiteur et l'abonné.

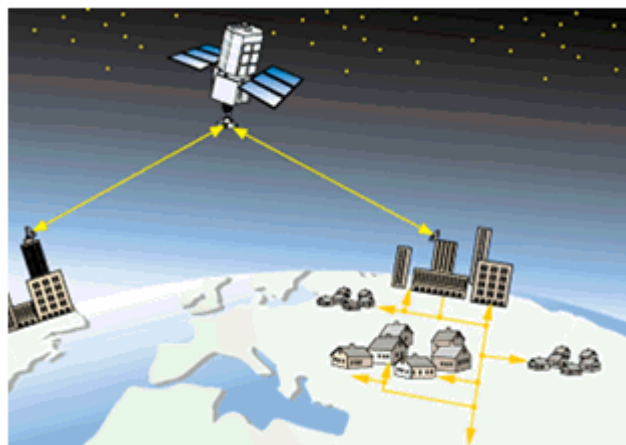


Figure 1.08 : Réseau par satellite

1.9 Les réseaux sans fils [2] [3] [16] [19]

1.9.1 L'idée de réseau sans fil

Un réseau sans fil (en anglais wireless network) est, comme son nom l'indique, un réseau dans lequel au moins deux terminaux (ordinateur portable, PDA, etc.) peuvent communiquer sans liaison filaire.

Grâce aux réseaux sans fil, un utilisateur a la possibilité de rester connecté tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on entend parfois parler de "mobilité".

Les réseaux sans fil sont basés sur une liaison utilisant des ondes radioélectriques (radio et infrarouges) en lieu et place des câbles habituels. Il existe plusieurs technologies se distinguant

d'une part par la fréquence d'émission utilisée ainsi que le débit et la portée des transmissions. Les réseaux sans fil permettent de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres. De plus l'installation de tels réseaux ne demande pas de lourds aménagements des infrastructures existantes comme c'est le cas avec les réseaux filaires (creusement de tranchées pour acheminer les câbles, équipements des bâtiments en câblage, goulottes et connecteurs), ce qui a valu un développement rapide de ce type de technologies.

En contrepartie se pose le problème de la réglementation relative aux transmissions radioélectriques. En effet, les transmissions radioélectriques servent pour un grand nombre d'applications (militaires, scientifiques, amateurs, ...), mais sont sensibles aux interférences, c'est la raison pour laquelle une réglementation est nécessaire dans chaque pays afin de définir les plages de fréquence et les puissances auxquelles il est possible d'émettre pour chaque catégorie d'utilisation.

De plus les ondes hertziennes sont difficiles à confiner dans une surface géographique restreinte, il est donc facile pour un pirate d'écouter le réseau si les informations circulent en clair (c'est le cas par défaut). Il est donc nécessaire de mettre en place les dispositions nécessaires de telle manière à assurer une confidentialité des données circulant sur les réseaux sans fil.

1.9.2 Leur catégorie

On distingue habituellement plusieurs catégories de réseaux sans fil, selon le périmètre géographique offrant une connectivité (appelé zone de couverture) :

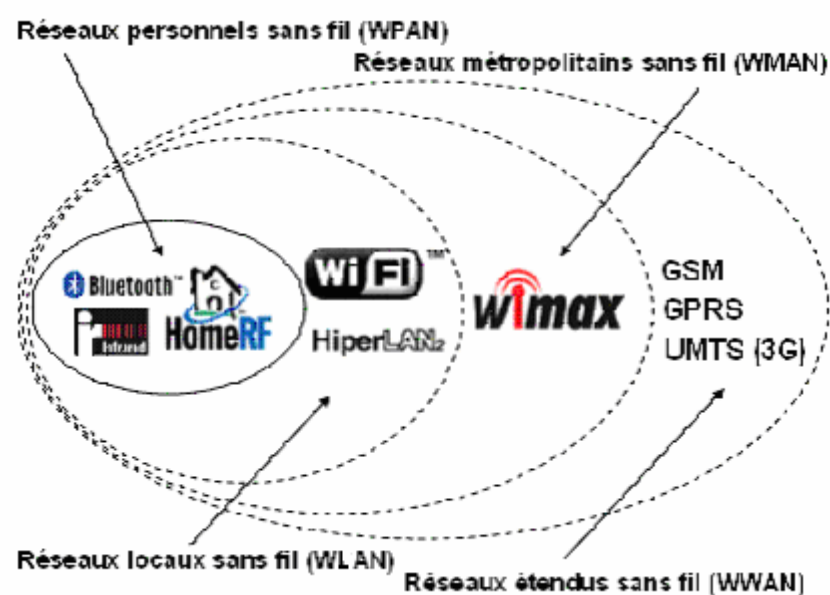


Figure 1.09 : Les différentes catégories de réseaux sans fil

La figure 1.09 montre non seulement les différentes catégories de réseaux sans fil mais aussi la différence entre leur portée (WLAN, WPAN, WMAN, WWAN).

Les réseaux sans fil qui sont en vogue actuellement, travaillent tous sans exception en transmission utilisant l'hyperfréquence. En général, le GSM, le CDMA, Wi-Fi et Wi-Max en font partie.

1.10 Le GSM [2] [3] [15] [17] [20]

1.10.1 Conception

Le concept cellulaire provient des réseaux de première génération. Chaque point de couverture était un rayon de 50 kilomètres avec, au centre de chaque cercle de couverture, un relais et une station de base. Chaque utilisateur se trouvant dans le rayon de couverture avait une bande statique allouée à son téléphone, ceci avec ou sans communication téléphonique. Ainsi chaque station pouvait fournir autant de canaux de communication que de bandes de fréquence disponibles. Ce système, peu fiable, fut remplacé par un autre système permettant d'allouer une bande de fréquence uniquement si l'utilisateur en avait besoin, permettant ainsi d'augmenter potentiellement le nombre d'abonnés jusqu'à un certain stade, dans l'hypothèse où tous les abonnés ne téléphonent pas en même temps. Le Global System for Mobile Communications ou GSM (historiquement Groupe Spécial Mobile) est une norme numérique de seconde génération pour la téléphonie mobile. Elle fut établie en 1982 par le CAEPT (Conférence des Administrations Européennes des Postes et Télécommunications). Les antennes des BTS nécessitaient alors des puissances assez importantes (jusqu'à 8 watts de façon courante) et les mobiles également. Cependant, et afin d'éviter les interférences, chaque cercle de couverture ne pouvait pas réutiliser les mêmes fréquences, réduisant ainsi le spectre fréquentiel.

Tel qu'il a été conçu, le réseau GSM est idéal pour les communications de type 'voix'. Le réseau étant commuté, les ressources ne sont allouées que pour la durée de la conversation, comme lors de l'utilisation de lignes téléphoniques fixes. Les clients peuvent soit acheter une carte prépayée, soit souscrire un abonnement.

La figure 1.10 montre un premier téléphone GSM français.

1.10.2 Caractéristique de l'interface radio

Le GSM utilise deux bandes de fréquences, l'une pour la voie montante, l'autre pour la voie descendante. La bande 890-915 MHz est utilisée pour la voie montante, tandis que la bande 935-960 MHz est utilisée pour la voie descendante. Chacune de ces bandes comprend 124 porteuses (canaux) de 200 kHz chacune. La modulation utilisée sur ces porteuses est la GMSK, qui permet d'éviter les chevauchements des porteuses.

Chaque porteuse comporte huit time slots (TS). Ils durent environ 577 μ s. Les canaux physiques sont ces slots.

Chaque porteuse a un débit brut de 271 kbit/s, tandis que les canaux physiques ont donc un débit brut de 33,8 kbit/s. Le débit utile est quant à lui de 24,7 kbit/s.



Figure 1.10 : Premier téléphone GSM français

1.10.3 Les services

Le réseau GSM permet plusieurs services :

- la voix ;
- les données (le WAP, le Fax) ;
- les messages écrits courts ou SMS ;
- le Cell Broadcast (diffusion dans les cellules), qui permet d'envoyer le même SMS à tous les abonnés à l'intérieur d'une zone géographique ;
- les services supplémentaires (renvois d'appels, présentation du numéro...) ;
- les services à valeur ajoutée comme par exemple les services de localisation (Location Based Services ou LBS), d'information à la demande (météo, horoscope), de banque (consultation de compte, recharge de compte prépayés).

1.11 Le CDMA [2] [13] [23]

1.11.1 Historique

Historiquement, le CDMA (ou accès multiple à répartition de code) est issu de programmes de recherche militaires qui avaient pour but de protéger les transmissions d'informations contre le brouillage, c'est-à-dire une forme d'interférence volontaire. Le CDMA, étant une méthode de multiplexage à étalement de spectre, le brouillage efficace doit se faire sur toute la bande de fréquences utilisées, ce qui n'est pas envisageable car cela consommerait une puissance colossale.

Dans les applications civiles, la résistance à un brouillage intentionnel n'est pas un critère déterminant dans le choix de la technologie de multiplexage. On cherche cependant à rendre le système de communication résistant à des interférences non volontaires : les interférences entre utilisateurs, les interférences liées à des phénomènes de réflexion et la présence d'un bruit additif. Le premier type d'interférences est bien toléré par le CDMA, par construction, puisque les codes utilisés sont faiblement corrélés ; la résistance au deuxième type d'interférences est également assurée. Quant à la résistance au bruit additif, des résultats expérimentaux ont montré la performance très satisfaisante du CDMA.

Toutes ces considérations font que le CDMA permet de garantir une téléphonie haute fidélité.

1.11.2 Description

Il y a 10 ans, les réseaux sans fil en Amérique du Nord étaient considérés comme un luxe reposant sur une technologie encore immature. Au cours de la dernière décennie, les avantages indéniables du cellulaire ont convaincu plusieurs millions de personnes de son utilité jusqu'au point où maintenant la majorité de cette clientèle perçoit le service sans fil comme acquis.

Aujourd'hui, deux technologies dominent le monde des réseaux cellulaires: le CDMA et le GSM. Ces technologies pourtant bien différentes réussissent à donner un service similaire à leurs usagers, si bien que plusieurs d'entre eux ne savent même pas sur laquelle le réseau de leur opérateur repose.

Le CDMA est une technologie développée au cours de la Deuxième Guerre mondiale. Déployée en Amérique du Nord et en Asie, elle utilise plus efficacement le spectre de fréquences tout en proposant un fonctionnement plus simple.

1.11.3 Les méthodes utilisées par le CDMA

- FH-CDMA (Frequency Hop ou saut de fréquence) : Dans ce système, on fait de l'évasion de fréquence : la clé de chaque utilisateur code pour une suite de fréquences qui feront alternativement office de porteuse. Ce système ressemble à un multiplexage fréquentiel

dans lequel l'attribution des fréquences varierait rapidement (par rapport au débit d'informations à transmettre).

- DS-CDMA (Direct Sequence): Ici, on multiplie directement le message à transmettre par un code (séquence pseudo aléatoire). L'étalement spectral du signal codé vient du fait que la fréquence du code est largement supérieure à la fréquence d'envoi des données.

1.11.4 Bande de fréquence utilisée

La gamme de fréquence utilisée par les mobiles varie selon leur génération. La première génération utilisant les normes analogiques se situe dans les gammes de 450 Mhz, tandis que la seconde génération de normes numériques occupe la gamme des 900 MHz. La norme CDMA 2000 fait partie de la troisième génération qui utilise des fréquences autour de 1,8 GHz.

1.12 Les réseaux locaux WiFi (ou Wireless Fidelity) [2] [3] [14] [16]

Le wifi ou wi-fi est une technologie de réseau informatique sans fil mise en place pour fonctionner en réseau interne et, depuis, devenue un moyen d'accès à haut débit à Internet. Il est basé sur la norme IEEE 802.11.

1.12.1 Présentation

La norme IEEE 802.11 est un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil (WLAN). Le nom wifi correspond initialement au nom donné à la certification délivrée par la WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance), l'organisme chargé de maintenir l'interopérabilité entre les matériels répondant à la norme 802.11. Par abus de langage (et pour des raisons de marketing), le nom de la norme se confond aujourd'hui avec le nom de la certification (c'est du moins le cas en France, en Espagne et aux États-Unis). Ainsi un réseau wifi est en réalité un réseau répondant à la norme 802.11. Dans d'autres pays (en Allemagne par exemple) de tels réseaux sont correctement nommés WLAN.

Grâce au wifi, il est possible de créer des réseaux locaux sans fil à haut débit. Dans la pratique, le wifi permet de relier des ordinateurs portables, des machines de bureau, des assistants personnels (PDA), des objets communicants ou même des périphériques à une liaison haut débit (de 11 Mbit/s en 802.11b à 54 Mbit/s en 802.11a/g) sur un rayon de plusieurs dizaines de mètres en intérieur (généralement entre une vingtaine et une cinquantaine de mètres). Dans un environnement ouvert, la portée peut atteindre plusieurs centaines de mètres voire dans des conditions optimales plusieurs dizaines de kilomètres (pour la 'variante' WIMAX ou avec des antennes directionnelles). Ainsi, des fournisseurs d'accès Internet commencent à irriguer des zones à forte concentration d'utilisateurs (gares, aéroports, hôtels, trains, etc.) avec des réseaux sans fil

connectés à Internet. Ces zones ou point d'accès sont appelées bornes wifi ou en anglais « hot spots ».



Figure 1.11 : Antenne WiFi public

La figure 1.11 montre une antenne wifi public.

1.12.2 Disponibilité

En pratique, pour un usage informatique du réseau wifi, il est nécessaire de disposer au minimum de deux équipements wifi, par exemple un ordinateur, et un routeur ADSL.

L'ordinateur doit être équipé d'une carte wifi, qui contient une antenne, et de « drivers » qui permettent de faire fonctionner cette carte. Un routeur wifi peut également être utile.

1.12.3 Les fréquences utilisées

Il faut aussi noter que les fréquences utilisées par les équipements wifi (2,4 GHz), tout comme les fréquences de la téléphonie mobile (grosso modo de 900 MHz à 2100 MHz), sont des fréquences qui font toutes vibrer la molécule d'eau, qui constitue l'essentiel du corps humain. Si la fréquence de 2450 MHz est utilisée dans les fours à micro-ondes domestiques, c'est pour une simple raison de normes, car il existe des fours à micro-ondes industriels fonctionnant à des fréquences de 430 MHz et de 960 MHz. Concernant les fours domestiques, la législation (norme européenne EN 60335-1) impose un seuil de sécurité pour les fuites de rayonnement hyperfréquence (les fuites ne doivent pas dépasser 5 mW à 5 cm des parois).

Le wifi utilise une bande de fréquence étroite 2,4 à 2,4835 GHz, de type partagée avec d'autres colocataires conduisant à des problèmes de cohabitation qui se traduisent par des interférences, brouillages causés par les fours à micro-ondes, les transmetteurs domestiques, les relais, la

télémédecine, les caméras sans fil et les émissions de télévision amateur (amateur TV ou ATV), etc.

1.13 Le WiMax [2] [3] [14] [18] [21]

1.13.1 Généralités

WiMax ou WIMAX (acronyme pour Worldwide Interoperability for Microwave Access) est une famille de normes, définissant les connexions à haut-débit par voie hertziennne. C'est également un nom commercial pour ces normes, comme l'est Wi-Fi pour 802.11.

WiMax regroupe des standards de réseaux sans fils auparavant indépendants : HiperMan, proposé en Europe par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute), et 802.16 proposé par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

WIMAX utilise des technologies hertziennes destinées principalement à des architectures point-multipoint : à partir d'une antenne centrale, on cherche à toucher de multiples terminaux.

WIMAX promet des débits de plusieurs dizaines de megabits/seconde sur des rayons de couverture de quelques dizaines de kilomètres. WIMAX s'adresse notamment au marché des réseaux métropolitains, le MAN (Metropolitan Area Network) de HiperMAN.

Plusieurs standards relèvent du terme WIMAX : les plus avancés concernent les usages en situation fixe (le client ne bouge pas), mais une version mobile (connexion à haut-débit en situation de mobilité) est également prévue un peu plus tard.

1.13.2 La gamme de fréquence utilisée

WIMAX est défini pour une large bande de fréquences, de 2 à 66 GHz, dans laquelle on trouve des technologies existantes, comme le Wi-Fi, et qui autorise des débits, des portées et des usages très variés.

Cette multiplicité des bandes de fréquences visées, des débits, des portées et d'usages possibles, est d'ailleurs le principal écueil qu'affronte le commutateur : selon l'angle choisi, WIMAX est tour à tour un simple prolongement du Wi-Fi (le Wi-Fi du futur), le cœur de réseau du Wi-Fi (sa destinée la moins passionnante), ou mieux, la convergence du Wi-Fi et du réseau cellulaire de troisième génération (UMTS, dite « la 3G »).

1.13.3 Les contraintes techniques

Des contraintes techniques, inhérentes aux technologies radio, limitent cependant les usages possibles.

La portée, les débits, et surtout la nécessité ou non d'être en ligne de vue de l'antenne émettrice, dépendent de la bande de fréquence utilisée. Dans la bande 10-66 GHz, les connexions se font en ligne de vue (LOS, line of sight), alors que sur la partie 2-11 GHz, le NLOS (non line of sight) est possible notamment grâce à l'utilisation de la modulation OFDM. Ceci ouvre la voie à des terminaux d'intérieur, facilement installables par l'utilisateur final car ne nécessitant pas l'installation d'antennes extérieures par un technicien agréé.

1.13.4 Usages du WiMAX

WiMAX est envisagé à la fois pour les réseaux de transport et de collecte, et pour les réseaux de desserte. Dans le cas de la collecte, il s'agit du backhauling de hotspots, c'est-à-dire la liaison des hotspots Wi-Fi à Internet non pas par des dorsales filaires (ADSL notamment), mais par une dorsale hertzienne. Dans le cas de la desserte, c'est l'idée, et notamment pour les aspects mobilité de WiMAX, que des hotspots (des hotzones, en fait) soient déployées sous technologie WiMAX.

Dans le premier cas (collecte), seuls les équipements de réseau sont WiMAX, et le marché est orienté vers les opérateurs.

Dans le deuxième cas, on doit imaginer des terminaux (ordinateurs, PDAs, téléphones) WiMAX, et en particulier des puces à la fois Wi-Fi et WiMAX.

La télécommunication a tendance à élargir ses gammes de fréquence pour entrer dans la bande de l'hyperfréquence, pour pouvoir augmenter le nombre d'usages.

CHAPITRE 2 . PRINCIPES ET METHODES

2.1 Objectif des télécommunications [4] [22] [23]

2.1.1 Définition

Dans un vaste sens, les télécommunications comprennent l'ensemble des moyens techniques nécessaires à l'acheminement d'informations entre deux points. Cet ensemble de moyens doit être aussi fidèle et fiable que possible. Les informations sont à priori quelconques ; l'acheminement de ces informations peut être à une distance quelconque avec des coûts raisonnables.

L'objectif des télécommunications est de permettre l'échange, à distance, d'informations. Tout système de télécommunication, qu'il soit numérique ou analogique, qu'il transporte de la voix, de l'image ou de données quelconques sous forme de bits, peut se résumer par la figure 2.01 :

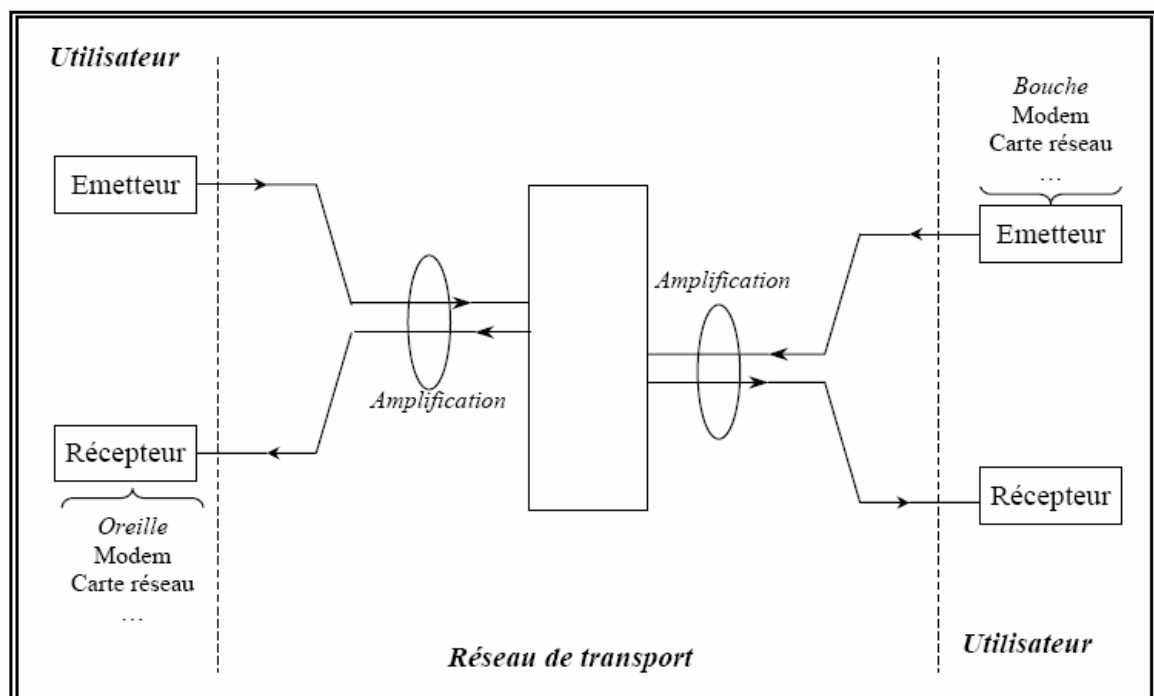


Figure 2.01 : Système de communication

2.1.2 Commentaire

- Les communications sont une technique, donc une œuvre humaine. Le besoin de communication, inhérent à tout homme, existe sans elles. Elles ne font qu'amplifier et prolonger les possibilités de le satisfaire. Les principaux moyens techniques sont de nature électromagnétique.
- Contrairement aux services postaux, les télécommunications ne concernent que l'information à transmettre, et non pas son support matériel (papier, disque, bande

magnétique, etc.). Cette information peut prendre des formes très diverses telles que de la parole, de la musique, des images fixes ou mobiles, des textes, des données.

- L'utilisateur qui confie son information aux systèmes de télécommunications souhaite qu'elle soit restituée sans pertes et sans altérations. Un des principaux problèmes à résoudre est de garantir un degré élevé de fidélité, c'est-à-dire de transparence, malgré les inévitables imperfections et perturbations que présentent les moyens disponibles.
- L'utilisateur attend des télécommunications un service permanent, disponible en toute circonstance. Assurer cette fiabilité en dépit des pannes partielles, imprévisibles et inévitables, est aussi une préoccupation primordiale.
- La mise en relation, conformément à leurs ordres, de deux usagers quelconques, afin de leur permettre ensuite de se faire parvenir des informations, est un problème de commutation (switching). Cela est une branche importante des télécommunications.
- Le transport d'information à une distance quelconque, qui peut être très grande (comme le cas des communications spatiales), est un problème de transmission. La transmission est une autre branche également importante des télécommunications.
- L'art de l'ingénieur consiste à trouver la solution la plus économique à un problème de communication, dans un éternel compromis entre coût et qualité. Le coût doit être pris au sens large, c'est-à-dire du point de vue matériel, frais de développement, exploitation, etc. Les télécommunications n'échappent pas aux lois du marché : c'est finalement l'utilisateur qui juge si les coûts sont raisonnables.

2.1.3 Les types de services

Les services offerts par les télécommunications se distinguent par :

- Le type d'informations transmises
- Le nombre de partenaires impliqués
- Le rôle respectif que jouent ces partenaires (mode de communication : conférence, dialogue, monologue).

Lorsqu'un certain nombre d'utilisateurs bénéficient du même service, l'ensemble des liaisons physiques entre eux constitue un « réseau ». Le réseau peut servir à la « diffusion » d'informations transmises unilatéralement d'une source vers plusieurs destinataires (monologue), ou inversement, à la collecte d'informations en provenance de plusieurs sources vers le même destinataire. Si les liaisons entre partenaires ne sont pas permanentes, mais établies de cas en cas selon leurs ordres, le réseau est dit « commuté ». Il comprend alors, en plus des moyens de transmission, des dispositifs capables d'interpréter et d'exécuter ces ordres (centraux, commutateurs).

Dans sa forme la plus courante, le réseau commuté est « banalisé », c'est-à-dire que ses organes de transmission et de commutation sont mis en commun, à disposition d'un grand nombre d'utilisateurs qui ont accès à ce réseau par un moyen de transmission individuel.

2.2 Milieu ou canal de transmission [4] [22]

Le canal de transmission des télécommunications travaille dans la gamme d'ondes de l'hyperfréquence actuellement.

2.2.1 Définitions de « lignes et ondes »

Dès ses débuts, la technique des télécommunications a utilisé des fils métalliques pour guider les signaux porteurs d'information; puis elle s'est affranchie de cette liaison matérielle entre l'émetteur et le récepteur, pour faire un usage direct du rayonnement omnidirectionnel (radiodiffusion), ou plus ou moins étroitement dirigé (faisceaux) d'ondes électromagnétiques.

On désigne par « ligne » un milieu matériel fini de transmission.

Il peut consister par exemple en

- deux fils métalliques nus parallèles : ligne aérienne
- deux conducteurs concentriques : paire coaxiale
- un tube métallique : guide d'ondes
- un guide filiforme diélectrique translucide : fibre optique.

On donne le nom de « câble » à une unité constructive, comportant une ou plusieurs lignes, et protégée contre les influences physiques, chimiques ou électromagnétiques extérieures (dans l'air, dans l'eau ou dans la terre).

Bien que, dans le cas d'une transmission par ligne, l'énergie (et donc l'information) soit aussi transportée en fait par une onde électromagnétique guidée, on réserve le terme de « transmission par onde » au cas où aucun élément matériel spécifique ne guide les signaux tout au long du trajet de l'émetteur vers le récepteur.

2.2.2 Description d'une transmission

L'information issue d'une source est transmise via un EMETTEUR dans un CANAL de transmission (atmosphère, ligne électrique, fibre optique, par exemple).

Un autre utilisateur va récupérer sur le CANAL, grâce à un RECEPTEUR, le signal transmis auquel se seront superposés des parasites : BRUIT ou perturbations.

Dans l'exemple de radiofréquences de la figure 2.02 on a une transmission unidirectionnelle (simplex) comme pour la radio, à distinguer d'une transmission bidirectionnelle alternée (half-

duplex) dans le cas du talkie-walkie ou d'une transmission bidirectionnelle (full duplex) dans le cas du téléphone analogique.

Dans la télécommunication, il y a deux moyens de transmettre les informations : par la transmission analogique et la transmission numérique.

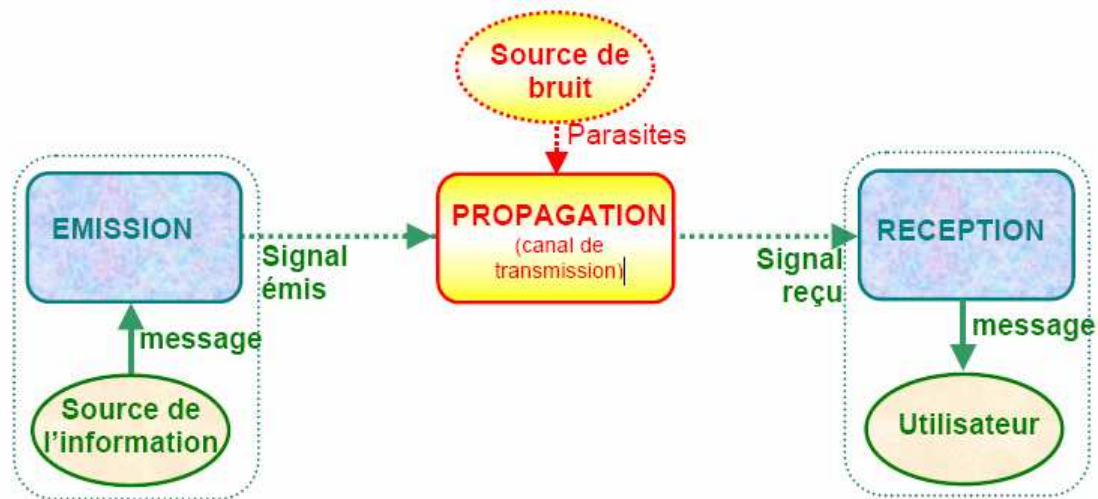


Figure 2.02 : Principe de transmission

2.3 La transmission analogique [4] [23]

2.3.1 Principe

Dans une transmission analogique, l'information en provenance d'une source continue (information analogique) est représentée par les variations continues d'un paramètre des signaux transmis.

Chaque détail concernant ce paramètre des signaux reçus est considéré par le destinataire comme étant porteur d'information. C'est pourquoi toute modification de ce paramètre, si minime soit-elle, en cours de transmission, conduit à une altération irréversible de l'information analogique qu'il porte.

La transmission analogique peut être considérée comme un cas limite de la transmission numérique, lorsque le nombre d'états m par moment tend vers l'infini. Comme la puissance disponible est limitée, l'écart entre ces états devient infiniment petit et il n'est plus possible de les discerner à l'aide de seuils.

La différence essentielle entre une transmission analogique et une transmission numérique se situe donc dans la façon dont le destinataire interprète les signaux qu'il reçoit :

- En fonction d'un alphabet fini convenu préalablement avec la source, dans le cas de la transmission numérique

- Selon tous les détails d'un paramètre convenu préalablement avec l'émetteur, dans le cas de la transmission analogique.

2.3.2 Les fréquences transmises

Considérons plus particulièrement le cas de la téléphonie analogique. Le récepteur est bien entendu l'oreille. Sachant que l'homme ne peut entendre que des sons compris entre 20Hz et 20kHz, on se contente a priori de ne transporter que des signaux qui se situent dans cette gamme de fréquence. Cependant, le téléphone sert essentiellement à la conversation (on n'écoute que rarement de l'opéra par le biais d'un téléphone !), on se limite alors aux fréquences comprises entre 300 et 3400Hz.

2.3.3 Caractéristique des signaux transmis

A l'émission, les signaux $u_E(t)$, aléatoires comme les messages qu'ils représentent, sont caractérisés principalement par

- la largeur de bande occupée par leur densité spectrale (unilatérale) de puissance $\Phi_{SE}(f)$
- leur puissance P_{SE} ou leur niveau L_{SE} , soit

$$P_{SE} = \int_0^{\infty} \Phi_{SE}(f).df \quad (2.01)$$

2.3.4 Caractéristiques du canal de transmission

Comme le cas d'une transmission numérique, le canal est défini par

- Sa fonction de transfert $H(f)$ qui exprime les distorsions linéaires (d'affaiblissement et de phase) du canal et dont découle sa largeur de bande,
- La densité spectrale de puissance $\Phi_N(f)$ des perturbations qui l'affectent,
- La statistique de ces perturbations.

A cela s'ajoute une caractéristique dont l'importance est typique de la transmission analogique :

- La linéarité de la caractéristique entrée-sortie du système. Les distorsions non linéaires sont en effet la cause de produits d'intermodulation qui perturbent la transmission par un bruit supplémentaire.

2.3.5 Critère de qualité de transmission analogique

Les principaux critères d'évaluation dans le cas de cette transmission :

- Le niveau (puissance) absolu de réception L_{SR} du signal à la sortie du système de transmission,
- Le rapport signal sur bruit ξ_R en ce même point

$$10 \lg \xi_R = L_{SR} - L_{NR} \quad (2.02)$$

L_{NR} : le niveau (puissance) du bruit à la réception.

- Le taux de distorsion harmonique d_1 (voir l'équation 2.03) qui exprime l'effet des non linéarités du système sur un signal sinusoïdal de fréquence f_1 par le rapport entre la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques $U_n (n \geq 2)$ et celle du signal distordu (que l'on peut approcher, pratiquement, par la valeur efficace de la fondamentale U_1).

Le taux de distorsion d_1 dépend de l'amplitude du signal. Il peut aussi être exprimé en décibels par $20 \lg d_1$.

$$d_1 = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_{neff}^2}{\sum_{n=1}^{\infty} U_{neff}^2}} \cong \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{neff}^2}}{U_{1eff}} \quad \text{si } d_1 \leq 1 \quad (2.03)$$

2.4 La transmission numérique [4] [23]

2.4.1 Principe

La transmission numérique a pour objet la communication, d'un point (émetteur) vers un autre (récepteur), d'une information discrète provenant d'une source qui ne dispose que d'un nombre fini « n » de caractères (« alphabet »).

Par une convention préalable, le destinataire a connaissance de l'alphabet utilisé par la source. Il peut donc interpréter l'information qu'il reçoit en fonction de cet alphabet. Il compare les signaux reçus (déformés et perturbés par la transmission dans le canal), à la liste des caractères possibles et en déduit par une décision lequel de ces caractères est le plus probablement à l'origine du signal reçu.

L'information numérique transmise peut ainsi, en principe, être régénérée intégralement à la réception. Toutefois, si la distorsion ou la perturbation des signaux reçus est telle qu'elle simule la présence d'un autre caractère, des erreurs de régénération irréversibles apparaissent. Leur probabilité ε est le caractère principal d'appréciation de la qualité de la transmission numérique.

On a

$$\varepsilon' = \frac{2(m-1)}{m} \text{Prob}(u_N(t) > \frac{1}{2} u_{BR}) \quad (2.04)$$

Avec $\text{Prob}(u_N(t) > \frac{1}{2} u_{BR})$ étant la probabilité de dépassement :

$$\text{Prob}(u_N(t) > \frac{1}{2} u_{BR}) = \int_{\frac{1}{2} u_{BR}}^{\infty} p(u_N) du_N \quad (2.05)$$

$p(u_N)$ est la variable aléatoire continue.

Pour la téléphonie numérique, les principes fondamentaux restent les mêmes. Ce système possède de nombreux avantages sur la téléphonie analogique : meilleur filtrage du bruit, compatibilité avec la transmission de données informatiques, etc. Ici, le signal n'est pas transmis directement mais il est d'abord numérisé. Etant donné que l'on se limite à des fréquences inférieures à 4000Hz, d'après le théorème de Shannon, on peut prendre une fréquence d'échantillonnage de 8000Hz. Chaque échantillon est codé sur 8 bits, ce qui donne un débit de 64kbits/s.

2.4.2 Représentation de l'information numérique

Les caractères produits par la source sont représentés pour la transmission par des signaux physiques composés d'une suite de moments, ou signaux élémentaires, de durée T_M . Dans le cas général, chaque moment peut prendre m valeurs (transmission m -aire).

Le nombre μ de moments nécessaire pour représenter un des n caractères dont dispose la source dépend de m selon la relation $m^\mu \geq n$.

2.4.3 Mode de transmission

La loi de correspondance entre les « m » valeurs de chaque moment, et les caractéristiques du signal physique qui les représente constitue le mode de transmission.

Le signal émis est composé d'une suite aléatoire de signaux élémentaires, correspondant chacun à un moment.

On admettra que pour une transmission numérique en bande de base, les signaux élémentaires sont des multiples d'un signal élémentaire de base dont la forme, à l'émission est

$$u_{Ek} = a_k u_{BE}(t) \quad \text{avec } k = 0, 1, \dots, m-1 \quad (2.06)$$

a_k est un coefficient pouvant prendre m valeurs.

Le mode est alors caractérisé par :

- la forme $u_{BE}(t)$ du signal élémentaire de base à l'émission ;

- les coefficients a_k ;
- une éventuelle loi séquentielle imposant certaines contraintes à la détermination des coefficients a_k en fonction des signaux émis précédemment (modes à mémoire).

2.4.4 Influence du canal

Le canal peut être caractérisé par

- la fonction de transfert $H(f)$ dans le domaine fréquentiel ou sa réponse impulsionnelle $h(t)$ dans le domaine temporel ;
- la densité spectrale de puissance et la distribution statique des amplitudes des perturbations (bruits) qui l'affectent.

Connaissant la forme $u_{BE}(t)$ des signaux élémentaires de base émis ou leur transformée de Fourier $U_{BE}(f)$, on en déduit les caractéristiques correspondantes des signaux élémentaires de base à la réception, en l'absence de perturbations :

$$u_{BR}(t) = u_{BE}(t) * h(t) \quad (2.07)$$

La formule (2.07) permet d'évaluer la déformation des signaux de base et ensuite des distorsions linéaires du canal, en particulier leur étalement dans le temps et l'influence qu'ils risquent d'avoir sur les moments voisins. Par ailleurs :

$$U_{BR}(f) = U_{BE}(f)H(f) \quad (2.08)$$

2.4.5 Notion de perturbation

Les perturbations, qui affectent le signal en cours de transmission, rendent la discrimination des m valeurs par le récepteur plus difficile, et peuvent devenir la cause d'erreurs de régénération dont la probabilité dépend :

- de la distribution statique des perturbations (donc de leur puissance) ;
- de l'amplitude des signaux utiles reçus et de leur forme;
- du nombre d'états m .

Il en résulte que l'information reçue par le destinataire n'est pas exactement identique à celle émise par la source. Les erreurs de transmission, qui expriment cette différence entre les caractères émis et reçus, ont une probabilité d'apparition qui n'est pas forcément égale à celle des erreurs de régénération sur les moments. En effet, par un codage approprié et l'adjonction d'une redondance correspondante, il est possible de détecter la présence d'un moment erroné dans un caractère et d'en refuser l'interprétation, ou même de corriger certaines erreurs et de restituer un caractère correct, bien qu'il contienne des moments erronés.

Dans certains cas, notamment dans les transmissions par ondes, la fonction de transfert du canal est soumise à des fluctuations aléatoires. On parle alors de perturbations multiplicatives, telles que les baisses brusques et aléatoires appelées « évanouissements » ou « fading » (phénomène dépendant de la fréquence), dues à des couches de l'atmosphère à températures différentes. Il existe aussi comme perturbation :

- l'effet de la variation de l'indice de réfraction atmosphérique et de son gradient, modifiant la courbure du faisceau et, par conséquent, le pointage optimal des antennes ;
- l'effet de l'absorption (ou pertes) en cours de trajet, due à de fortes précipitations (surtout sensible aux fréquences très élevées).

En raison du caractère aléatoire des évanouissements, on peut les considérer comme une sorte de bruit, appelé « bruit multiplicatif », car au lieu de se superposer au signal comme le font les perturbations usuelles (bruit additif), il agit sur l'intensité des signaux reçus en la multipliant par un facteur variable aléatoire.

2.5 Intérêt du numérique face à l'analogique (transmission vocale) [4] [23]

Le grand intérêt est la qualité de la transmission vocale. En effet, une conversation n'a pas de propriété particulière, ce qui rend difficile la distinction entre le bruit et le signal désiré lors de la réception. Par contre un signal numérique possède des caractéristiques précises. Par exemple, la régularité dans le temps de l'envoi de paquets de bits permet de corriger certaines erreurs : quand on observe deux variations de 0 à 1 trop proches, on supprime la moins probable. Ceci permet de retrouver quasiment un signal identique entre l'émission et la réception. De plus, des systèmes de correction d'erreurs minimisent encore les déformations.

En télécommunication numérique, on peut également implémenter des algorithmes de compression de données et des méthodes de multiplexage plus performantes et ainsi optimiser l'usage de la bande passante disponible. C'est un autre avantage qui justifie le remplacement de l'analogique par le numérique.

Enfin, le passage au numérique permet d'assurer un meilleur interfaçage avec les données issues d'un ordinateur. Ainsi, avec un même appareil, on peut à la fois converser et s'échanger des informations telles que des fichiers, des images. C'est donc une force supplémentaire du numérique face à l'analogique.

Cependant, on ne peut pas négliger l'analogique.

Le signal porteur d'information est en hyperfréquence ; c'est le signal modulant qui utilise des ondes centimétriques.

2.6 Modulations [4] [23]

La modulation est une opération qui consiste à transposer un signal représentant une information en un autre signal sans modifier sensiblement l'information qu'il porte. On distingue deux grandes catégories de modulation : les modulations analogiques et les modulations numériques.

2.6.1 Modulations analogiques

2.6.1.1 Principe

Dans les modulations analogiques, la convention de modulation consiste à faire varier un paramètre (amplitude, fréquence, phase, durée, etc.) du signal secondaire proportionnellement à la valeur instantanée du signal primaire. Ces modulations ne modifient pas la nature de l'information (analogique ou numérique).

2.6.1.2 Modulation analogique discrète

Dans le sens où les modulations analogiques ne modifient pas la nature de l'information portée par des signaux avant et après modulation, l'information est numérique d'origine. On désigne par modulations analogiques discrètes des procédés dans lequel

- Le signal primaire est porteur d'information numérique, binaire ou m-aire, et peut de ce fait prendre m valeurs discrètes ;
- La porteuse est un signal sinusoïdal

$$u_p(t) = U_p \cos \omega_p t \quad (2.09)$$

- Le signal secondaire est obtenu par la variation discrète d'un des paramètres (amplitude, fréquence ou phase) de la porteuse selon les m valeurs possible du signal primaire.

2.6.2 Modulations numériques

2.6.2.1 Principe

Les modulations numériques consistent à convertir une information analogique, portée par un signal à variations continues, en une séquence de caractères discrets, issu d'un alphabet fini de q caractères.

Il est important de souligner que les modulations numériques associent aux valeurs exactes d'une grandeur analogique physique (signal primaire) des nombres entiers, sans réalité physique. Afin d'être transmis, ces nombres doivent être représentés par des signaux (signal secondaire). Pour la démodulation, ces nombres doivent être extraits des signaux secondaires par régénération. C'est à partir de ces nombres (et non pas directement des signaux secondaires) que des valeurs physiques discrètes du signal démodulé sont déterminées par une convention préétablie. Le signal ainsi

reconstitué n'est donc pas analogique au sens exact du terme, mais ne peut être que la traduction physique de l'information numérique transmise.

2.6.2.2 Types

La principale modulation numérique est la modulation par impulsion et codage. A chaque échantillon analogique, elle fait correspondre un nombre (parmi q) qui est ensuite représenté sous forme codée adéquate.

Les modulations numériques différentielles ne codent pas la valeur de chaque échantillon, mais la différence par rapport à l'échantillon précédent.

Les modulations numériques adaptives sont celles où la loi de correspondance entre les valeurs analogiques et leur représentation numérique dépend de ce qui s'est passé précédemment.

Les fréquences sont divisées en plusieurs classes dont fait partie l'hyperfréquence. Chaque classe présente des avantages et des inconvénients. Pourtant, les télécommunications ne pourront plus se passer de l'hyperfréquence de nos jours.

CHAPITRE 3 . ETUDE FREQUENTIELLE

3.1 Les basses et moyennes fréquences [1]

3.1.1 Etude

Les ondes de basse fréquence présentaient pour les premiers radiotechniciens l'avantage de pouvoir être émises avec les appareils dont ils pouvaient disposer au début du XXème siècle ; en outre, ces ondes longues, parce qu'elles se propagent à la surface du globe, pouvaient atteindre de très grandes distances.

De plus, lorsque la fréquence dépasse quelques centaines de kilohertz, la portée des ondes décroît parce que la rapidité plus grande des variations des champs électromagnétiques se traduit par des pertes plus élevées d'énergie dans l'ionosphère et dans le sol. Ainsi, pour la plupart des ondes de moyenne fréquence, la portée est de 1 000 à 1 500 km, alors que, à la limite supérieure de cette bande, soit à la fréquence de 3 MHz, la portée ne dépasse guère l'horizon visible depuis l'antenne émettrice.

Avec une antenne bien étudiée et un émetteur suffisamment puissant, les ondes de basse fréquence peuvent se propager sur l'ensemble de la planète. Bien que leur propagation dépende pour beaucoup de l'ionosphère, elles sont insensibles aux perturbations de cette couche conductrice de l'atmosphère, qui affectent si profondément les ondes de haute fréquence. Non seulement les ondes de basse fréquence sont toujours fidèles au rendez-vous, mais elles sont aussi les seules qui puissent pénétrer dans l'eau, tant et si bien qu'on s'en sert pour communiquer avec les sous-marins en plongée.

3.1.2 Inconvénients

Cependant, les basses fréquences présentent deux inconvénients majeurs :

- Le premier n'est autre que leur faible capacité d'information.
Jusqu'à une époque récente, les ondes de très basse fréquence ne pouvaient transmettre que des signaux télégraphiques, et encore, à faible cadence. En 1968, des efforts ont été faits en vue de mettre au point des systèmes permettant de loger 3 ou 4 canaux télégraphiques dans une onde porteuse de très basse fréquence. Il va de soi que la radiotéléphonie et la radiodiffusion ne deviennent possibles que dans la partie supérieure de la gamme des basses fréquences.
- Le second inconvénient a trait à la nature du matériel qu'il faut mettre en œuvre. Ces ondes requièrent, pour leur émission, d'énormes quantités d'énergie et des antennes gigantesques. Pour qu'elle soit efficace, une antenne émettrice doit mesurer à peu près une demi-longueur d'onde. Comme cette longueur croît quand la fréquence baisse, aux basses

fréquences se trouvent associées les plus grandes longueurs d'ondes. C'est ainsi qu'une onde de 30kHz a une longueur de 10 km. En général, on fait des antennes de basse fréquence avec des fils longs de plusieurs centaines de mètres, tendus horizontalement entre des pylônes. Aux Etats-Unis, sur une bande côtière du Maine, on peut voir un alignement de ces antennes dont se sert la Marine américaine pour communiquer avec les sous-marins. Manquant de place pour installer d'aussi grandes antennes à bord, les sous-marins ne peuvent pas répondre aux messages par la même voie.

3.2 Les hautes fréquences [1] [4]

3.2.1 Gamme de fréquence

La gamme de fréquences comprise entre 3 et 30MHz est appelée la bande de haute fréquence. Des ondes de haute fréquence ont été réservées pour de nombreux services mobiles, tels que les radiocommunications des navires et des avions. Sur l'ensemble de cette partie du spectre, on a prévu de nombreuses bandes étroites qui sont attribuées à des services déterminés.

3.2.2 Présentation

L'atténuation des signaux de haute fréquence varie le long du jour, au cours de l'année et pendant le cycle solaire de 11 ans. Le fait que les ondes d'une fréquence donnée soient réfléchies ou bien absorbées par l'ionosphère, ou encore qu'elles la traversent pour se perdre dans l'espace, est sous la dépendance de l'état momentané de cette couche, qui dépend à son tour du rayonnement solaire. Après les navires, les grands utilisateurs mobiles des hautes fréquences sont les avions, qui s'en servent pour les télécommunications à longue distance lors de leurs vols transocéaniques. De nos jours, les avions sont équipés d'un matériel de radiotéléphonie de haute fréquence assez simple pour que des membres de l'équipage puissent s'en servir sans être des radiotélégraphistes professionnels.

Dans le domaine des hautes fréquences, la longueur des ondes est de 10 à 100m ; ce qui signifie que des antennes efficaces peuvent être employées non seulement par les stations terrestres fixes, mais aussi à bord des navires. L'énergie consommée par l'émetteur est bien moindre que pour les postes de basse fréquence : il suffit de quelques kilowatts pour communiquer tout autour du monde et, même avec une puissance de quelques centaines de watts, un bateau se trouvant dans n'importe quelle mer peut communiquer avec l'Europe pourvu que la transmission ait lieu à l'heure la plus favorable du jour.

3.2.3 Inconvénients

3.2.3.1 Problème de distance

Le « fading » ou effet d'évanouissement est, sans conteste, le plus grave de ces inconvénients. Dans le domaine des hautes fréquences, l'intensité du signal capté varie continuellement et rapidement au cours de la journée.

L'ionosphère n'est pas, vis-à-vis des ondes, une sorte de miroir tout à fait statique. Au contraire, sa surface inférieure est constamment en évolution : des gaz ionisés se recombinent, tandis que des particules provenant du soleil continuent d'ioniser d'autres atomes ; des ondes régulières ou irrégulières parcourent cette surface à l'image de la houle des mers.

Il existe un fading dû au fait que les ondes que rayonne l'émetteur dans toutes les directions atteignent l'ionosphère sous des angles différents. Lorsque l'angle d'incidence est grand, l'onde est réfléchiée plus loin vers le sol, qui la réfléchit à son tour et ainsi de suite. C'est après deux ou trois rebondissements que l'onde parvient finalement au poste récepteur. Mais en même temps, là où l'angle d'incidence est petit, l'onde est réfléchiée plus tôt et moins obliquement vers le sol, et alors le même poste récepteur est atteint après un nombre plus grand de réflexion (parfois 5). Il en résulte que, pour un même signal élémentaire, l'énergie parvient déphasée au récepteur, les ondes ayant parcouru des chemins d'inégale longueur. Le plus grave est que de petits et inévitables changements de l'ionosphère font changer constamment la valeur de ce déphasage. Un phénomène se produit alors : à un moment donné, par le jeu de ces variations de l'ionosphère, l'onde qui a rebondi à supposer 2 fois et celle qui l'a fait 5 fois, se trouvent en phase à l'arrivée au récepteur ; alors les deux ondes s'ajoute, et il en résulte une réception puissante. Mais un peu après, l'ionosphère ayant continué à bouger, le déphasage recommence et le signal reçu s'affaiblit. Si ce phénomène évolue toujours dans le même sens, il arrive un moment où les deux ondes sont en opposition de phase et alors, leurs effets se retranchant l'un de l'autre, il s'ensuit une excitation pratiquement nulle du haut-parleur. De telles variations lorsqu'elles sont rapides, provoquent une grave distorsion des signaux et rendent si facile les erreurs en radiotélégraphie que parfois les liaisons doivent être interrompues ou reprises sur un autre canal.

3.2.3.2 Solution pour la distance

Par bonheur, ce type de fading n'a que des conséquences très localisées au point que, pendant que le déphasage des ondes rend la réception défectueuse en un point, les mêmes ondes peuvent être reçues en phase quelques centaines de mètres plus loin. Cela a suggéré un palliatif qui s'est traduit par la technique dite de la « diversité de l'espace ». La station réceptrice est munie de deux ou trois antennes assez espacées dont chacune alimente un récepteur différent. Il existe ainsi de très fortes chances pour que, à tout moment, l'un des récepteurs capte un signal puissant. Un dispositif

électronique choisit constamment le meilleur des trois signaux et assure automatiquement la commutation d'un récepteur à l'autre sans qu'il y ait interruption de la réception.

3.2.3.3 Problème en fréquence

Si le fading est un problème très localisé en distance, on pourrait dire, par analogie, qu'il l'est aussi en fréquence. Deux fréquences séparées de seulement quelques centaines, voire quelques dizaines de hertz seront différemment sujettes au fading, et tandis que l'une est captée puissamment, l'autre s'évanouira.

Les émetteurs fixes, qu'ils fonctionnent en télégraphie ou en phonie, parce qu'ils n'ont pas à être déplacés et qu'ils peuvent bénéficier d'installations plus importantes, et aussi parce qu'ils assurent un trafic plus intense que les postes mobiles (ce qui offre de plus grandes possibilités d'amortissements), sont généralement plus puissants et profitent de techniques plus élaborées pour pallier les inconvénients des hautes fréquences.

3.2.3.4 Solution pour la fréquence

La technique dite de la « diversité de fréquence » tire profit de cette sorte de sélectivité de l'ionosphère : en émettant simultanément sur deux fréquences, on permet à un récepteur spécial de choisir constamment celle qui, sur le moment, fournit le signal le plus puissant.

Pour les liaisons télégraphiques sur ondes de haute fréquence, on a souvent recours à une autre technique : « l'émission avec changement de fréquence ». Les signaux télégraphiques, au lieu d'établir et d'interrompre alternativement un courant comme on le fait d'ordinaire en radiotélégraphie, sont commutés alternativement sur deux ondes porteuses de fréquences très proches. Il s'ensuit une moins grande sensibilité des liaisons aux effets fading.

3.3 Les hyperfréquences [1] [4] [8] [10]

3.3.1 Très hautes et ultra hautes fréquences

3.3.1.1 Avantages et conditions

L'ionosphère est transparente aux ondes dont la fréquence dépasse environ 30MHz. Ces ondes la traversent donc et vont se perdre dans l'espace, si bien qu'on ne puisse pas les employer pour communiquer au-delà de l'horizon. Elles n'en constituent pas moins l'un des domaines les plus importants du spectre radioélectrique, comme en témoignent les emplois plus étendus qu'on a trouvés à ces fréquences.

Ce qui rend les très hautes fréquences (de 30 à 300MHz) intéressantes est le fait que leur propagation, bien que limitée en distance, est remarquablement stable. En outre, elles sont particulièrement utiles pour la télévision parce qu'elles permettent aux ondes porteuses de véhiculer une quantité suffisante d'informations. De même, elles sont idéales pour les émissions

de radiodiffusion de haute fidélité parce que cette région du spectre est suffisamment étendue pour contenir les canaux de bande très large requis par la modulation de fréquence.

Au cours des années 1960, des émetteurs de télévision commencèrent à fonctionner dans la partie inférieure de la bande des fréquences ultra haute qui s'étend des 300 aux 3 000 MHz.

Ce glissement vers les plus hautes fréquences est la conséquence de la multiplication des émetteurs, l'afflux de demandes de canaux ne pouvant plus être satisfait par une bande VHF déjà saturée. Une liaison en UHF peut constituer une solution économique pour relier une maison isolée au réseau téléphonique. Dans certaines contrées, une liaison de ce genre devient moins coûteuse qu'une ligne aérienne sur poteaux dès que la distance dépasse 5 km, et même pour des distances inférieures si le terrain est très accidenté.

Jusqu'à très récemment, les ondes courtes étaient encore les seules qui étaient possibles à exploiter pour des liaisons sur ces distances intermédiaires, mais elles ne pouvaient véhiculer que le signal de 4 à 6 canaux téléphoniques. C'est que les stations requises, pour un système de liaisons par diffusion troposphérique, étaient si coûteuses que seul un trafic intense pouvait justifier de tels investissements.

3.3.1.2 Inconvénient et limite

Le domaine des UHF, compris entre 790 et 960 MHz, est particulièrement intéressant et a permis l'éclosion d'une technique nouvelle : la diffusion troposphérique qui autorise des portées de 300 km. Nous savons pourtant que les ondes des gammes VHF et UHF, parce qu'elles se propagent en ligne droite, ne peuvent normalement pas atteindre des points situés au-delà de l'horizon, ce qui limite leurs applications. Toutefois, les ondes de la tranche des UHF qui nous occupe ont la propriété d'être diffusées par les zones de discontinuité de la troposphère dues à de brusques variations de l'indice de réfraction de l'air (par exemple, lorsqu'une couche d'air froid et d'air chaud sont en contact). Les ondes sont alors diffusées dans toutes les directions et de ce fait, quoique très faiblement, elles peuvent être captées jusqu'à 300 km de l'émetteur. Il faut pour cela collecter le maximum d'énergie avec de grandes antennes paraboliques du genre de celles des radiotélescopes ou de celles qui assurent les transmissions via satellite artificiel.

3.3.1.3 Principes

Au cours des années 1950, les militaires s'intéressèrent grandement à la technique fondée sur la radiodiffusion troposphérique, parce qu'elle permet les liaisons à des distances comprises entre le maximum atteint en VHF (30 km) et le minimum, pratiquement possible en haute fréquence (300 km). Certes, les hautes fréquences (ondes courtes) peuvent couvrir ces distances intermédiaires ; mais le manque de précision rend alors les liaisons aléatoires, parce que

l'émission doit alors être faite trop près de la verticale si l'on veut que l'onde réfléchiée par l'ionosphère revienne vers le sol à quelques dizaines de kilomètres de l'émetteur. A leur tour, les fréquences moyennes seraient très coûteuses et ne permettraient de disposer que de rares canaux. En revanche, les systèmes à diffusion troposphérique offrent beaucoup de canaux pour des communications téléphoniques de haute qualité, tout en ayant une fiabilité de plus de 99,9%.

3.3.2 Modulation

Comme la modulation d'amplitude est perturbable par les brouillages externes (bruit thermique par exemple), il est nécessaire d'utiliser la modulation de fréquence dans le domaine de l'hyperfréquence.

L'hyperfréquence est un meilleur signal modulant pour les signaux de plus basses fréquences. D'ailleurs, les signaux qui représentent les informations en télécommunication sont toujours des fréquences que l'hyperfréquence est capable de transporter.

3.3.3 Mode de transmission de l'hyperfréquence

3.3.3.1 Moyen de transport

Les ondes peuvent se diffuser par voie hertzienne dans l'atmosphère. Elles peuvent aussi être guidées par des guides telles que les guides d'ondes rectangulaires et les guides d'ondes circulaires.

Du point de vue technique et technologique, il existe des guides métallisés, des guides diélectriques, et des câbles coaxiaux.

3.3.3.2 Charges

Le but de la charge est de transmettre l'onde dans l'atmosphère. Les charges sont les antennes. Il existe donc différentes charges telles que :

- L'antenne parabolique,
- L'antenne hyperbolique,
- L'antenne sphérique,
- L'antenne conique,
- L'antenne télescopique.

La transmission de l'hyperfréquence à partir de la source vers la charge est faite à partir des guides d'ondes.

3.3.4 Les faisceaux micro-ondes

3.3.4.1 Généralités

En montant encore plus haut dans le spectre des fréquences, la première région d'intérêt pour les radiotechniciens, sur laquelle on tombe, est celle des 3 à 12 GHz.

Les micro-ondes sont particulièrement utiles pour relier entre eux de grands centres urbains car, en raison de leur énorme fréquence, elles peuvent véhiculer une quantité colossale d'informations. En fait, la porteuse d'un seul émetteur peut être modulée par des milliers de conversations téléphoniques, ou des signaux de télévisions par exemple.

A ces fréquences-là, la longueur d'onde n'est que de quelques centimètres, ce qui permet de concentrer les ondes dans d'étroits faisceaux et de les projeter avec précision dans la direction voulue. L'antenne peut être fixée, par exemple, au foyer d'un réflecteur parabolique qui projette avec précision l'étroit faisceau sur l'antenne réceptrice du relais suivant. Dans certains cas, il est plus intéressant de se servir des réflecteurs en forme de cornet. On peut aussi focaliser ces ondes comme on le fait pour les rayons lumineux, quoique avec des lentilles beaucoup plus grandes.

Actuellement, les pays évolués mettent en place tout un réseau de faisceaux hertziens qui relie les principales agglomérations urbaines et grâce auquel les émissions de la télévision peuvent être retransmises par de multiples postes dans l'ensemble du territoire. Les signaux transmis par les satellites de télécommunication et captés par une puissante station aménagée sont acheminés par ce réseau. Enfin, il existe des interconnexions entre les réseaux de faisceaux hertziens des pays voisins.

3.3.4.2 Les satellites de télécommunication

Les services radioélectriques peuvent être classés en deux groupes fondamentaux qui se distinguent par les fréquences mises en œuvre. Au-dessous de quelques 30 MHz, les ondes peuvent parcourir de grandes distances mais véhiculent peu d'informations. Au-dessus de cette même fréquence, les ondes acheminent beaucoup d'informations mais leur portée ne dépasse pas 80 km.

Dans ce second groupe de hautes fréquences, les micro-ondes constituent la bande la plus importante pour les liaisons entre points fixes.

3.3.4.3 Orbites géostationnaires

Les relais spatiaux ou satellites de défilement se déplaçaient autour de la terre plus vite qu'elle ne tourne sur son axe, ce qui présentait de graves inconvénients.

D'une part les stations terriennes devaient, non seulement repérer l'engin dans le ciel, mais aussi le suivre constamment avec leurs énormes antennes.

D'autre part, l'engin sillonnait si rapidement le ciel que la condition indispensable qu'il pût jouer le rôle de relais, (il doit être simultanément en vue des stations émettrice et réceptrice), n'était satisfaite que pendant de courts instants (une dizaine de minutes environ), à chaque révolution du satellite (environ toutes les trois heures). On aurait pu lancer un certain nombre de satellites sur une même orbite, espacés en sorte qu'il y en eût toujours un prêt à prendre la relève lorsqu'un autre n'est plus utilisable, mais on trouva une meilleure solution.

C'est Arthur C. Clarke qui avait proposé cette solution en faisant remarquer que, puisque la période de rotation du satellite autour de la terre augmente avec la distance, il existe une orbite à 35 900 km du sol, où cette période a exactement la même durée que la rotation de la terre autour de son axe. Aussi, un satellite placé sur cette orbite synchrone, pourvu qu'elle soit circulaire et qu'elle se trouve dans le plan équatorial, paraîtra rester immobile au-dessus du point de la terre où il a été satellisé puisque ce point et le satellite tournent dans l'espace dans la même vitesse angulaire). L'antenne des stations terriennes peut donc être pointée une fois pour toute sur ce satellite géostationnaire, de petits réglages suffisant de temps à autre à compenser la légère dérive du satellite. D'autre part, 35 900 km est une altitude considérable qui permet au satellite d'être au-dessus de l'horizon pour une très grande partie de la surface terrestre ; tant et si bien que 3 satellites de ce type suffisent pour desservir l'ensemble de la planète (là où de 40 à 50 satellites appelés Telstar, relais hertzien, auraient été nécessaires sur une orbite basse, 10 803 km pour le Telstar II).

Compte tenu de l'affaiblissement des ondes dans l'atmosphère, il faut d'envoyer des ondes de puissance suffisante suivant cette atténuation atmosphérique. Les ondes centimétriques de l'hyperfréquence se propagent toujours en visibilité directe. Les liaisons par satellite en sont des exemples.

CHAPITRE 4 . LES ONDES

4.1 Propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère [1] [7] [8] [9]

4.1.1 Mode de propagation d'ondes

Les ondes radio peuvent être propagées d'une antenne d'émission à une antenne de réception de diverses manières : en suivant la courbure du sol, en travers de l'atmosphère, ou par réflexion au moyen de réflecteurs naturels ou artificiels, et ce en fonction de leur fréquence.

Les ondes de sol ou ondes de surface, sont des ondes se propageant le long du sol sans être gênées par les obstacles et peuvent atteindre des milliers de kilomètres en très basse fréquence.

Les ondes directes, ou ondes d'espace, se propagent en ligne droite et sont donc utilisés à condition qu'il y ait une portée optique entre les antennes d'émission et de réception ; cette méthode est utilisée à partir de très hautes fréquences (VHF).

La transmission par réflexion ionosphérique est possible du fait que la couche ionosphérique contenue dans l'atmosphère réfléchit les ondes de haute fréquence (HF) qui l'atteignent.

La transmission par diffraction troposphérique est due à la propriété d'une autre couche atmosphérique, la troposphère, de changer brusquement l'indice de réfraction, vu la proximité de masses d'air et des vapeurs d'eau : ceci implique donc réfractions et réflexions, et facilite les communications à longues distances.

L'onde électromagnétique peut être caractérisée par sa puissance, et sa fréquence.

4.1.2 Puissance de rayonnement

L'onde électromagnétique est une forme d'énergie : l'énergie de rayonnement qui est d'autant plus forte que les intensités des champs électriques et magnétiques sont plus grandes. Il est courant de parler de la puissance de rayonnement émise par une source et de la densité de puissance existant autour de la source.

L'expérience montre qu'une source d'onde, de puissance de rayonnement P_t , émettant uniformément dans toutes les directions de l'espace, distribuera à une distance r une intensité de puissance p_r telle que :

$$p_r = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (4.01)$$

Ce qui équivaut à dire que l'énergie de rayonnement est également distribuée sur une sphère virtuelle dont le centre est la source elle-même. Cette énergie décroît avec la distance (figure 4.01).

Par cette puissance de rayonnement, on peut obtenir la résistance de rayonnement en sachant la valeur efficace du courant I_{eff} pour l'antenne utilisé :

$$R_r = \frac{P_r}{I_{\text{eff}}^2} \quad (4.02)$$

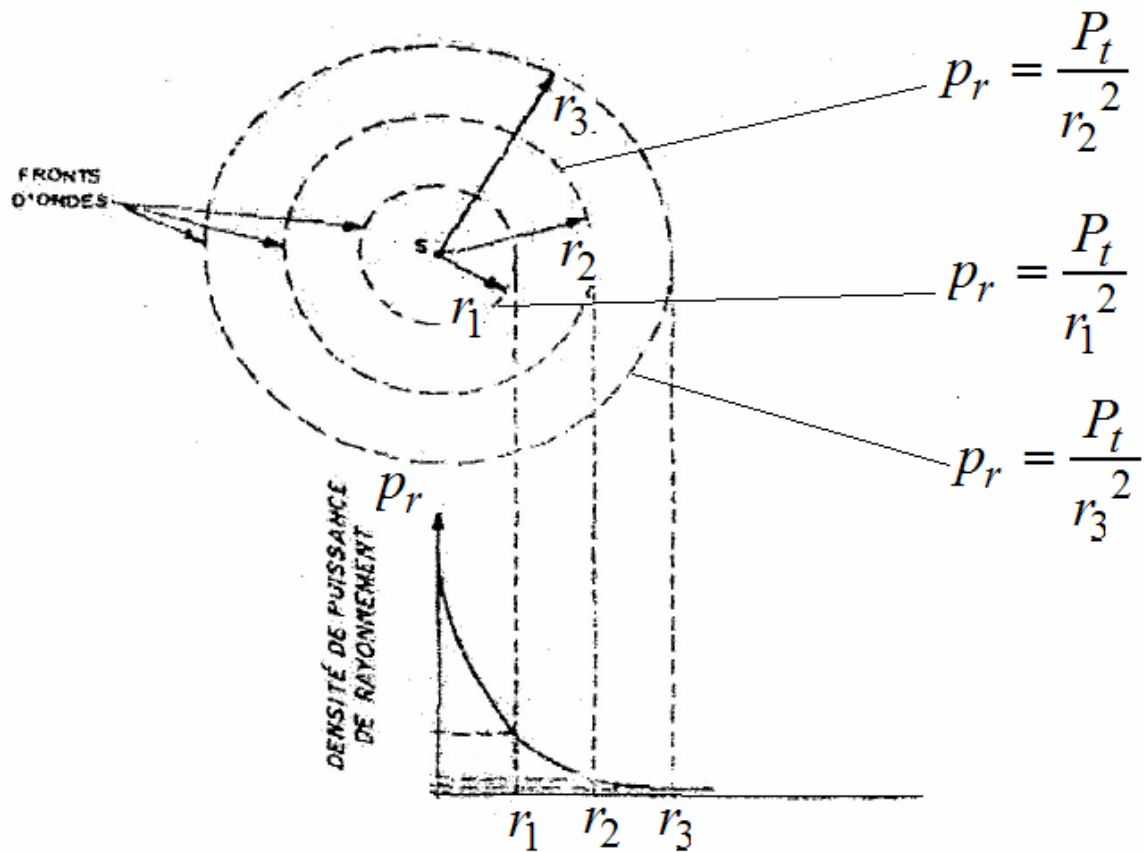


Figure 4.01 : Décroissance de la densité de puissance en fonction de la distance à la source de rayonnement

4.1.3 Polarisation d'une onde

La polarisation d'une onde électromagnétique est le type de trajectoire que décrit l'extrémité du champ électrique $\vec{E}$ au cours du temps dans le plan transverse. Il existe trois types de polarisation.

4.1.3.1 Les types de polarisation

4.1.3.1.1 Polarisation linéaire

Le champ $\vec{E}$ n'a qu'une composante variant sinusoïdalement : sa trajectoire est donc un segment de droite. Un dipôle génère classiquement une onde électromagnétique polarisée linéairement.

4.1.3.1.2 Polarisation circulaire

Le champ $\vec{E}$ a deux composantes E_θ et E_ϕ de même amplitude et déphasées de 90° , son extrémité décrit un cercle.

La résultante des composantes verticale et horizontale de champ électrique dans cette polarisation est :

$$\frac{E_\theta^2}{E_1^2} + \frac{E_\phi^2}{E_2^2} = 1 \quad (4.03)$$

E_1 et E_2 sont les axes.

4.1.3.1.3 Polarisation elliptique

La polarisation elliptique correspond au cas général d'un champ $\vec{E}$ comprenant deux composantes E_θ et E_ϕ d'amplitudes et de phases quelconques.

La résultante des champs verticaux et horizontaux de champ électrique dans cette polarisation est :

$$E_\theta^2 + E_\phi^2 = E_R^2 \quad (4.04)$$

E_1 et E_2 sont les axes. La grandeur E_R serait le rayon.

4.1.3.2 Applications des polarisations

4.1.3.2.1 Polarisation circulaire

Pour les communications terrestres, fixes ou mobiles, une polarisation linéaire verticale ou horizontale suffit. Pour des communications avec des engins spatiaux en rotation sur eux-mêmes, une polarisation circulaire permet au récepteur de recevoir un signal indépendamment de la position angulaire de l'antenne d'émission.

On peut générer et recevoir une polarisation circulaire au moyen de dipôles croisés alimentés avec un déphasage de 90° produit par une ligne de $\lambda/4$, avec $\vec{H} = \vec{E} \times \vec{H}$ (voir la figure 4.02).

4.1.3.2.2 Multiplexage de polarisations

La polarisation d'une onde permet de multiplexer deux porteuses de même fréquence : l'une en polarisation horizontale, l'autre en polarisation verticale, ou une en polarisation circulaire gauche, l'autre en polarisation circulaire droite. Cette technique est utilisée pour les faisceaux hertziens et les satellites géostationnaires. Les réflecteurs paraboliques modifient légèrement la polarisation d'une onde. Le découplage de polarisation donne l'affaiblissement de la polarisation croisée sur la polarisation désirée.

4.1.3.2.3 Remarque

Une onde incidente au sol est réfléchiée en polarisation inverse ; la réflexion d'ondes électromagnétiques sur des objets sphériques ou des gouttes d'eau s'accompagne d'un changement du sens de polarisation dans le cas de la polarisation circulaire conique ; cette dernière propriété permet, au moyen de techniques radar, d'identifier certains objets réfléchissants baignant dans le brouillard (c'est le cas d'un avion) ou dans l'eau (cas d'un bateau).

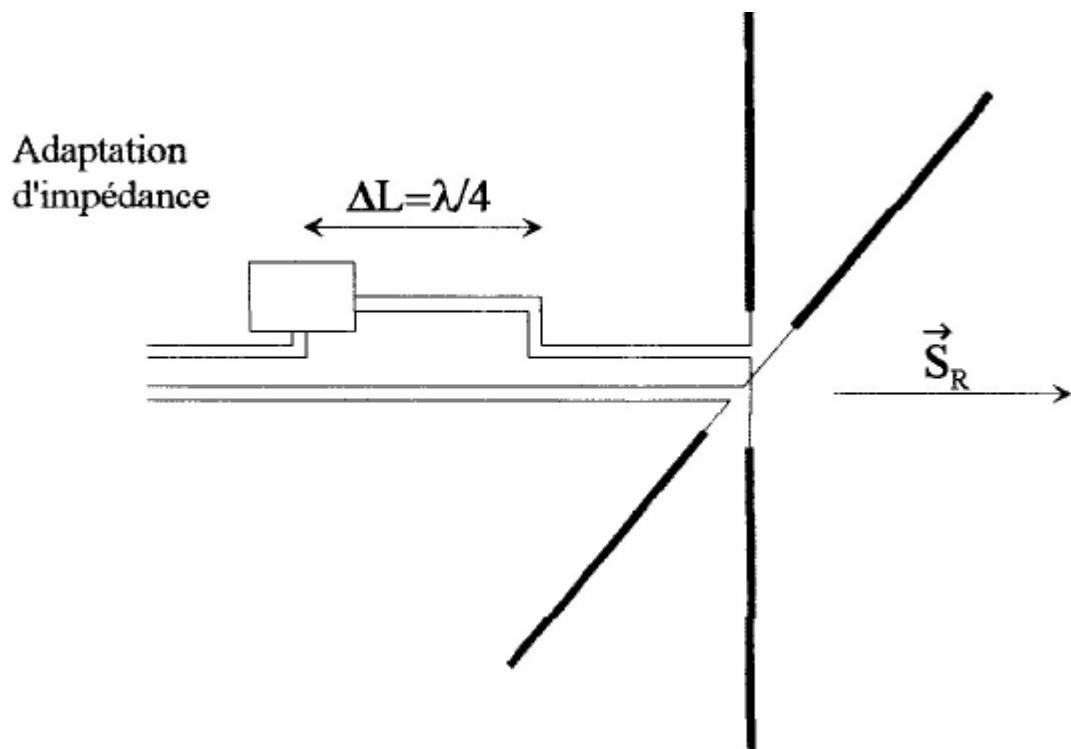


Figure 4.02 : Génération et gain d'une polarisation circulaire au moyen de dipôles croisées alimentés avec un déphasage de 90° produit par une ligne de $\lambda/4$

4.2 Fréquence et longueur d'onde [9]

Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par leur fréquence et leur longueur d'onde.

La fréquence d'une onde électromagnétique est la fréquence des champs électrique et magnétique qui la composent, soit le nombre de cycles par seconde exécutés par le champ électrique ou magnétique (un cycle par seconde correspond à 1 Hertz ou 1 Hz).

4.3 Génération d'onde [5]

Une onde électromagnétique se propageant dans l'espace peut être produite :

- par des courants, représentés vectoriellement par une densité $\vec{J}$ en A/ m². C'est le cas des antennes filaires.
- par une ouverture dans un volume où règne un champ électromagnétique, par exemple l'extrémité ouverte d'un guide d'onde. C'est le principe des antennes paraboliques.

4.4 Présentation de l'atmosphère [1] [4] [8] [12]

4.4.1 L'atmosphère terrestre

L'atmosphère constitue un milieu complexe pour la propagation des ondes électromagnétiques. Contrairement aux lignes, il n'est pas optimisable, mais doit être accepté tel qu'il est. Grossièrement, l'atmosphère est constituée de trois régions superposées principales :

- La troposphère (altitude inférieure à 15 km) caractérisée par sa turbulence (vents), la présence de vapeur d'eau (nuage) et une diminution de la température avec l'altitude. On y constate un gradient de l'indice de réfraction qui a pour effet de courber la trajectoire des ondes électromagnétiques en direction du sol. La troposphère est la couche qui est en contact avec le sol;
- La stratosphère (altitude de 15 à 40 km), pratiquement dépourvue de vapeur d'eau et dont la température croît avec l'altitude avant de se stabiliser. Ainsi, elle intervient peu dans la propagation des ondes;
- L'ionosphère (altitude de 40 à 1 000 km) qui présente des couches ionisées dont la densité d'ionisation dépend fortement de l'heure, de la saison et de l'activité des taches solaires (cycle d'environ 11 ans). Cette région joue un rôle important dans la propagation des ondes radioélectriques. Elle est siège de phénomènes de réfraction, de réflexion et d'absorption.

4.4.2 Particularité de l'ionosphère

L'ionosphère est exposée au rayonnement solaire ainsi qu'aux rayons cosmiques et aux météorites qui provoquent l'ionisation des molécules. Les particules chargées négativement (électrons) et positivement (ions) ont tendance à se concentrer en couches ionisées qui vont jouer un rôle très important dans la propagation des ondes, principalement des ondes en HF.

L'ionosphère est subdivisée en trois sous couches :

- La sous-couche D (altitude entre 50 et 90 km), dont la concentration d'électrons est de 100 A.e.m^3 , disparaît la nuit car elle est proche de la stratosphère et que les gaz s'élèvent durant cette période. Les électrons sont absorbés par les anions positifs de la terre. Les électrons varient suivant le nombre de gaz.

- La sous-couche E (altitude entre 90 et 120 km) dont la concentration d'électrons est de 1 000 à 100 000 A.e.m³. La chaleur y est presque constante mais c'est la densité de gaz qui varie.
- La sous-couche F qui se subdivise encore en sous-couche F₁ (altitude entre 120 et 180 km) avec une concentration d'électrons de 300 000 A.e.m³ ; et en sous-couche F₂ (altitude entre 180 et 450 km en été) avec une concentration d'électrons de 10⁶ A.e.m³ et de 2.10⁶ A.e.m³ (altitude entre 180 et 350 km en hiver).

4.5 Les types de propagation [4] [5] [8]

Entre une antenne d'émission et une antenne de réception, située au voisinage de la terre, un onde électromagnétique peut suivre quatre trajets différents (voir figure 4.03).

4.5.1 Propagation superficielle

Encore appelée *onde de sol*. La composante horizontale de E interagit avec le sol, générant des pertes. Seule reste la composante verticale de E (on parle de polarisation verticale). Les pertes dues à l'interaction de l'onde avec le sol sont d'autant plus élevées que la fréquence est élevée et que la conductivité du sol est faible; pour cette raison, la portée des transmissions par ondes de surface est élevée pour les ondes longues et moyennes, mais faible pour les ondes courtes et ultracourtes.

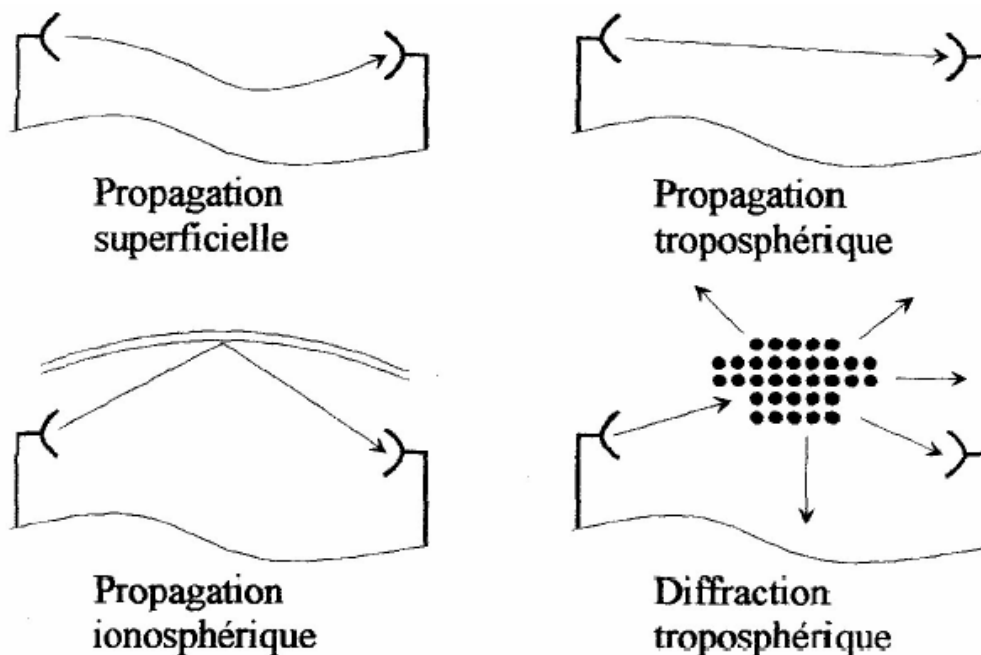


Figure 4.03 : Les quatre trajets différents que peuvent suivre une onde électromagnétique

4.5.2 Propagation ionosphérique

Les couches ionisées de l'ionosphère se comportent comme un véritable miroir pour les ondes électromagnétique. On constate des *zones d'ombre* dans lesquelles aucune réception n'est possible. A partir d'une fréquence critique, les ondes électromagnétiques ne sont plus réfléchies et s'échappent de l'atmosphère. Les ondes courtes se propagent principalement de cette manière.

4.5.2.1 Avantages

En choisissant convenablement la puissance, le type d'antenne et la fréquence, on peut atteindre pratiquement n'importe quel point de la terre.

4.5.2.2 Désavantages

Ce mode de propagation est peu fiable.

4.5.3 Propagation troposphérique

Les ondes se déplacent en ligne droite dans le vide et accomplissent la totalité de leur trajet dans la couche la plus basse de l'atmosphère. Elles sont donc influencées par la météo (pluie, brouillard, etc.) et par les obstacles naturels (montagnes, forêt, etc.) et artificiels (bâtiment, élevés).

4.6 Condition aux limites [1] [8] [10]

4.6.1 Les ondes d'espace

Les ondes d'espace, ou onde directes, se propagent en ligne droite et nécessitent une ligne de vue entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception. La surface de la terre n'est pas plane, la portée de telles ondes est donc limitée. Un calcul géométrique simple permet de conclure que la portée d'une onde émise par une antenne se trouvant à une hauteur h_E , et capté à même le sol, est égale à $\sqrt{(2h_E R)}$; R étant le rayon de la terre, soit 6 400 km. Cela équivaldrait à une portée de 36 km pour une antenne haute de 100mètres.

L'on remédie à cet inconvénient en se servant d'antennes intermédiaires, voire des satellites artificiels en orbite autour de la terre ; la portée maximale entre deux antennes disposées à altitudes respectives h_E et h_R serait (figure 4.04) :

$$d = d_E + d_R = \sqrt{(2h_E R)} + \sqrt{(2h_R R)} \quad (4.05)$$

Ce mode de propagation est utilisé en mode VHF et au-delà.

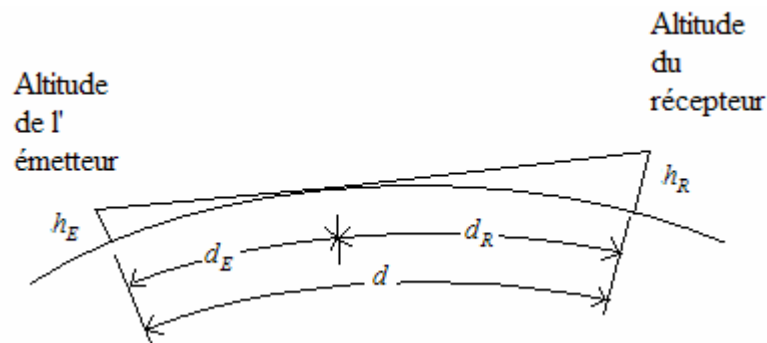


Figure 4.04 : Portée maximale d'onde directe

4.6.2 Choix de l'hyperfréquence pour les satellites

La communication via satellite se fait à des fréquences bien supérieures à la fréquence critique afin de minimiser la réfraction ; celle-ci n'est plus à craindre à partir de 100 MHz et, l'absorption atmosphérique d'onde étant négligeable jusqu'à 12 GHz environ, les fréquences utilisées seront limitées par ces deux conditions.

Du fait de la rotation de la terre, la présence des couches ionisées de l'ionosphère dans le champ magnétique terrestre crée un effet Faraday impliquant un changement de polarisation de l'onde : cet effet se fait sentir jusqu'à 1 GHz. L'on remédie à cet effet en utilisant des antennes à polarisation circulaire pouvant capter à la fois les composantes horizontales et verticales de l'onde polarisée, ou en utilisant des fréquences allant de 1 GHz à 10 GHz.

4.6.3 Rayon équivalent de la terre

Le rayon équivalent de la terre R_E permet de définir la visibilité ou la propagation rectiligne sur pour une terre fictive de rayon R . On modifie le rayon de la terre par un facteur F ($R = F.R_E$ avec $R = 6380\text{km}$).

La valeur approximative de F au sol est :

$$F = \frac{157}{157 - 7,32 \cdot \exp(5,557 \cdot 10^{-3} n_{\text{sol}})} \quad (4.06)$$

Avec n_{sol} l'indice de réfraction au sol.

Finalement, on a :

$$R = \frac{4}{3} R_E \quad (4.07)$$

4.6.4 Rayon de courbure de la trajectoire de la transmission

En idéalisant la sphéricité de la terre, on a :

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R} - \frac{1}{\rho} \quad (4.08)$$

Avec R_E : le rayon de courbure de la terre ou rayon équivalent de la terre

R : le rayon de la terre

ρ : le rayon de courbure de la trajectoire de la transmission.

$$\rho = - \frac{1}{\cos \theta_0 \frac{dn}{dz}} \quad (4.09)$$

Avec $\frac{dn}{dz}$: gradient de l'indice de réfraction n par rapport à l'altitude z .

L'angle θ_0 représente l'angle de réflexion tel que le montre la figure 4.05.

Pour qu'il n'y a pas d'autoréflexion de l'onde dans la sous-couche, $\frac{1}{n^2} \left| \frac{dn}{dl} \right| \lambda \ll 1$

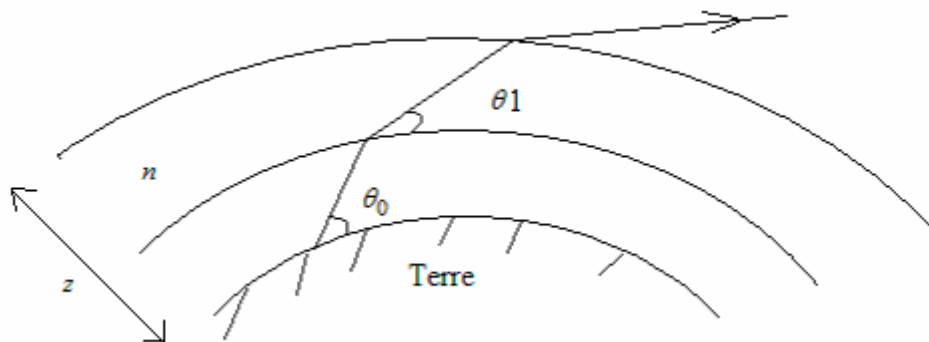


Figure 4.05 : Trajectoire de transmission d'onde

4.6.5 Propagation en visibilité directe

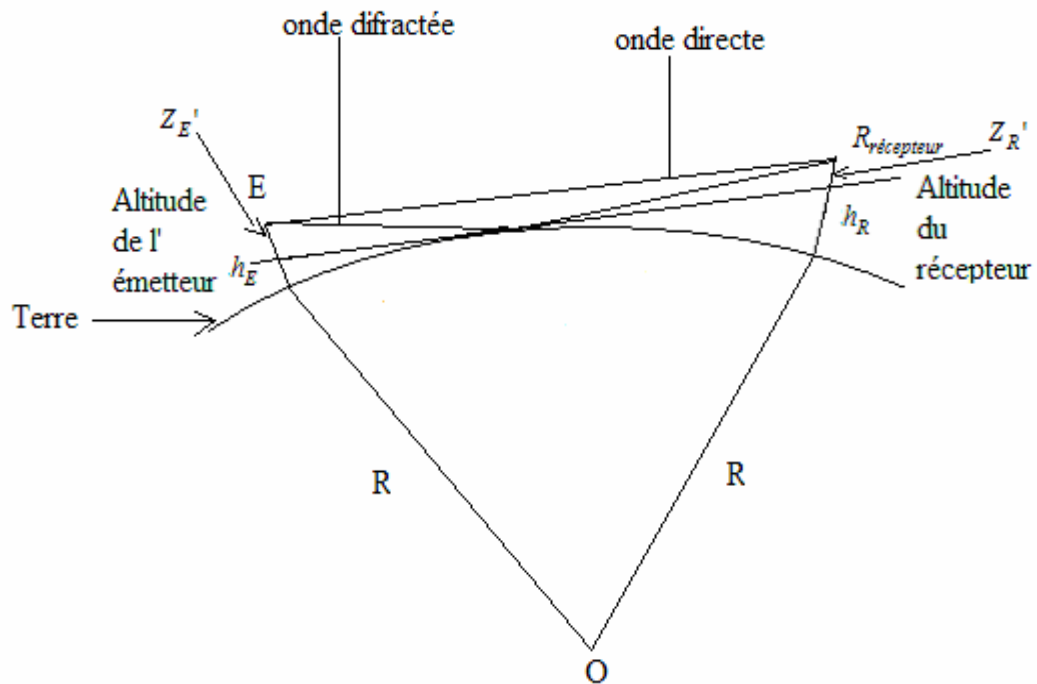


Figure 4.06 : Portée de visibilité directe

La portée de visibilité directe (figure 4.06) est (sans effet Fading) :

$$D_0 = 2R \left[\sqrt{Z_E'} + \sqrt{Z_R'} \right] \quad (4.10)$$

Z_E' et Z_R' sont des altitudes induites.

O : centre de la terre

R : rayon de la terre

En présence de la terre, la propagation en visibilité directe se passe dans l'ellipsoïde de Fresnel. Les foyers sont les points d'émission E et de réception R. AE et RB sont de même distance et de même longueur d'onde $\lambda/2$: AE=RB (figure 4.07).

Le rayon équatorial est :

$$r = \frac{\sqrt{\lambda d}}{2} \quad (4.11)$$

Le point M décrit l'ellipsoïde de Fresnel (figure 4.07). Dans l'ellipsoïde de Fresnel, il n'y a pas de distorsion de phase (ou pas d'effet Fading).

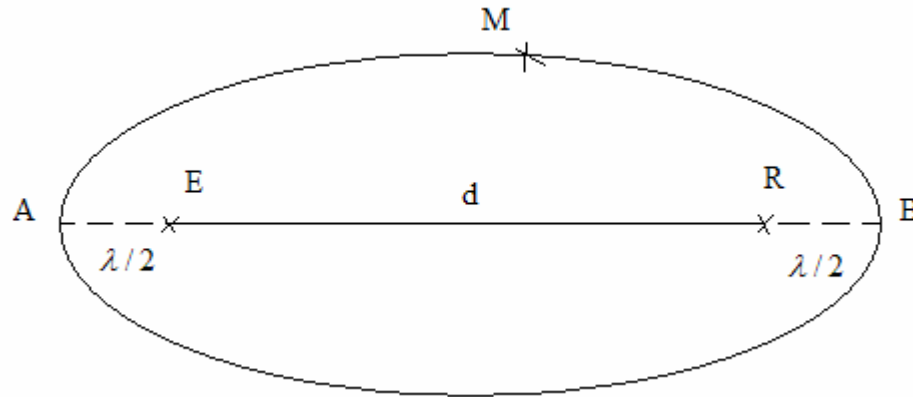


Figure 4.07 : Ellipsoïde de Fresnel

4.7 Classification des gammes d'ondes [4] [8]

L'ensemble du domaine fréquentiel des ondes électromagnétiques fait l'objet d'une subdivision conventionnelle en gammes qui correspondent en gros à des modes de propagation et des types d'utilisations très différents (télécommunications, radar, médecine, applications industrielles, etc.).

Dès le début de la radiotechnique, l'attribution des gammes d'ondes à des services et à des utilisateurs particuliers a dû faire l'objet des conventions internationales. L'encombrement des bandes de fréquences et les conditions de propagation très particulière de certaines d'entre elles nécessitent une discipline absolue sur le plan mondial.

4.8 Gammes d'ondes attribuées à la radiodiffusion [1] [4] [8]

- Ondes longues (150 à 285 kHz) dont la longueur d'onde est entre 10 et 100 km. A la distance non éloignée de l'émetteur, c'est-à-dire jusqu'à 1 000 km de l'émetteur, la convexité de la surface terrestre favorise l'existence des champs (E et H) à la réception, provoqué par diffraction. La grande onde peut se propager en onde guidée avec l'hyperéfraction ; ainsi, les sous-couches D et E peuvent réfléchir ce type d'onde. Ces sous-couches sont équivalentes à un écran idéal de grande onde.
- Ondes moyennes ou petite onde (525 à 1 605 kHz) dont la longueur d'onde est de 100 à 1 000 m. La propagation se fait essentiellement par l'onde de sol (le sol est, en effet, meilleur conducteur en onde longue donc la portée est plus grande), ou au voisinage de la terre. La réflexion sur la couche ionosphérique D est accompagnée d'une absorption plus forte de jour ; de ce fait, la transmission à grande distance est meilleure de nuit que de jour.

La nuit, la portée maximum de l'onde moyenne peut atteindre 4 000 km. La couche D de l'ionosphère lui est favorable comme écran idéal pendant le jour, et la couche E pendant la nuit.

- Onde courte (4 à 26,1Mhz) de longueur d'onde de 0,001 à 10 m. L'onde de sol prédomine à faible distance, tandis que les réflexions multiples entre le sol et l'ionosphère permettent d'atteindre (de jour surtout) de très grandes distances. Cependant, la réception peut être fortement gênée, d'une part, par des interférences entre ondes directes et réfléchies, d'autre part par les variations des conditions de propagation dans l'ionosphère. Il en résulte d'importantes fluctuations (évanouissements) du niveau du signal reçu. L'onde courte peut atteindre l'ionosphère, mais les sous-couches D et E sont absorbantes (l'énergie y est affaiblie) ; c'est la sous-couche F₂ de l'ionosphère (altitude entre 180 et 350 km en hiver et 450 km en été), qui lui est un écran favorable. Pour lutter contre l'absorption de l'onde courte, on utilise des communications par satellite (comme Telsat) ou des antennes relais (sorte de répéteurs). Les ondes longues, moyennes, et courtes sont utilisées pour la radiodiffusion nationale et internationale en modulation d'amplitude.

La courbure des directions de propagation, due à la variation d'indice de réfraction dans l'ionosphère, ne donne lieu à une réflexion que si l'indice est suffisamment oblique. Il en résulte, autour de l'émetteur, une zone de silence (figure 4.08) inaccessible par réflexion et dont le rayon croît avec la fréquence.

L'accroissement de la zone de silence impose une limite supérieure aux fréquences utilisables pour ce mode de transmission.

- Ondes ultra-courtes : 5 bandes disjointes ont été définies dans la gamme de 41 MHz à 0,96GHz, dont une réservée à la radiodiffusion sonore (en modulation de fréquence) et 4 à la télévision (en modulation à bande latérale résiduelle). La transmission exige pratiquement la visibilité directe entre émetteur et récepteur, ce qui limite l'usage des ondes ultra-courtes à la diffusion régionale.

4.9 Gammes d'ondes attribuées aux radiocommunications [4] [8]

A part la diffusion de programmes sonores ou visuels, les ondes sont fréquemment utilisées en télécommunications pour des liaisons téléphoniques et télégraphiques isolées (radiotéléphonie, radiotélégraphie) ou groupées (faisceaux hertziens), ou de la télésignalisation (recherche de personnes, appel auto, sécurité aérien, etc.). Il s'agit alors des types de services suivants :

- Liaisons point-à-point longue distance

- Liaisons fixes avec des endroits difficilement accessibles
- Liaisons mobiles terrestres, maritimes ou aériennes.

Les bandes de fréquences attribuées à ces différents services sont très nombreuses, variées et souvent très étroites.

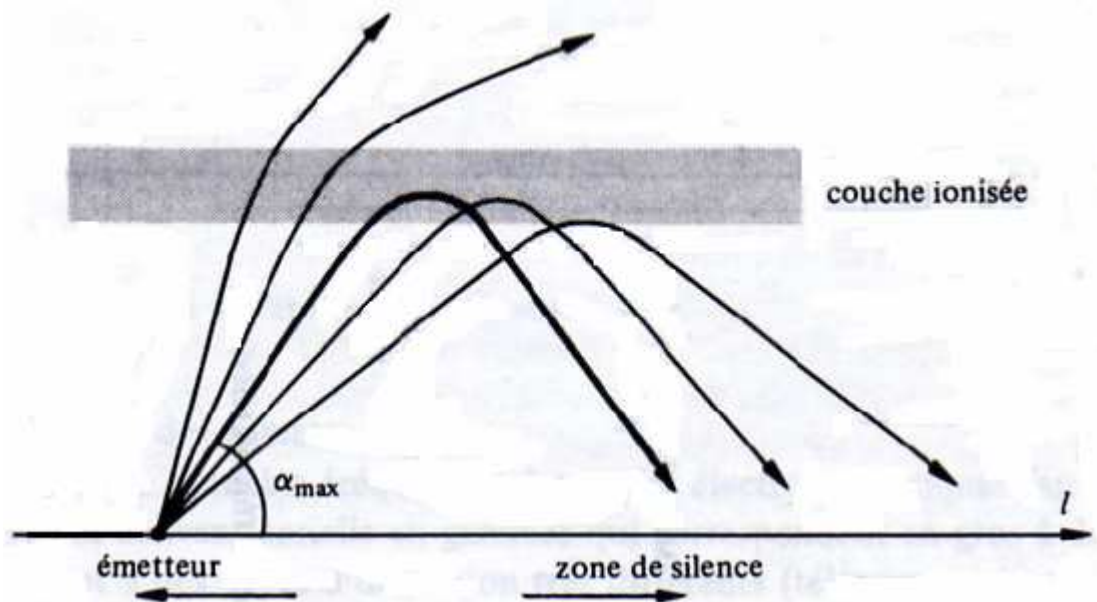


Figure 4.08 : Limite de réflexion sur l'ionosphère

Les ondes courtes ont été le premier moyen de réaliser une communication téléphonique transatlantique (1927), mais ont perdu de leur importance pour cet usage, du fait de leur qualité médiocre et instable. Elles restent encore très utilisées pour la radiotélégraphie intercontinentale.

Les bandes de 80 MHz, 160MHz et 460MHz sont réservées aux radiocommunications mobiles à courte distance (vue directe). Plus la fréquence est élevée, plus les antennes sont petites, mais les exigences de précision et de stabilité des oscillateurs sont plus sévères. D'autre part, l'effet Doppler devient sensible.

Les faisceaux hertziens qui constituent une part importante du réseau de télécommunications à grande distance, en concurrence avec les câbles coaxiaux, occupent des fréquences situées entre 250MHz et 22GHz. Les dimensions des antennes deviennent prohibitives en dessous de cette bande, alors que l'absorption due à la vapeur d'eau dans la troposphère provoque des pertes très gênantes à partir d'une dizaine de GHz. Les faisceaux hertziens exigent la visibilité directe entre émetteur et récepteur, compte tenu de la réfraction troposphérique. Des bonds terrestres de 50 à 200km sont possibles.

Lorsque des raisons géographiques ou politiques ne permettent ni la visibilité, ni l'installation des stations relais, on a quelque fois recours à un mode de propagation particulier qui repose sur un phénomène encore mal expliqué de diffusion des ondes dans les hautes régions de la troposphère. Ces zones inhomogènes deviennent le siège d'émissions secondaires diffuses, dont une très faible partie revient à la surface terrestre, en particulier et d'une manière assez aléatoire, au récepteur.

Une telle liaison, dont l'efficacité est faible et la qualité fluctuante, est appelée liaison transhorizon (figure 4.09). Sa portée maximum (environ 1 000 km) est limitée par l'altitude à laquelle la diffusion est observée.

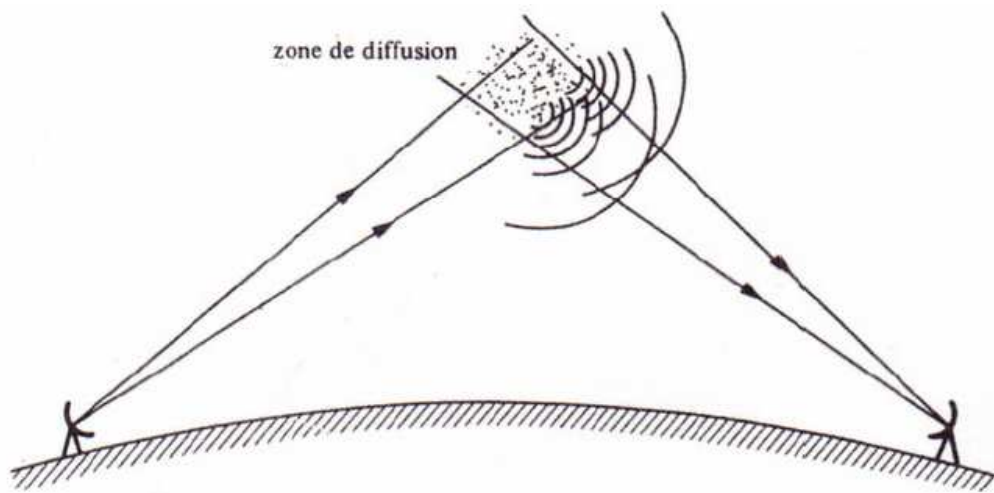


Figure 4.09 : Liaison transhorizon

Les liaisons par satellite constituent un cas très particulier de faisceaux hertziens, au-delà de l'atmosphère qu'elles doivent traverser en subissant une légère réfraction. On leur attribue des paires de fréquences à 4 et 6GHz, et, plus récemment à 11 et 14GHz, voire même 20 et 30GHz. Elles partagent en partie les mêmes bandes de fréquences que les faisceaux hertziens terrestres, ce qui peut être la source d'interférence.

4.10 Réception en diversité [4]

Lorsque les conditions de propagation sont critiques et instables (évanouissement, interférences, liaison transhorizon), on augmente la probabilité d'une qualité suffisante en doublant la liaison et en commutant à chaque instant sur le récepteur, dont la sortie donne le meilleur rapport signal sur bruit. Ce procédé est appelé réception en diversité et prend deux formes principales, combinables entre elles :

- La diversité dans l'espace qui consiste à placer deux récepteurs à une distance supérieure à environ 150 fois la longueur d'onde l'un de l'autre, dans l'idée que les conditions de propagation des ondes seront différentes sur les deux trajets ;
- La diversité en fréquence sur la même antenne, mais avec deux fréquences d'émission et un récepteur accordé sur chacune d'elles. L'écart relatif entre les deux fréquences doit être de l'ordre de 1%. Là aussi, on compte sur le fait que les fluctuations n'affecteront probablement pas les deux fréquences simultanément.

CHAPITRE 5 . NOTIONS SUR LES ANTENNES

5.1 Les antennes [4] [5] [9]

5.1.1 Définition des antennes

Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre une source et l'espace libre dans lequel cette énergie va se propager. Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur. Généralement, la source d'émission (ou le récepteur) est reliée à l'antenne par une ligne de transport d'énergie appelée couramment « feeder ». Ce feeder est fréquemment une ligne coaxiale ou un guide d'ondes.

Actuellement, les longueurs d'ondes utilisées pour les télécommunications, les aides à la navigation ou le radar s'étendent de quelques kilomètres à quelques millimètres. On conçoit que les antennes diffèrent très sensiblement d'aspect d'une extrémité à l'autre de ce spectre radioélectrique. Ces antennes, cependant, présentent des propriétés communes.

Pour les fréquences élevées (ondes centimétriques et millimétriques), il est possible d'utiliser comme antenne des projecteurs d'ondes tels que des miroirs paraboliques. Il est également possible de se servir de lentilles électromagnétiques dont le fonctionnement est très analogue à celui des lentilles optiques.

5.1.2 Source isotrope : définition et propriétés

Si une source radioélectrique rayonne une puissance totale P_E uniformément dans toutes les directions, elle est dite isotrope. Il n'existe pas d'antenne réalisable qui jouisse parfaitement de cette propriété, la source isotrope sert cependant d'élément de référence.

A la distance l_1 de la source isotrope, la puissance surfacique (par unité de surface) est uniforme et, dans un milieu sans pertes, égal à

$$P_{iso} = \frac{P_E}{4\pi l_1^2} \text{ en } W/m^2 \quad (5.01)$$

5.1.3 Caractéristique d'une antenne à l'émission

Dans le cas général, la puissance surfacique P_E à la distance l_1 d'une antenne dépend de la direction de α , défini en azimut et en élévation. On définit le gain g_α , dans la direction α par comparaison avec la source isotrope.

$$g_\alpha = \frac{P_\alpha}{P_{iso}} \text{ ou } G_\alpha = 10 \lg \frac{P_\alpha}{P_{iso}} \text{ en dB} \quad (5.02)$$

La surface (abstraite) dans l'espace définie par g_α pour toutes les directions de rayonnement autour de l'antenne constitue le diagramme de rayonnement de l'antenne (figure 5.01). La plupart des antennes possèdent un axe ou un plan de symétrie qui se trouve dans ce diagramme et en facilite la représentation plane.

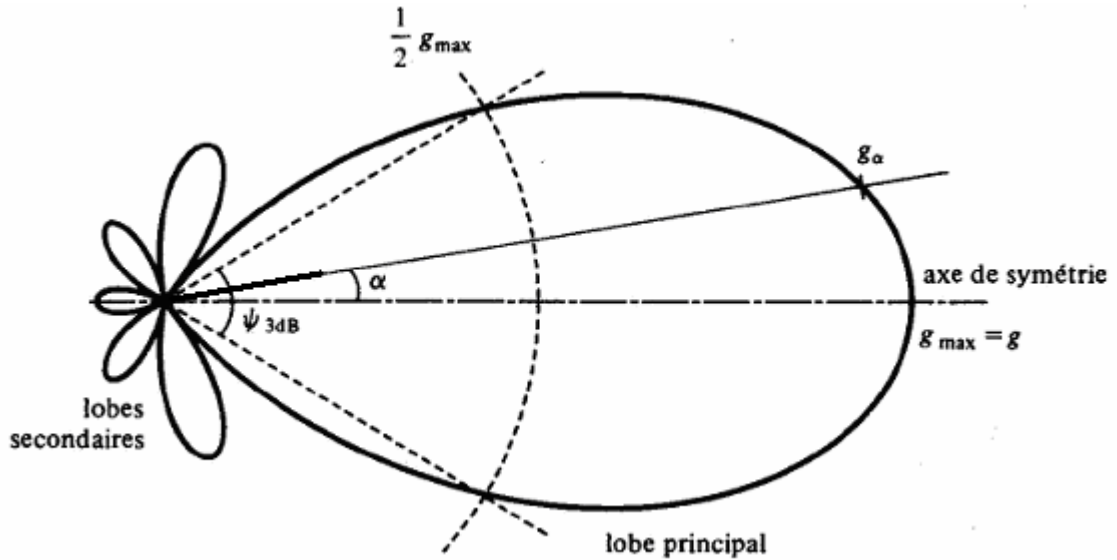


Figure 5.01 : Diagramme de rayonnement d'une antenne avec symétrie axiale (de révolution), pour un réflecteur parabolique par exemple

Dans un milieu sans pertes et pour autant que l'antenne ne dissipe pas de puissance, toute la puissance P_E fournie par l'émetteur doit se trouver répartie (inégalement, en général) sur la sphère de rayon l . Il en résulte une condition pour le diagramme de rayonnement

$$P_E = \iint_{\text{sphère}} P_\alpha dS = \iint P_{\text{iso}} g_\alpha dS = \frac{P_E}{4\pi l^2} \iint g_\alpha dS \quad (5.03)$$

En introduisant l'angle solide Ω , on a

$$d\Omega = dS / l^2 \quad (5.04)$$

et

$$\iint_{\text{sphère}} g_\alpha d\Omega = 4\pi \quad (5.05)$$

En conclusion, si le gain g_α est élevé dans une direction, il doit, pour respecter l'équation (5.05), être faible dans d'autres. Une antenne à fort gain et donc une antenne directive et réciproquement.

En réalité, la puissance effectivement rayonnée par l'antenne est inférieure à la puissance P_E que lui fournit l'émetteur, à cause des pertes dans l'antenne elle-même.

5.1.4 Caractéristiques d'une antenne à la réception

La puissance P_R , disponible à la sortie d'une antenne terminée sur son impédance caractéristique (charge adaptée), est proportionnelle à la puissance surfacique P_β , rayonnée à cet endroit par une antenne d'émission située dans la direction β par rapport à l'antenne réceptrice considérée. Le coefficient de proportionnalité, qui a la dimension d'une surface, est appelé surface effective $A_{e\beta}$ ou surface de captation dans la direction β

$$A_{e\beta} = \frac{P_R}{P_\beta} \text{ en } m^2 \quad (5.06)$$

Sa valeur maximale (direction de réception privilégiée) est la surface effective A_e ou surface de captation de l'antenne.

Le théorème de réciprocité, valable si le milieu de transmission est isotrope (c'est-à-dire si ses propriétés locales ne dépendent pas de la direction considérée), permet d'affirmer que les propriétés directives d'une antenne sont les mêmes à la réception qu'à l'émission. Le gain g_β de l'antenne dans la direction β est proportionnel à la surface effective $A_{e\beta}$ qu'elle présente à la réception dans cette direction

$$\frac{g_\beta}{A_{e\beta}} = \text{cte pour tout } \beta \quad (5.07)$$

En particulier, les directions de rayonnement maximum et de réception privilégiée coïncident. De même, le gain (maximum) G_0 et la surface effective (maximum) A_e sont liés par un coefficient de proportionnalité identique pour toutes les antennes et qui ne dépendent que de la longueur d'onde λ

$$\frac{g_\beta}{A_{e\beta}} = \frac{G_0}{A_e} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \quad (5.08)$$

Il en résulte en particulier que l'antenne isotrope, dont le gain est par définition égal à 1, a une surface effective égale à

$$A_{\text{eiso}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \text{ en m}^2 \quad (5.09)$$

5.1.5 Propriétés des antennes de grande surface

Lorsque la surface géométrique d'une antenne est très grande par rapport à λ^2 , sa surface effective A_e peut se déduire de sa surface plane perpendiculaire au rayonnement $A_{\text{rayonnement}}$ par $A_e = kA_{\text{rayonnement}}$ où k est un facteur de rendement sans dimension, qui tient compte de la non uniformité du rayonnement sur la surface, des effets d'extrémités à ses bords et des pertes dans l'antenne. Pratiquement, la valeur de k se situe vers 0,5.

En conséquence, la surface effective d'une telle antenne est indépendante de la fréquence. En revanche, d'après (5.08), son gain G_0 croît proportionnellement à f^2 .

Sous forme logarithmique, le gain augmente donc de 6 dB lorsque la fréquence double.

Dans cette catégorie tombent notamment les antennes à réflecteurs paraboliques, couramment utilisées par les faisceaux hertziens et les liaisons par satellite. Dans le cas fréquent d'un réflecteur à ouverture circulaire de diamètre D , le gain s'exprime par (voir l'équation 6.22) :

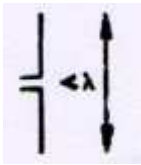
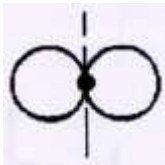
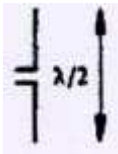
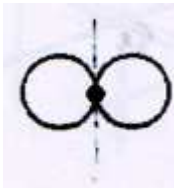
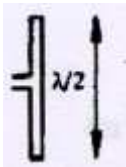
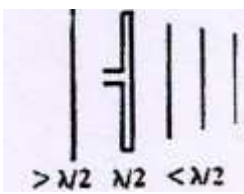
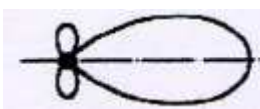
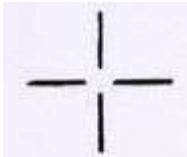
$$G_0 = k \frac{\pi D^2}{4} \frac{4\pi}{\lambda^2} = k \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (5.10)$$

Le diagramme de rayonnement présente un lobe principal très accentué et étroit ainsi que des lobes secondaires indésirables mais faibles. L'ouverture du lobe principal, définie par l'angle ψ entre les directions présentant un gain réduit de 3 dB, est donnée approximativement par la relation empirique

$$\psi_{3\text{dB}} \cong 70 \frac{\lambda}{D} \text{ en degrés} \quad (5.11)$$

5.1.6 Antennes filiformes

Il existe une très grande variété d'antennes de type filiforme (tableau 5.01), c'est-à-dire composées de fils ou de barreaux conducteurs astucieusement disposés, chacune ayant ses propres avantages au point de vue économique, directivité, encombrement, largeur de bande, etc. souvent, à l'émission surtout, ces antennes sont groupées en réseaux périodiques pour augmenter la directivité.

TYPE	FORME		DIAGRAMME DE GAIN	GAIN	UTILISATION
Dipôle (ou doublet de Hertz)				1.5 (1.8dB)	Ondes longues, moyenne et courtes
Dipôles quart d'ondes		73Ω		1.64 (2.21dB)	Ondes ultra courtes
Dipôle $\lambda/4$ replié		300Ω		1.64 (2.21dB)	Ondes ultra courtes
Yagi		<300Ω		8 à 9 dB	Réception OUC (TV) (bande étroite)
Tourniquet		70Ω			Emission omnidirectionnelle
Dièdre		130Ω		9 dB	Emission OUC
Papillon				5 dB	Emission OUC, TV

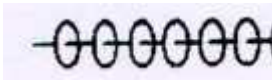
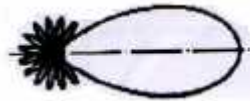
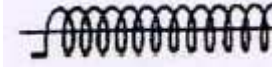
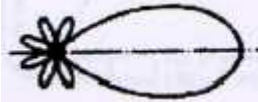
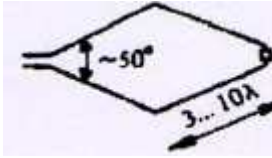
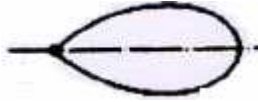
Cigare				16 dB	Faisceaux hertziens spéciaux
Hélice		90 à 220Ω			Poursuite et télécommande de satellites
Losange (rhombôidre)				15 à 22 dB	Radiotélégraphie intercontinentale (ondes courtes)

Tableau 5.01 : Quelques antennes filiformes

5.2 Transmission par ondes [5]

5.2.1 Hypothèses

On admettra par la suite que

- Le milieu est isotrope, ce qui valide le théorème de réciprocité ;
- Le milieu est sans pertes ; les pertes dues notamment à l'absorption dans la troposphère (vapeur d'eau) ne sont cependant négligeables qu'à des fréquences inférieures à environ 10GHz ;
- La transmission se fait sans obstacle, ni réflexion (visibilité directe). Il s'agit de ce que l'on désigne propagation en espace libre. Des précautions doivent être prises pour garantir que cette hypothèse soit valable.

5.2.2 Affaiblissement de la liaison

L'affaiblissement A exprime sous forme logarithmique le rapport entre la puissance émise P_E et la puissance reçue P_R à la sortie de l'antenne réceptrice adaptée

$$A = 10 \lg \frac{P_E}{P_R} \text{ en dB} \quad (5.12)$$

Si les deux antennes étaient remplacées par des sources isotropes, on aurait d'après (5.01), (5.06) et (5.09) :

$$P_{\text{Riso}} = A_{\text{eiso}} P_{\text{iso}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{P_E}{4\pi l^2} \quad (5.13)$$

Et l'affaiblissement, appelé alors affaiblissement en espace libre serait

$$A_{\text{iso}} = 20 \lg \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right) \text{ en dB} \quad (5.14)$$

Par suite d'une regrettable collision de symboles internationaux sur la même lettre A, il faut distinguer soigneusement entre

- A affaiblissement (en dB) et
- A surface effective (en m²).

La valeur de l'affaiblissement calculé par (5.14) est un minimum optimiste, dans l'hypothèse d'un milieu sans pertes. En réalité, les conditions météorologiques ou géographiques le long du trajet, de même que des interférences entre des signaux reçus par des trajets différents, peuvent augmenter sensiblement l'affaiblissement et conduire à un évanouissement momentané du signal. Dans le cas d'antennes quelconques, à diagramme de rayonnement connu et dont l'orientation est relative, la puissance reçue est

$$P_R = A_{\text{eR}\beta} g_{\text{E}\alpha} \frac{P_E}{4\pi l^2} = A_{\text{eR}\beta} A_{\text{eE}\alpha} \frac{P_E}{\lambda^2 l^2} = g_{\text{R}\beta} g_{\text{E}\alpha} \frac{\lambda^2 P_E}{(4\pi)^2 l^2} \quad (5.15)$$

Et l'affaiblissement devient

$$A = 20 \lg \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \right) - 10 \lg g_{\text{R}\beta} - 10 \lg g_{\text{E}\alpha} \text{ en dB} \quad (5.16)$$

$$A = A_{\text{iso}} - G_{\text{R}\beta} - G_{\text{E}\alpha} \text{ en dB} \quad (5.17)$$

Si, comme c'est le cas pour les faisceaux hertziens, les deux antennes sont exactement pointées l'une vers l'autre, c'est-à-dire si leurs axes de rayonnement maximum coïncident, alors

$$A = A_{\text{iso}} - G_{\text{R}} - G_{\text{E}} \quad (5.18)$$

Où G_{R} et G_{E} sont les gains respectifs des antennes de réception et d'émission (en dB).

Le gain d'une antenne est donc bien l'analogie du gain d'un amplificateur et correspond (en dB) à une diminution d'affaiblissement par rapport à une liaison entre deux antennes à rayonnement omnidirectionnel (isotrope).

5.3 Comparaison critique des milieux de transmission [1] [4]

5.3.1 Cas des liaisons point-à-point

Les câbles (à paires symétriques ou coaxiales) et les faisceaux d'ondes dirigés (faisceaux hertziens terrestres, transhorizon ou par satellite ; radiocommunication par ondes courtes) sont des milieux de transmission concurrentiels dans le réseau de télécommunications interurbain et international, quelquefois même sur le plan local.

Les avantages des câbles sont :

- Milieu de transmission stable, connu et optimisable
- Possibilité de réutilisation de la même bande de fréquence sur des paires distinctes du même câble (attention à la diaphonie, ou des signaux transmis sur une ligne et qui apparaît sur une autre ligne, si les paires sont symétriques)
- Densité et extension du réseau illimitées, sans risque d'interférence entre câbles
- Protection contre le brouillage et l'interception malveillants
- Durée d'exploitation (40 à 50ans) et fiabilité élevées, sauf panne catastrophiques (rupture ou dégâts par terrassements).

A l'avantage des faisceaux d'ondes, nous avons :

- Ils permettent des liaisons avec des endroits isolés, d'accès difficile (déserts, haute montagne, îles)
- Les équipements peuvent être transportables (liaisons temporaires, cars de reportage pour télévision)
- La construction est plus rapide, pour autant que l'infrastructure de génie civil existe déjà (tour, pylône, bâtiments)
- Les investissements ne dépendent de la distance que par paliers (si des stations relais sont nécessaires).

5.3.2 Cas des réseaux de diffusion

Les ondes se prêtent par nature à une diffusion omnidirectionnelle ou plus ou moins directive (radio, télévision). Le nombre de récepteurs est illimité et le domaine de couverture souvent très étendu, voire mondial (cas des ondes courtes).

Néanmoins, un réseau de câble peut aussi servir de moyen de diffusion d'informations, avec les avantages suivants :

- Meilleure immunité aux perturbations électromagnétiques (atmosphériques, industrielles, etc.)
- Conditions de réception optimisées
- Extension du nombre de programmes offerts
- Elimination des antennes individuelles de réception.

Dans les régions où la densité démographique est suffisante pour justifier l'investissement important que cela présente, un câble coaxial peut servir de support à plusieurs dizaines de programmes musicaux et télévisuels. Les fibres optiques ouvrent des perspectives de réalisation d'un réseau local à large bande.

5.4 Etude sur l'antenne [4] [8]

5.4.1 Onde plane

Par définition, une onde plane est une onde dont le front est un plan. Dans le cas d'une onde électromagnétique, il existe simultanément un champ électrique $\vec{E}$ et un champ magnétique $\vec{H}$. L'onde plane est une solution particulière des équations de Maxwell et que, dans ce cas, $\vec{E}$ et $\vec{H}$ sont en phase entre eux, mais orthogonaux dans l'espace et perpendiculaire à la direction de propagation (figure 5.02).

5.4.2 Les équations de Maxwell

Les équations de Maxwell sont indispensables pour l'étude théorique de rayonnement de l'antenne.

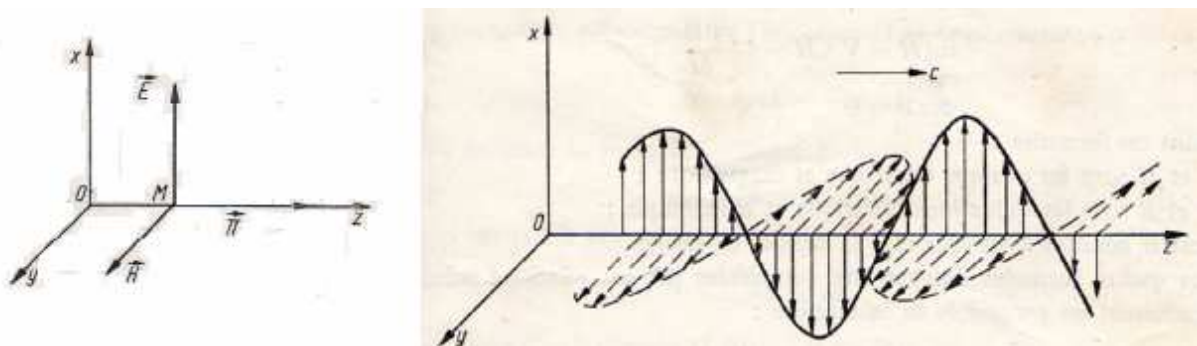


Figure 5.02 : Photographie instantanée de la variation sinusoïdale des champs

Les équations de Maxwell, qui régissent les comportements du champ électrique et du champ magnétique, sont groupées dans les quatre relations ci-dessous, écrites dans le système d'unités rationalisé :

$$\begin{aligned}\text{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{D} &= \rho \\ \text{rot} \vec{H} &= \vec{i} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{B} &= 0\end{aligned}\tag{5.19}$$

Dans ces formules :

$\vec{E}$ et $\vec{H}$ sont les champs électrique et magnétique ;

$\vec{D}$ et $\vec{B}$ sont les inductions électrique et magnétiques ;

$\vec{i}$ est le courant électrique et ρ la densité de charge.

Ces quatre formules doivent être complétées par les relations suivantes qui traduisent les propriétés de la matière :

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \vec{i} &= \sigma \vec{E}\end{aligned}\tag{5.20}$$

Où ϵ , μ et σ sont respectivement la permittivité, la perméabilité et la conductivité du milieu. Notons que ces trois relations ne sont valables que pour un milieu isotrope, s'il n'en est pas ainsi, ϵ , μ et σ deviennent des tenseurs.

La conservation de l'électricité donne :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{i} = 0\tag{5.21}$$

Habituellement, le milieu dans lequel s'effectue la propagation ne comporte ni charge, ni courant électrique, ce qui donne $\rho = \vec{i} = 0$. D'autre part, les champs considérés sont de la forme :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{j\omega t} \quad \text{ou} \quad \vec{H} = \vec{H}_0 e^{j\omega t}\tag{5.22}$$

Où

$$\omega = 2\pi f\tag{5.23}$$

ω est la pulsation du champ de fréquence f .

Dans le cas du vide, la vitesse de propagation est celle de la lumière : $v = c = 3.10^8 \text{ m/s}$ et, ϵ et μ sont égaux à ϵ_0 et μ_0 respectivement :

$$\begin{aligned}\epsilon_0 &= 8,854.10^{-12} \text{ farad / mètre} \\ \mu_0 &= 4\pi.10^{-7} \text{ henry / mètre}\end{aligned}\quad (5.24)$$

Dans un milieu caractérisé par ϵ et μ , le champ se propage à une vitesse v telle que :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (5.25)$$

Si nous considérons un milieu défini par sa constante diélectrique K_1 par rapport au vide, on a

$$\epsilon = K_1 \epsilon_0 \quad (5.26)$$

En introduisant l'indice du milieu

$$n = \sqrt{K_1} \quad (5.27)$$

on aura

$$v = \frac{c}{n} \quad (5.28)$$

Il s'ensuit que la longueur d'onde dans le milieu est liée à la longueur d'onde dans le vide :

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n} \quad (5.29)$$

Pour les diélectriques, n est toujours supérieur à l'unité, et la longueur d'onde est alors inférieure à la longueur d'onde dans le vide.

5.4.3 Le vecteur de Poynting

Il est dirigé dans le sens de propagation de l'onde électromagnétique plane. C'est le vecteur

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \wedge \vec{H} \quad (5.30)$$

Si nous considérons maintenant des champs sinusoïdaux, dans le cas général où $\vec{E}$ et $\vec{H}$ ne sont pas nécessairement en phase, le vecteur de Poynting s'écrit :

$$\vec{\Pi} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{E} \wedge \vec{H}^*) \quad (5.31)$$

Cette équation représente donc, en chaque point d'une surface S , la puissance moyenne ou réelle qui la traverse par unité de surface.

5.4.4 Potentiels de Lorentz (Potentiels retardés)

Le fait que la divergence de $\vec{B}$ soit nulle implique que $\vec{B}$ est le rotationnel d'un vecteur, dit potentiel vecteur que nous désignerons par $\vec{A}$ de sorte que :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad \text{ou} \quad \vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (5.32)$$

On a
$$\text{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (5.33)$$

Cette dernière expression indique que le vecteur entre parenthèse est le gradient d'un potentiel V scalaire. Nous aurons

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\text{grad} V \quad (5.34)$$

D'autre part,

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \quad (5.35)$$

Finalement, le groupe des équations de Maxwell pourra s'écrire

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E} = -\text{grad} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{H} = \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \\ \Delta V - \epsilon \mu \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \frac{\rho}{\epsilon} = 0 \\ \text{div} \vec{A} + \epsilon \mu \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \end{array} \right. \quad (5.36)$$

$$\Delta \vec{A} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} + \mu \vec{i} = 0 \quad (5.37)$$

Les deux premières expressions permettront de calculer le champ électrique et le champ magnétique à partir des potentiels de Lorentz scalaire et vecteur, V et $\vec{A}$, tandis que les trois dernières expressions permettront de calculer ces potentiels, qui ne sont en définitive que des intermédiaires de calcul.

Considérons un élément de volume $d\tau$ dans lequel existe une densité de charge $\rho(t)$ variant en fonction du temps, et soit un point M de l'espace, situé à une distance r de $d\tau$. Appelons v le potentiel scalaire résultant de $d\tau$, au point M .

Le laplacien de v s'écrit en fonction de r :

$$\Delta v = \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 r v}{\partial r^2} \quad (5.38)$$

S'il existait en plus de la densité de charge volumique ρ , une densité de charge surfacique σ , le potentiel serait :

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint \frac{\rho\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} d\tau + \frac{1}{4\pi\epsilon} \iint \frac{\sigma\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} ds \quad (5.39)$$

5.4.5 Formules pour le champ rayonné par l'antenne

Finalement, le champ électrique $\vec{E}$ et le champ magnétique $\vec{H}$, à une distance r de la source, sont donnés par les expressions :

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -\text{grad}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{H} &= \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \end{aligned} \quad (5.40)$$

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint \frac{\rho\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} d\tau + \frac{1}{4\pi\epsilon} \iint \frac{\sigma\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} ds \quad (5.41)$$

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint \frac{\vec{j}\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} d\tau \quad (5.42)$$

Ces formules sont à la base du calcul du champ rayonné par une antenne.

5.4.6 Diagramme de rayonnement

Considérons une antenne située en un point O et lions à ce point un trièdre de référence : une direction quelconque de l'espace est alors définie par son gisement Φ et sa colatitude θ .

Si l'antenne est une source ponctuelle, la puissance rayonnée se répartit uniformément autour de celle-ci et, par unité de surface sur une sphère de rayon R centré sur O , elle est donnée par :

$$p = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (5.43)$$

P_t est la puissance totale rayonnée.

Cette formule est équivalente aux formules (4.01) et (5.01).

Par raison de symétrie, la puissance rayonnée par une source ponctuelle sera uniformément distribuée dans l'espace et donnera naissance à une onde sphérique centrée sur le point. A une distance R de celui-ci, la puissance rayonnée par unité de surface sera la formule (5.43).

La densité de puissance par unité d'angle solide est alors :

$$p_1 = \frac{P_t}{4\pi} \quad (5.44)$$

Cependant, du fait de la structure de l'aérien et de la répartition des courants, la puissance rayonnée par une antenne, dans l'unité d'angle solide, est pratiquement une fonction de θ et de Φ (figure 5.03). Soit $P(\theta, \Phi)$ cette puissance.

Il existe toujours une direction (θ_0, Φ_0) pour laquelle $P(\theta, \Phi)$ passe par un maximum maximorum.

Considérons le rapport :

$$r(\theta, \Phi) = \frac{P(\theta, \Phi)}{P(\theta_0, \Phi_0)} \quad (5.45)$$

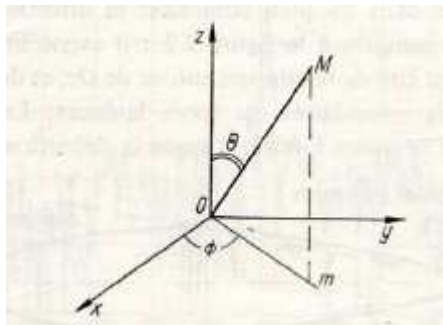


Figure 5.03 : Trièdre de référence d'un point

La valeur maximale de ce rapport est l'unité, et ses variations en fonction de θ et de Φ sont indépendantes de la distance à laquelle sont effectuées les mesures. Ces variations caractérisent donc la façon dont l'énergie rayonnée par l'antenne se répartit dans l'espace. Pour cette raison, la courbe représentant $r(\theta, \Phi)$ est appelée le « diagramme de rayonnement » de l'antenne.

Le diagramme de rayonnement dans l'espace est une surface et son relevé complet est extrêmement difficile. Il est, par ailleurs, très malaisé de le représenter et les résultats obtenus sont inutilisables. Le plus souvent, les variations de $r(\theta, \Phi)$ sont tracées en coordonnées polaires dans des plans différents, par exemple le plan xOy ($\theta = 90^\circ$) ou le plan yOz ($\Phi = 90^\circ$). Pour les

antennes utilisées en hyperfréquences, on représente fréquemment les diagrammes dans le plan E et dans le plan H .

Les systèmes rayonnants sont le plus souvent construits de façon à concentrer l'énergie dans une direction déterminée, par exemple la direction Oz . Dans ce cas, le diagramme dans un plan contenant la direction de rayonnement maximum a l'allure suivante :

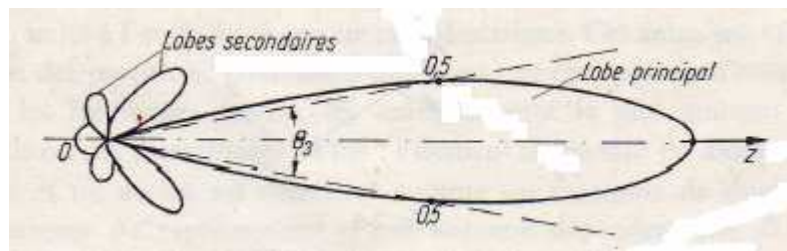


Figure 5.04 : Direction de rayonnement maximum dans un plan

Il existe un lobe principal de rayonnement, qui peut être de révolution autour de Oz , et des lobes de moindre amplitude, dits lobes secondaires ou lobes latéraux. La valeur maximale du lobe principal est toujours l'unité, d'après la définition.

Un simple examen de la figure 5.04 montre que, si les lobes secondaires sont suffisamment faibles, la quasi-totalité de la puissance est contenue entre les directions correspondant au rayonnement à demi-puissance. De ce fait, l'angle θ_3 qui correspond à ces directions, c'est-à-dire l'angle entre les directions pour lesquelles le rayonnement de l'aérien est affaibli de 3dB , est appelé « l'ouverture du diagramme de rayonnement ». On peut préciser quelque fois qu'il s'agit de l'ouverture à 3dB , pour éviter de la confondre avec l'ouverture entre les deux premiers zéros du diagramme.

Toujours dans cette même figure, les différents lobes sont séparés par des directions de rayonnement nul, mais il peut arriver que ces zéros soient remplacés par des minima plus ou moins accusés.

Pour les antennes fonctionnant en hyperfréquences, il arrive souvent que θ_3 soit très faible, par exemple inférieur à 1° . Dans ces conditions, le tracé du diagramme en coordonnées polaires perd toute précision. Les diagrammes sont alors tracés en coordonnées cartésiennes, les angles étant portés en abscisses. L'échelle des ordonnées peut être graduée en rapports de puissances, mais le plus souvent on la gradue en décibels, ce qui facilite beaucoup la lecture.

Le niveau relatif en décibels est :

$$10 \log \frac{\text{Puissance maximale}}{\text{Puissance courante}} \quad (5.46)$$

Puisque les puissances rayonnées sont proportionnelles aux carrés des champs (voir formule 5.43), on peut tracer le diagramme de rayonnement en champ en prenant la racine carrée du diagramme de puissance. Néanmoins, sauf indication contraire, c'est toujours ce dernier qui est considéré.

5.5 Gain et directivité de l'antenne [4]

5.5.1 Définition : Gain

Le gain d'une antenne dans une direction (θ, Φ) est le rapport entre la puissance rayonnée par unité d'angle solide $P(\theta, \Phi)$ dans cette direction, et la puissance qui serait rayonnée par une source isotrope alimentée avec la même puissance totale.

Si P_t est cette puissance totale, la puissance rayonnée par la source isotrope dans l'unité d'angle

$$\text{solide est : } \frac{P_t}{4\pi} \quad (5.47)$$

Donc, le gain d'une antenne dans une direction (θ, Φ) est :

$$G(\theta, \Phi) = \frac{P(\theta, \Phi)}{P_t / 4\pi} \quad (5.48)$$

$$G(\theta, \Phi) = \frac{4\pi P(\theta, \Phi)}{P_t} \quad (5.49)$$

Cette formule est équivalente à la formule (5.02).

5.5.2 Définition : directivité

Dans le cas particulier où l'antenne rayonne intégralement la puissance qu'elle reçoit :

$$P_t = \int_0^{4\pi} P(\theta, \Phi) d\Omega \quad (5.50)$$

($d\Omega$: élément d'angle solide).

Le gain ne dépend alors que de la variation $P(\theta, \Phi)$, donc du diagramme de rayonnement : on l'appelle la directivité de l'antenne $D(\theta, \Phi)$ et s'écrit :

$$D(\theta, \Phi) = \frac{4\pi P(\theta, \Phi)}{\int_0^{4\pi} P(\theta, \Phi) d\Omega} \quad (5.51)$$

Si une certaine puissance se dégrade dans l'antenne, soit du fait des pertes, soit du fait d'une mauvaise utilisation, on peut définir un rendement η par le rapport entre la puissance rayonnée P_t et la puissance d'alimentation P_a

$$\eta = \frac{P_t}{P_a} \quad (5.52)$$

Il est facile de voir que l'on a alors :

$$G(\theta, \Phi) = \eta D(\theta, \Phi) \quad (5.53)$$

Le plus souvent cependant, surtout aux fréquences élevées, $\eta \approx 1$ et l'on confond le gain et la directivité.

5.5.3 Relation entre le gain et le diagramme de rayonnement

Comme

$$P(\theta, \Phi) = r(\theta, \Phi) \cdot P(\theta_0, \Phi_0) \quad (5.54)$$

et si nous appelons $P_{\max}$ la puissance rayonnée dans la direction θ_0, Φ_0 , soit :

$$P_{\max} = P(\theta_0, \Phi_0) \quad (5.55)$$

Il vient :

$$P(\theta, \Phi) = P_{\max} r(\theta, \Phi) \quad (5.56)$$

Dans la pratique, seuls le gain et la directivité dans la direction de rayonnement maximum sont intéressants à connaître. Nous aurons donc :

$$D = \frac{4\pi P_{\max}}{\int_0 P_{\max} r(\theta, \Phi) d\Omega} \quad (5.57)$$

Ce qui donne :

$$G = \frac{4\pi\eta}{\int_0 r(\theta, \Phi) d\Omega} \quad (5.58)$$

Il est intéressant de noter une formule empirique donnant le gain d'une antenne d'après les ouvertures à 3dB des diagrammes. Si θ_E et θ_H sont respectivement ces ouvertures dans le plan E et H de l'antenne, le gain est sensiblement donné par :

$$G = \frac{25000}{\theta_E \theta_H} \quad (5.59)$$

(θ_E et θ_H en degrés).

Cette dernière formule est presque toujours vérifiée à 1dB près pour des antennes fortement directives, sous réserve qu'il n'y ait pas de pertes dans l'aérien.

5.6 Adaptation d'une antenne. Bande de fonctionnement [4] [11]

Pour qu'un feeder (ligne coaxiale ou guide d'onde) puisse transmettre à un aérien le maximum de puissance, il faut que celui-ci soit adapté, autrement dit, que le taux d'onde stationnaire (T.O.S) dans la ligne soit égal à l'unité. S'il n'en est pas ainsi, une partie de la puissance incidente est re-rayonnée quand l'antenne travaille en réception, ce qui va correspondre évidemment à une diminution du gain (ou de la surface d'absorption).

L'énergie transmise au feeder est :

$$W_r = W_0 (1 - |\Gamma|^2) \quad (5.60)$$

W_0 est l'énergie incidente.

A l'émission, il existe un certain coefficient de réflexion Γ .

Par cette dernière formule, le gain G par la présence de T.O.S sera lié au gain G_0 correspondant à un T.O.S unité, par la relation :

$$G = G_0 (1 - |\Gamma|^2) \quad (5.61)$$

On aura ainsi une perte de gain de 1dB pour un T.O.S de 2,7.

Ceci peut être acceptable dans certains cas, mais si l'antenne travaille en émission, la présence de T.O.S. risque de gêner l'adaptation de l'émetteur au feeder ou de perturber le fonctionnement de la source de puissance. Dans ces conditions on devra limiter la bande de fonctionnement de l'antenne aux fréquences pour lesquelles le T.O.S. ne dépasse pas la valeur compatible avec le fonctionnement de l'émetteur. Généralement, la variation du T.O.S. d'une antenne en fonction de la fréquence a l'allure indiquée à la figure 5.05 : si le T.O.S. maximal admissible est par exemple de 1,5, la gamme de fonctionnement de l'aérien est comprise entre les fréquences f_1 et f_2 .

Il existe cependant d'autres considérations qui peuvent limiter cette bande d'utilisation : ce sera par exemple l'augmentation prohibitive du niveau des lobes secondaires ou la diminution trop importante du gain, ou encore des déformations inadmissibles du lobe principal de rayonnement.

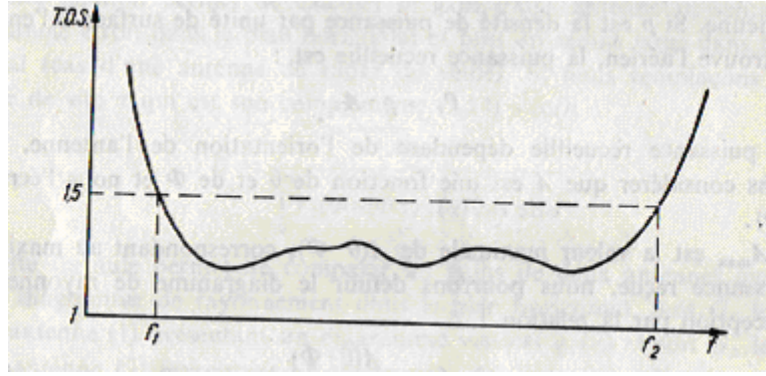


Figure 5.05 : Variation du T.O.S. d'une antenne en fonction de la fréquence

5.7 Résistance de rayonnement [4]

Une antenne d'émission rayonne de l'énergie réelle ; elle pourra donc, dans une certaine mesure, être assimilée à une résistance, et, si I_M est le courant efficace en un point M d'une antenne et P_r la puissance totale rayonnée, la résistance de rayonnement de l'antenne au point M sera donnée par la loi d'Ohm :

$$R_M = \frac{P_t}{I_M^2} \quad (5.62)$$

En général, le courant varie tout le long de l'antenne et il est commode de considérer la résistance de rayonnement ramenée au maximum de courant, c'est-à-dire au ventre de courant dans le cas où l'antenne est une ligne. Si I_0 est ce courant maximal, la résistance de rayonnement ramenée au ventre de courant est :

$$R_0 = \frac{P_t}{I_0^2} \quad (5.63)$$

Mais d'après (5.50) :

$$P_t = \int P(\theta, \phi) d\Omega \quad (5.64)$$

En définissant les éléments d'angle solide, nous trouvons immédiatement :

$$R_0 = \frac{I}{I_0^2} \int_0^{4\pi} P(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (5.65)$$

soit :

$$R_0 = \frac{P_{\max}}{I_0^2} \int_0^{4\pi} r(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (5.66)$$

Tout comme le gain, la résistance de rayonnement est liée au diagramme et peut être calculée quand on connaît celui-ci.

La notion de résistance de rayonnement n'est utilisée qu'en HF, pour les antennes à fils. Ces derniers présentent eux-mêmes une certaine résistance ohmique qui, ramenée au ventre d'intensité, donne une résistance R_j correspondant à une perte par effet Joule :

$$P_j = R_j I_0^2 \quad (5.67)$$

La puissance d'alimentation de l'antenne doit donc être :

$$P_a = P_t + P_j \quad (5.68)$$

Ce qui donne, avec (5.63) et (5.67) un rendement

$$\eta = \frac{R_0}{R_0 + R_j} \quad (5.69)$$

Pour des antennes fonctionnant sur des ondes très longues, ce rendement est souvent faible. Il faut ainsi augmenter la puissance d'émission jusqu'à un rendement suffisant.

CHAPITRE 6 . GUIDE D'ONDE RECTANGULAIRE

6.1 Fréquence critique dans un guide d'onde rectangulaire [8]

En général, la longueur d'onde Λ dans le résonateur volumineux dépend de la longueur d'onde λ fournie par le générateur, λ est nécessaire pour la transmission dans l'espace à une propagation à visibilité directe.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_0^2}}} \quad (6.01)$$

Les résonateurs volumineux sont réglables. Il faut régler la longueur d'onde critique λ_0 pour que

$$\frac{\lambda^2}{\lambda_0^2} \text{ tend vers } 0, \text{ ainsi} \quad \Lambda \approx \lambda \quad (6.02)$$

Ce sont en fait des guides d'ondes à longueur finie. Ils servent à conduire les ondes de l'hyperfréquence.

En particulier, pour les diffusions par satellite, il est nécessaire de traverser des couches de l'atmosphère. La fréquence critique f_0 du résonateur volumineux utilisé par l'antenne d'émission vers le satellite doit être supérieure à la fréquence critique f_{couche} de la couche supérieure à traverser.

$$f_0 > f_{\text{couche}} \quad (6.03)$$

A la fréquence critique, l'onde est stationnaire.

En prenant le cas d'une guide d'onde rectangulaire finie (figure 6.01) comme résonateur volumineux, on obtient les équations suivantes :

$$f_0 = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} + \frac{p^2}{l^2}} \quad (6.04)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (6.05)$$

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} + \frac{p^2}{l^2}}} \quad (6.06)$$

Avec $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$, célérité de la lumière se propageant dans le vide.

Il existe plusieurs sortes d'ondes E et d'ondes H suivant les valeurs de m, n et p : E_{mnp} et H_{mnp} .

a, l et b déterminent les dimensions du guide d'onde, avec l sa longueur (figure 6.01).

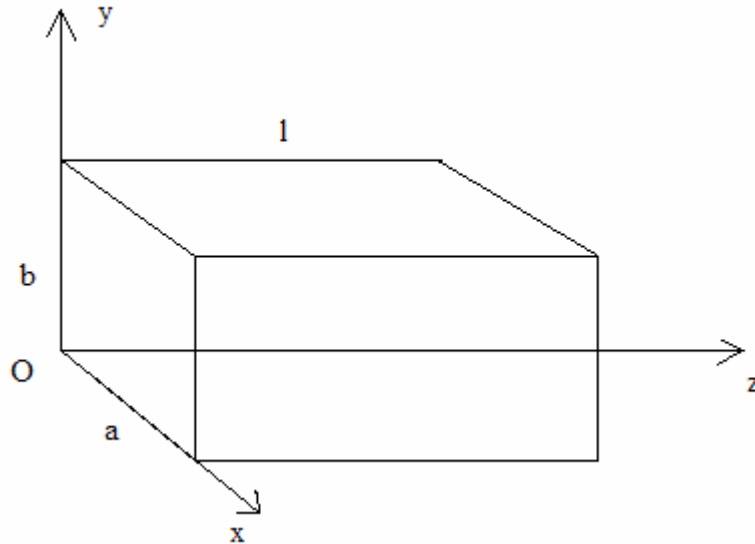


Figure 6.01 : Guide d'onde rectangulaire finie

6.2 Impédance d'onde dans le guide d'onde rectangulaire de longueur infinie [8]

Les ondes sont progressives dans le guide :

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (6.07)$$

γ est la constante de propagation ou constante de transmission.

Les composantes des ondes E et H dépendent de leur composante suivant l'axe (Oz).

$$E_{mz} = E_0 \cdot \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (6.08)$$

$$H_{mz} = H_0 \cdot \cos \frac{m\pi x}{a} \cdot \cos \frac{n\pi y}{b} \quad (6.09)$$

Ainsi,

$$\begin{aligned} E_{mx} &= -\frac{j2\pi}{\Lambda \cdot K^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} E_{mz} \\ H_{my} &= \frac{j\omega\epsilon}{\gamma} \cdot E_{mx} \end{aligned} \quad (6.10)$$

Avec
$$K = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (6.11)$$

L'impédance d'onde dans le guide est :

$$Z_{\text{onde}} = \frac{E_x}{H_y} \quad (6.12)$$

$$Z_{\text{onde}} = \frac{j\omega\epsilon}{\gamma} \quad (6.13)$$

6.3 Impédance d'onde dans le guide d'onde rectangulaire de longueur finie [4] [8]

Les composantes des ondes E et H suivant l'axe (Oz) sont :

$$\begin{aligned} E_{mz} &= E_0 \cdot \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b} \cdot \cos \frac{p\pi z}{l} \\ H_{mz} &= H_0 \cdot \cos \frac{m\pi x}{a} \cdot \cos \frac{n\pi y}{b} \cdot \sin \frac{p\pi z}{l} \end{aligned} \quad (6.14)$$

De même que pour les guides d'onde de longueur infinie, les composantes de E et H suivant les axes (Ox) et (Oy) dépendent de leur composante suivant l'axe (Oz).

$$\begin{aligned} E_{mx} &= -\frac{j2\pi}{\Lambda K^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} E_{mz} \\ H_{my} &= \frac{j\omega\epsilon}{\gamma} \cdot E_{mx} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Avec
$$K = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2 \quad (6.16)$$

Par les mêmes formules, on obtient la même impédance d'onde :

$$Z_{\text{onde}} = \frac{E_{mx}}{H_{my}} = \frac{j\omega\epsilon}{\gamma} \quad (6.17)$$

6.4 Puissance électromagnétique dans le guide d'onde rectangulaire [8]

$$P' = \frac{H_{my}^2}{2} \cdot Z_{\text{onde}} \int_0^a \int_0^b dx dy = \frac{E_{mx}^2}{2 \cdot Z_{\text{onde}}} \int_0^a \int_0^b dx dy \quad (6.18)$$

6.5 Rapport d'onde stationnaire [11]

Le champ magnétique sur n'importe quel point d'une ligne d'énergie, comme le guide d'onde, est la somme de deux ondes se déplaçant dans des directions opposées. Lorsqu'une onde continue dite d'incidence rencontre une discontinuité sur la ligne de transport d'énergie, une portion en est

renvoyée en sens contraire le long de la ligne. Normalement, la charge est alimentée en radiofréquence, pour qu'elle ne soit pénétrée par un retour d'énergie. Souvent, l'effet de réflexion est évité. Mais si une réflexion a lieu, les ondes d'incidence et de renvoi se renforcent en certains endroits mais s'annulent mutuellement en d'autres. L'image stationnaire d'une plus petite ou plus grande amplitude est appelée une onde stationnaire. Le rapport entre la plus grande et la plus petite amplitude est le rapport d'ondes stationnaires.

$$\tau = \frac{1 + |\Gamma_R|}{1 - |\Gamma_R|} \quad (6.19)$$

Avec Γ_R est le coefficient de réflexion :

$$\Gamma_R = \frac{\text{Onde réfléchie}}{\text{Onde incidente}} \quad (6.20)$$

Dans le cas général,

$$-1 \leq \Gamma_R \leq 1 \quad (6.21)$$

6.6 Une étude simple sur une antenne parabolique [5] [9]

Dans la pratique, grâce aux résonateurs volumineux, les ondes de l'hyperfréquence se propagent vers le réflecteur de l'antenne à forte concentration. L'antenne d'émission les diffuse alors telles qu'elles pour éviter l'absorption des hydrométéores.

Pour le cas d'une antenne parabolique, le réflecteur transforme une onde sphérique en onde plane. On ne peut cependant pas obtenir une transformation totale : il faudrait pour cela un réflecteur de diamètre D infini.

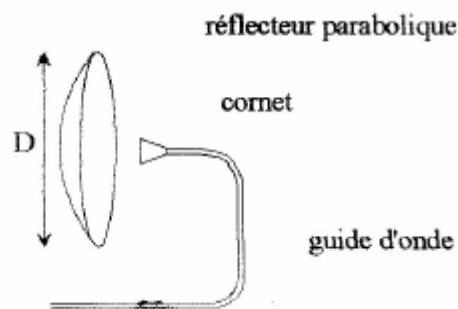


Figure 6.02 : Antenne parabolique de type ouverture

L'antenne parabolique est constituée d'un cornet et d'un réflecteur parabolique (figure 6.02).

Le gain maximal G_0 d'une telle antenne est le suivant :

$$G_0 = k. \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (6.22)$$

Où k est un paramètre variant de 0,5 à 0,8.

La surface équivalente est alors :

$$A_{eq} = k. \pi. \frac{D^2}{4} \quad (6.23)$$

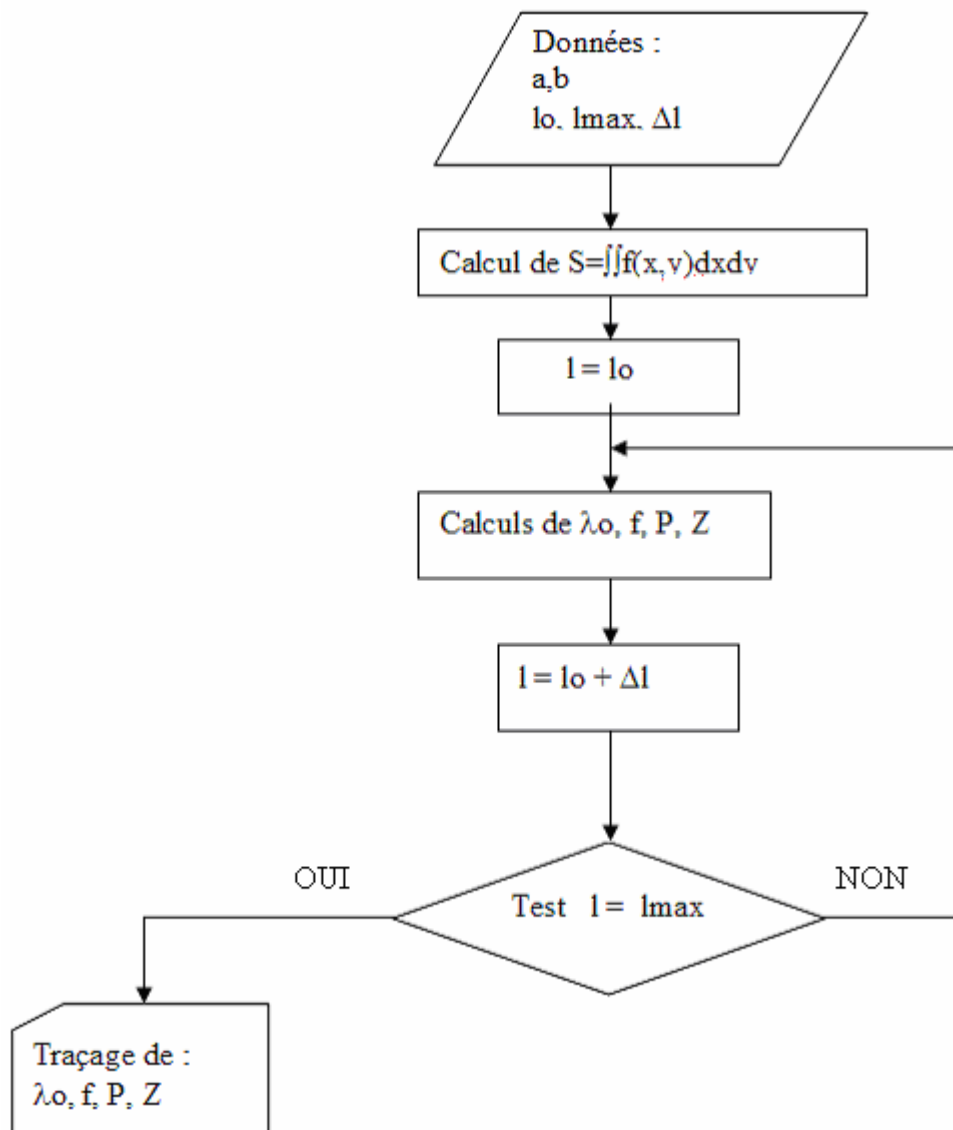
L'angle d'ouverture ψ à -3dB est approximé par l'équation 5.11 ($\psi = 70. \frac{\lambda}{D}$).

CHAPITRE 7 . SIMULATION SOUS MATLAB

Les ondes de l'hyperfréquence sont mieux protégées contre les bruits extérieurs comme les bruits atmosphériques dans les guides d'ondes ou dans les câbles coaxiaux.

Le guide d'onde rectangulaire en est un exemple de ces guides. Ainsi, pour ce chapitre, une simulation sous MATLAB permettra de définir quelques caractéristiques des ondes centimétriques de l'hyperfréquence dans un guide d'onde rectangulaire (figure 6.01).

7.1 Organigramme



Le code source du programme est donné dans l'annexe.

7.2 La page d'accueil

La page d'accueil le thème de cet ouvrage (figure 7.01) permet de lancer ou de quitter la simulation.



Figure 7.01 : Page d'accueil

Pour sortir de la page d'accueil, cliquer sur « Quitter ».

Un click sur « Simulation » permet de lancer la simulation et la fenêtre « Menu » s'ouvre.

Cette fenêtre (figure 7.02) permet de sélectionner le type de graphe que l'on veut visualiser :

La longueur d'onde critique de l'onde dans le guide

La fréquence critique de l'onde dans le guide

- La puissance électromagnétique dans le guide
- L'impédance de l'onde dans le guide.

Une fois le choix fixé, il faut cliquer sur « Lancer ».

Le bouton Accueil permet de retourner dans la fenêtre de l'accueil.

Par la suite, les dimensions de a , b et les modes m,n,p seront toujours les mêmes pour démontrer le lien entre les équations.

7.3 La longueur d'onde critique

La figure 7.03 représente la fenêtre qui permet de représenter la longueur d'onde critique dans un guide d'onde.

Il serait préférable d'entrer des valeurs entre 0 et 9. Seulement, les modes m et n ne peuvent pas être nul en même temps. La courbe est tracée selon la formule (6.06).

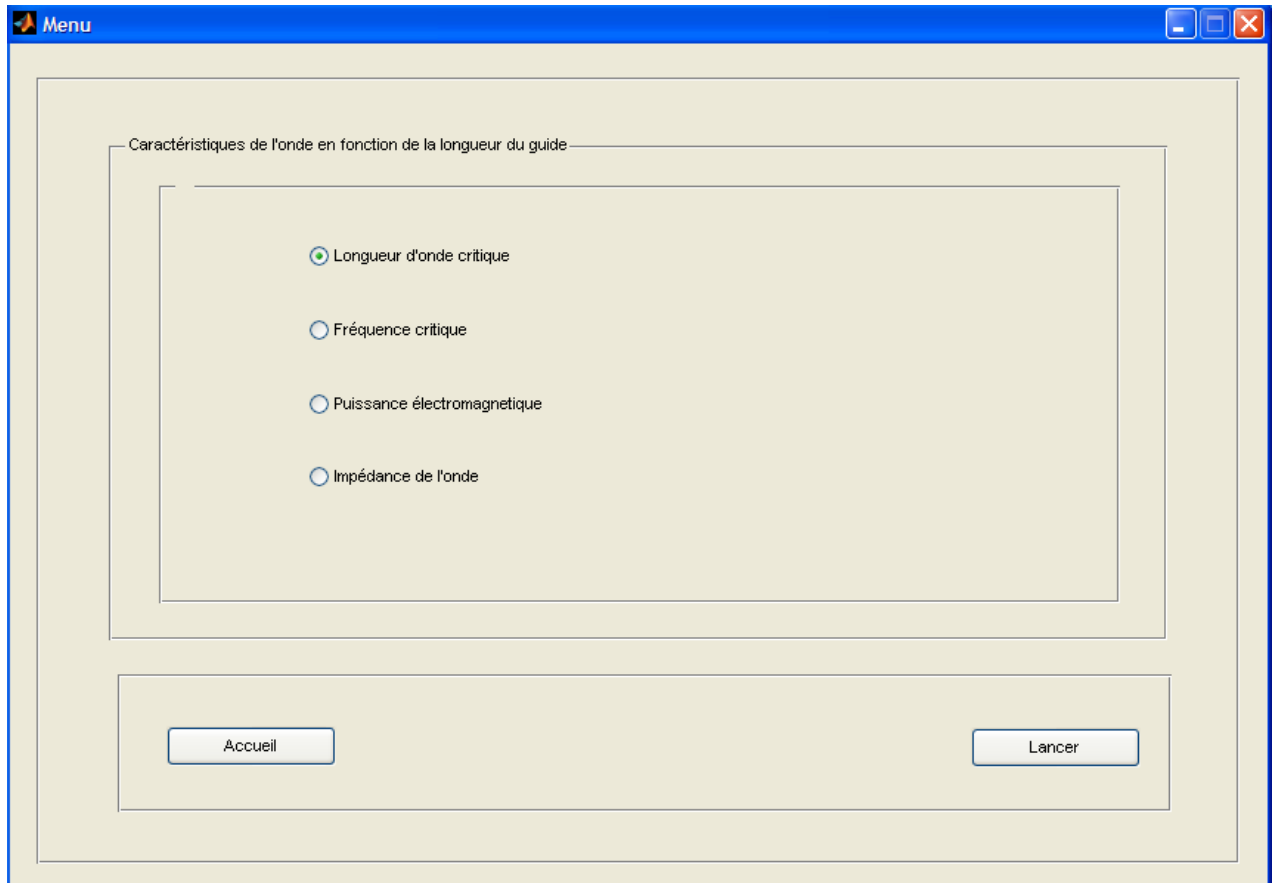


Figure 7.02 : Menu

On peut remarquer qu'il n'est pas avantageux d'utiliser un guide d'onde de longueur supérieure à 30 cm car la longueur d'onde critique reste presque constante au-delà de cette longueur. Les dimensions et les modes peuvent être changés et donnera une courbe qui leur correspond.

Le bouton « Retour » permet de retourner dans la fenêtre du menu. Le bouton « Quitter » sort de la simulation. Après avoir entré le choix des dimensions et le choix des modes, il faut cliquer sur le bouton « OK » et la courbe de la figure 7.03 est affichée.

Pour l'onde fondamentale, c'est-à-dire que λ_0 est maximale, les dimensions du guide sont minimales.

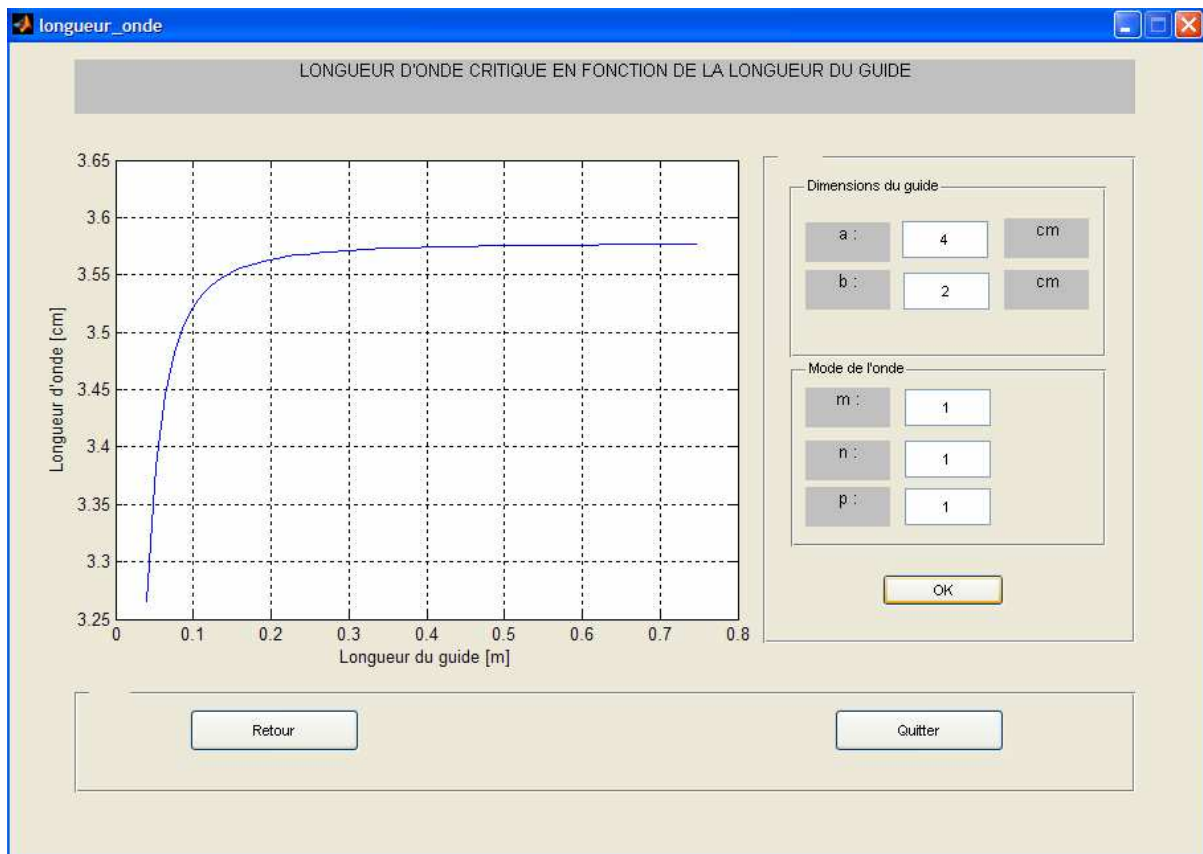


Figure 7.03 : Fenêtre de la longueur d'onde critique

La fréquence critique de l'onde

Pour faciliter l'utilisation du logiciel, la manipulation du logiciel est la même que pour la fenêtre de la fréquence critique de l'onde dans le guide (figure 7.04).

En utilisant la formule (6.04), la même remarque que celle de la longueur d'onde est constatée.

7.4 La puissance électromagnétique dans le guide

La figure 7.05 montre la fenêtre de la puissance électromagnétique dans le guide. Le même principe d'utilisation que les deux fenêtres précédentes se présente.

La formule 6.08 détermine la puissance.

Comme les mêmes conclusions sont constatées dans ce paragraphe, toutes les formules sont bien liées.

7.5 Impédance d'onde

Le graphe de l'impédance d'onde sera représenté sur la fenêtre de la puissance d'onde (figure 7.06).

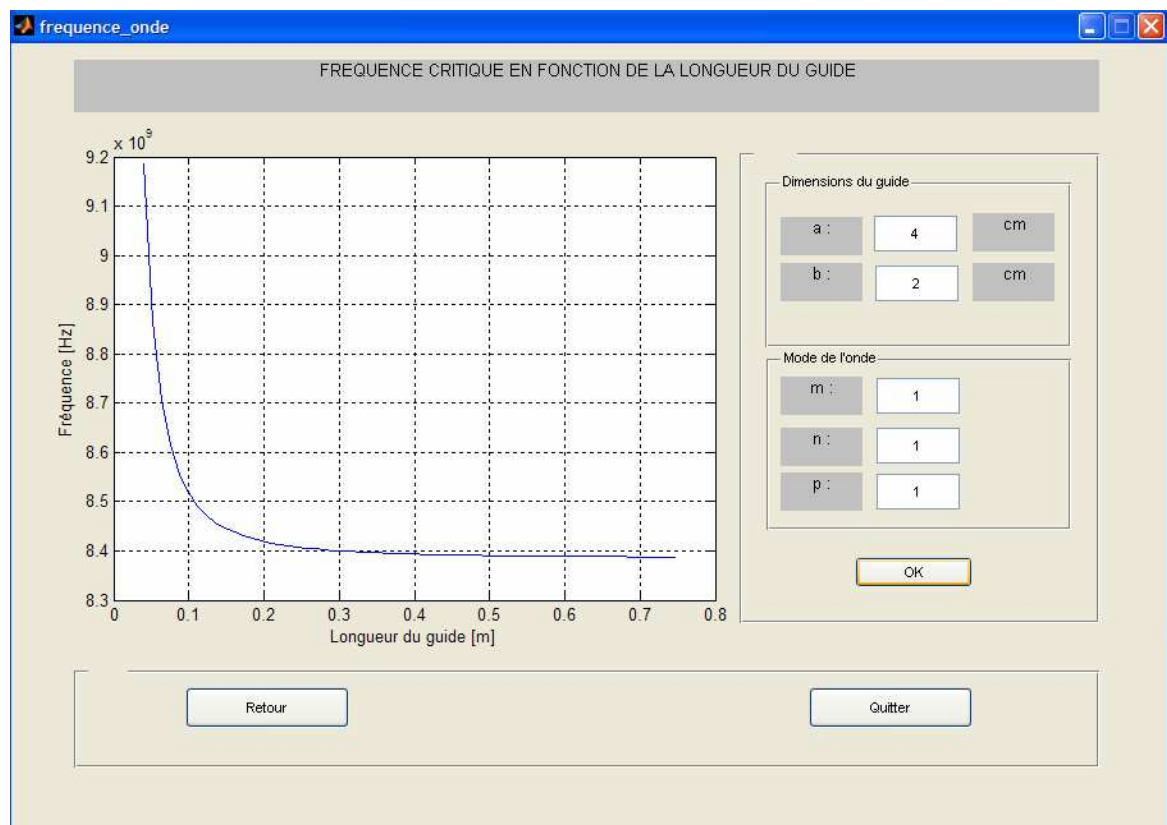


Figure 7.04 : Fenêtre de la fréquence critique de l'onde

Au même principe d'utilisation que les trois fenêtres précédentes s'ajoute une entrée de la valeur de λ , avec la condition que λ est inférieure à la longueur d'onde critique pour une onde progressive dans le guide.

Pour λ supérieur à la fréquence critique, l'onde sera stationnaire physiquement. L'onde sera réfléchiée pour une égalité entre ces deux paramètres.

La formule de l'impédance d'onde est donnée par l'équation 6.17.

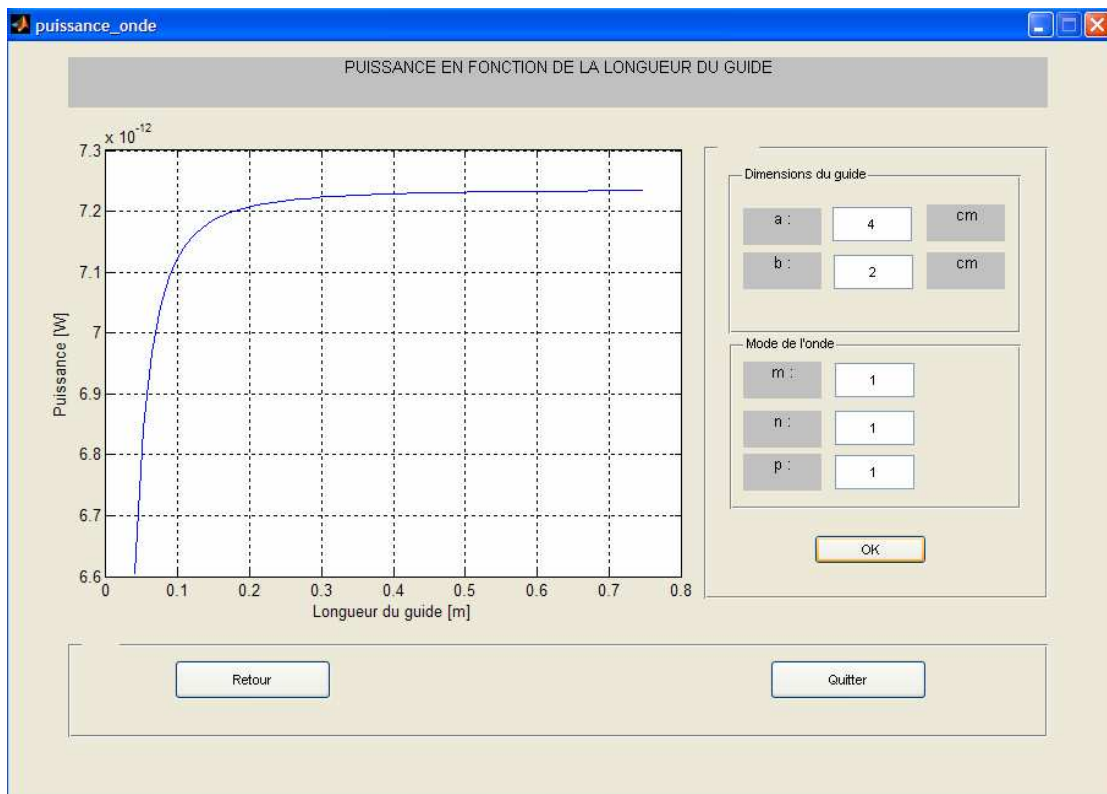


Figure 7.05 : Fenêtre de la puissance électromagnétique dans le guide

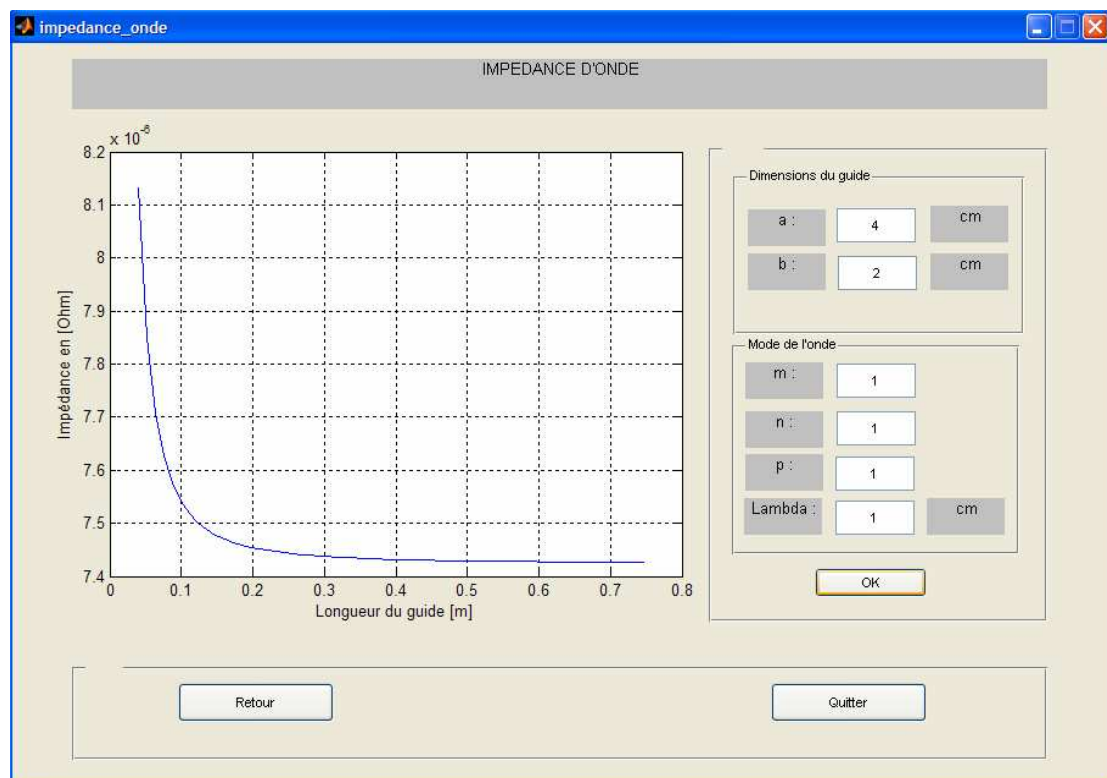


Figure 7.06 : Fenêtre de l'impédance d'onde

CONCLUSION GENERALE

La télécommunication consiste à transmettre des informations entre deux points quelconques. Les principaux moyens techniques utilisés sont de nature électromagnétique. Les grands problèmes à résoudre concernent la fidélité et la fiabilité du système, et l'éternel rapport qualité-prix est un point à ne pas négliger. Si les ondes courtes sont encore très utilisées pour la radiotélégraphie intercontinentale, les bandes de 80 MHz, 160 MHz et 460 MHz sont réservées aux radiocommunications mobiles à courtes distances. Notons que plus la fréquence est élevée, plus les antennes sont petites mais en contrepartie, l'effet Doppler devient sensible.

Pour les réseaux à grande distance, les faisceaux hertziens qui utilisent l'hyperfréquence sont incontournables, tant pour les stations terrestres que pour les liaisons par satellite. Ce type d'ondes exige la visibilité directe entre émetteur et récepteur, compte tenu de la réfraction troposphérique.

Des bonds (trajet entre un émetteur et un récepteur) de 50 à 200 km sont possibles. Cependant les conditions de propagation (distance, visibilité) obligent souvent à diviser une liaison en plusieurs bonds séparés par des stations relais qui reçoivent le signal hyperfréquence, l'amplifient et le réémettent en direction de la station suivante.

Les faisceaux hertziens terrestres utilisent des antennes à réflecteur parabolique. Leur surface est une portion de paraboloïde dont le foyer est occupé par la source rayonnante, généralement une antenne-cornet, à l'extrémité d'un guide d'ondes. L'onde sphérique issue du cornet est ainsi transformée en une onde plane. Par rapport à un faisceau hertzien terrestre, conçu selon les mêmes principes, la liaison par satellite est confrontée à des conditions plus défavorables :

- la longueur du bond est de 36 000 km à 41 000 km au lieu de 50 km ;
- la puissance d'émission à partir du satellite est limitée ;
- l'antenne du satellite a un gain modeste (environ 20 dB) si elle doit couvrir toute la partie visible de la Terre.

En revanche, la liaison par satellite tire parti des circonstances favorables suivantes :

- la marge pour les évanouissements peut être réduite, car la troposphère est traversée obliquement et non horizontalement ;
- une distance qui exigerait plusieurs dizaines de bonds en faisceaux terrestres est couverte par un seul bond avec la liaison par satellite.

Les guides d'ondes sont nécessaires à la transmission de l'hyperfréquence d'une source vers la charge.

ANNEXE 1 : DEMONSTRATION DES EXPRESSIONS [8] [24]

A.1.1 Guide d'onde rectangulaire

A.1.1.1 L'impédance d'onde

A.1.1.1.1 Grand lambda

C'est la longueur d'onde réglable (formule 6.01) dans le guide d'onde. Comme le guide reçoit une charge excitant les ondes électromagnétiques, il permettra ainsi de varier la longueur d'onde pour avoir une longueur d'onde critique pour respecter la condition de la formule 6.02.

$$\Lambda = \frac{\frac{c}{f}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\frac{c}{f}}{\frac{c}{f_0}}\right)^2}}$$

$$\Lambda = \frac{c}{\sqrt{f^2 - f_0^2}}$$

A.1.1.1.2 Formule

En se référant à la formule 6.05,

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ avec } \omega = 2\pi f \text{ ainsi que } \epsilon = K_1 \epsilon_0, \text{ on obtiendra } Z = f \cdot K_1 \cdot \epsilon \cdot \Lambda$$

K_1 est la constante diélectrique. Si K_1 est égale à 1,

$$\epsilon = \epsilon_0.$$

Finalement, l'impédance d'onde est

$$Z = f \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{c}{\sqrt{f^2 - f_0^2}}$$

La condition pour une onde progressive est que $f > f_0$

A.1.1.2 La puissance électromagnétique

A.1.1.2.1 Expression littérale

Par la formule 6.18, on obtiendra

$$P = \frac{j\omega\epsilon}{2\gamma} (E_{mx})^2 \int_0^a \int_0^b dx dy.$$

En s'aidant des formules du paragraphe 6.1 et de la formule de l'impédance d'onde

$$P = \frac{-j2\pi\epsilon_0 f K_1 E_0}{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2} \cdot \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \cos\left(\frac{p\pi z}{l}\right) \int_0^a \int_0^b dx dy$$

A.1.1.2.2 Module

$$P = \frac{2\pi\epsilon_0 f K_1 E_0}{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2} \cdot \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \cos\left(\frac{p\pi z}{l}\right) \int_0^a \int_0^b dx dy$$

x, y, z sont les coordonnées de l'onde à étudier.

E_0 étant l'amplitude du mode du champ électrique sur le point de coordonnées (x,y,z).

A.1.2 Guide d'onde circulaire

A.1.2.1 Onde E

L'onde E est définie par E_{nm} ; (TM_{nm})

$$E_{mz} = E_0 J_n(Kr) \cos n\alpha \implies E_z = E_{mz} e^{j(\omega t - \gamma z)}$$

$$K = \frac{B_{nm}}{r'} \quad \lambda_0 = \frac{2\pi}{K} = \frac{2\pi r'}{B_{nm}}$$

$$\gamma = k \sqrt{1 - \frac{f_o^2}{f^2}} = k \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_o^2}}$$

$$k^2 = \epsilon \mu \omega^2 \implies k = \omega \sqrt{\epsilon \mu} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

γ est la constante de propagation

n = ordre de la fonction de Bessel

m = rang de la racine de $J_n(Kr)$

B_{nm} est la racine de $J_n(KR)=0$

A.1.2.2 Onde H

L'onde H est définie par H_{nm} ; (TE_{nm})

$$E_{mz} = H_0 I_n(Kr)_{\sin}^{\cos} n\alpha \implies H_z = H_{mz} e^{j(\omega t - \gamma z)}$$

Anm est la racine de $J_n(Kr')=0$

$$K = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{A_{nm}}{r'}$$

A.1.2.3 Fonction de Bessel

La fonction de Bessel est de l'ordre $n \in \mathbb{N}$

Si $x \ll 1$

$$I_n(x) \cong \frac{x^n}{n! 2^n}$$

$$N_n(x) \cong -\frac{(n-1)!}{\pi} \left(\frac{2}{x}\right)^n$$

$$N_0(x) \cong -\frac{2}{\pi} \ln\left(\frac{2}{\gamma x}\right) \quad \text{avec } x = (Kr) \text{ et } r \in [0, r']$$

$$\gamma = 1.781...$$

Si $x \gg 1$

$$J_n(x) \text{ tend vers } \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos\left[x - \frac{\pi}{2}\left(n + \frac{1}{2}\right)\right]$$

$$N_n(x) \text{ tend vers } \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \sin\left[x - \frac{\pi}{2}\left(n + \frac{1}{2}\right)\right]$$

$$x = (Kr)$$

A.1.2.4 Les impédances

$$Z_H = \frac{Z}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_o^2}}}$$

$$Z_E = Z \sqrt{1 - \frac{\lambda_o^2}{\lambda^2}} \quad \text{avec} \quad Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

$$Z_c \cong \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{d}{r'}$$

d est la longueur du guide et r' le rayon du guide.

Avec Z l'impédance du système et Z_c l'impédance caractéristique.

A.1.2.5 Vitesse de variation de phases

$$\vartheta_\phi = \vartheta \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_o^2}}$$

A.1.2.6 Vitesse de groupe harmonique

$$\vartheta_{gr} = \frac{\vartheta}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_o^2}}}$$

A.1.2.7 Vitesse de propagation de l'onde ou vitesse de la première harmonique

$$\vartheta_\phi \cdot \vartheta_{gr} = \vartheta^2 \quad \text{avec} \quad \vartheta = \frac{1}{\epsilon\mu} \quad ; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$$

A.1.3 Présentation des ondes et leur gamme de fréquence

Dénomination	Fréquence	Longueur d'onde	Désignation métrique des ondes
VLF Very Low Frequencies Très basses fréquences Grande onde (GO)	10 kHz à 30 kHz	10 km à 30km	myriamétriques
LF <i>Low Frequencies</i> Basses fréquences Onde longue	30 kHz à 300 kHz	1 km à 10 km	kilométriques
MF <i>Medium Frequencies</i> Fréquences moyennes Onde moyenne ou petite onde (PO)	300kHz à 3MHz	100 m à 1 km	hectométriques
HF <i>High Frequencies</i> Hautes fréquences	3 MHz à 30 MHz	10m à 100m	décamétriques
VHF <i>Very High Frequencies</i> Très hautes fréquences	30 MHz à 300MHz	1 m à 10 m	métriques
UHF <i>Ultra High Frequencies</i> Ultra hautes fréquences	300 MHz à 3 GHz	10 cm à 1m	décimétriques
SHF <i>Super High Frequencies</i> Hyperfréquences	3 GHz à 30 GHz	1 cm à 10 cm	centimétriques
EHF <i>Extremely High Frequencies</i>	30 GHz à 300 GHz	1 mm à 1 cm	millimétriques

Tableau A.01 : classification des ondes de radiocommunication

ANNEXE 2 : CODES SOURCES

A.2.1 Longueur d'onde critique

```
a=a * 1e-2;

b=b * 1e-2;

%=====

l=0.04:0.012:0.75;

%=====

%longueur d'onde critique

lambdao=(2./sqrt((m/a)^2 + (n/b)^2 + (p./l).^2)).* 1e2;

% %traçage de lambda en fonction de l

axes(handles.axes1)

plot(l,lambdao);

xlabel('Longueur du guide [m]')

ylabel('Longueur d"onde [cm]')

grid on
```

A.2.2 Fréquence critique

```
a=a * 1e-2;

b=b * 1e-2;

%=====

l=0.04:0.012:0.75;

%=====

%longueur d'onde critique

c = 3e8;

lambdao=(2./sqrt((m/a)^2 + (n/b)^2 + (p./l).^2));
```

```
f = c ./lambdao;

% %traçage de lambda en fonction de l

axes(handles.axes1)

plot(l,f);

xlabel('Longueur du guide [m]')

ylabel('Fréquence [Hz]')

grid on
```

A.2.3 Puissance électromagnétique

```
a=a * 1e-2;

b=b * 1e-2;

%=====

l=0.04:0.012:0.75;

%=====

%longueur d'onde critique

lambdao=(2./sqrt((m/a)^2 + (n/b)^2 + (p./l).^2)).* 1e2;

% %traçage de lambda en fonction de l

c = 3e8;

%traçage de la fréquence en fonction de l

f = c./lambdao;

axes(handles.axes1)

%=====

x=a/3;

y=b/7;

z=l./3;

% %=====
```

%Tracé de la puissance en fonction de la longueur du guide d'onde

```
epsio=8.854e-12;
si1=sin(m*pi*x/a);
si2=sin(n*pi*y/b);
co1=cos(p*pi*z./l);
den=((m*pi/a)^2 + (n*pi/b)^2 + (p*pi./l).^2);
Idb=a*b;
K1=1;
Eo=2;%unité [m/V]
P=(f*K1*epsio*Eo*si1*si2.*co1*Idb)./den;
plot(l,P);
xlabel('Longueur du guide [m]')
ylabel('Puissance [W]')
grid on
```

A.2.4 Impédance d'onde

```
a=a * 1e-2;
b=b * 1e-2;
lambda=lambda * 1e-2;
l=0.04:0.012:0.75;
%=====
%longueur d'onde critique
lambdao=(2./sqrt((m/a)^2 + (n/b)^2 + (p./l).^2)).* 1e2;
c = 3e8;
%traçage de la fréquence en fonction de l
f = c./lambdao;
```

```

K1 = 1;

epsio=8.854e-12;

%=====

g_lambda = lambda ./ (sqrt(1 - (lambda^2./lambdao.^2)));

Z = f .*(K1*epsio).*g_lambda ;

axes(handles.axes1)

% %=====

%Tracé de la puissance en fonction de la longueur du guide d'onde

plot(l,Z);

xlabel('Longueur du guide [m]')

ylabel('Impédance en [Ohm]')

grid on

```

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. Brown, *Les télécommunications*, Librairie Larousse, Paris, 1971.
- [2] G. Pujolle, *Les réseaux*, Edition EYROLLES, Paris, 2003.
- [3] K. A. Agha, G. Pujolle, G. Vivier, *Réseau des mobiles et réseaux sans fil*, Edition EYROLLES, Paris, 2003.
- [4] P.-G. Fontollet, *Systèmes de télécommunications*, Deuxième édition Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1994.
- [5] L. Thourel, *Les antennes*, DUNOD Deuxième édition, Paris, 1971.
- [6] J. Baillou, G. Chauvat et C. Pejot, *L'outil graphique en électronique et automatique*, Ellipses Edition, Paris, 2002.
- [7] E. J. P. Radonamandimby, *Propagation dans l'espace libre*, cours 4^{ème} année, Dép. Tél. E.S.P.A., A.U. 2005-2006.
- [8] E. J. P. Radonamandimby, *Hyperfréquences*, cours 5^{ème} année, Dép. Tél. E.S.P.A., A.U. : 2006-2007.
- [9] J. Razakarivony, *Antennes*, cours 4^{ème} année, Dép. Tél. E.S.P.A., A.U. :2005-2006.
- [10] J. Razakarivony, *Les liaisons spatiales*, cours 5^{ème} année, Dép. Tél. E.S.P.A., A.U. :2006-2007.
- [11] C. Ratsihoarana, *Propagation libre et guidée*, cours 4^{ème} année, Dép. Tél. E.S.P.A., A.U. :2005-2006.
- [12] E. J. P. Radonamandimby, *Ondes électromagnétiques*, cours 3^{ème} année, Dép. Tél. E.S.P.A., A.U. :2004-2005.
- [13] C. Ratsihoarana, *Système de radiocommunication*, cours 5^{ème} année, Dép. Tél. E.S.P.A., A.U. : 2006-2007.
- [14] M. A. Rakotomalala, *Wi-Max*, cours 5^{ème} année, Dép. Tél. E.S.P.A., A.U. :2006-2007.

- [15] M. A. Rakotomalala, *Radiocommunication mobile*, cours 4^{ème} année, Dép. Tél. E.S.P.A., A.U. : 2005-2006.
- [16] [http:// fr.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi](http://fr.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi).
- [17] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Wi-Max>.
- [18] [http:// www.comentcamarche.net/wireless/wlentro.php3](http://www.comentcamarche.net/wireless/wlentro.php3).
- [19] http://fr.wikipedia.wiki/Global_System_for_Mobile_Communications.
- [20] http://peso.ens_lyon.fr/jean_ptrick.gelas/education/exposes/02-wimax_wimedia_zigbee.pdf.
- [21] http://wikipedia_historique/cours/aproche_telecom.pdf.
- [22] <http://www.wikipedia/cdma1.pdf>.
- [23] P. Gueulle, *Téléphones portables et PC*, 2^{ème} édition ETSF, Belgique, 2002.
- [24] J. Lavergnat, M. Sylvain, *Propagation des ondes radioélectriques*, Collection Pédagogique des Télécommunications, Masson, 1997.

Nom : ANDRIATSIHOARANA
Prénoms : Malalaniaina Volaso
Adresse de l'auteur : Lot II K 36 C Ter Mahatony
Antananarivo 101
Madagascar
Tel : 032 41 224 34

Titre du mémoire : LA PREPONDERANCE DE L'HYPERFREQUENCE DANS LA
TELECOMMUNICATION

Nombre de pages : 92
Nombre tableaux : 02
Nombre de figures : 35

Mots clés : Hyperfréquence, télécommunication, transmission, onde, guide d'onde,
atmosphère, modulation, satellite, faisceau hertzien, antenne parabolique,
source, réseau sans fil, fréquence, polarisation, visibilité directe, MATLAB
7.3

Directeur de mémoire : M. RADONAMANDIMBY Edmond Jean Pierre

RESUME :

Ce mémoire nous a permis de comprendre l'importance de l'hyperfréquence dans la télécommunication. Mais ce travail n'a pu se faire sans la connaissance de l'objectif et le travail de la télécommunication, les modes de propagation des ondes électromagnétique, et surtout les notions sur l'hyperfréquence et ses milieux de transmission.

Les guides d'onde sont utilisés dans le domaine de fréquence de l'hyperfréquence. Ils ne sont utilisés que sur des distances courtes, principalement dans les installations de faisceaux hertziens entre les systèmes actifs et les antennes. C'est d'ailleurs la démonstration de la simulation.

ABSTRACT:

This memory allowed us to understand the importance of the very high frequency in the telecommunication. But this work was not able to make without the knowledge of the objective and the work of the telecommunication, the fashions of propagation of the waves electromagnetic, and especially the notions on the very high frequency and its transmission surroundings.

The guides of wave are used in the domain of frequency of the very high frequency. They only used on short distances, mainly in installations of radio link between the active systems and the antennas. It is the demonstration of the simulation.