

L'USINE NOUVELLE

SÉRIE | EEA

Odile Picon *et coll.*

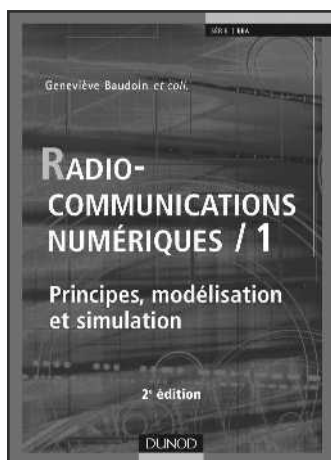
LES ANTENNES

Théorie, conception et applications

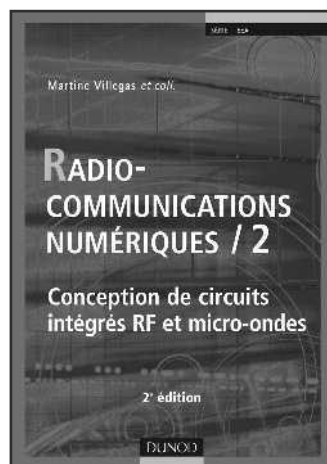
Préface de Maurice Bellanger

DUNOD

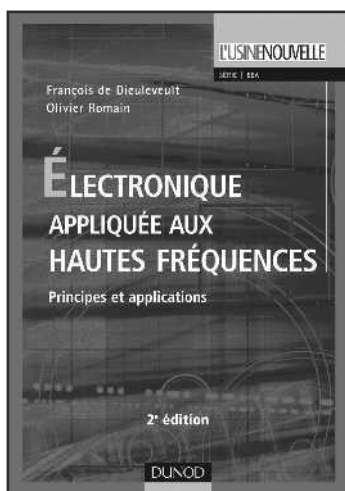
LES ANTENNES



Martine VILLEGAS *et coll.*
Radiocommunications
numériques, Tome 1, 672 p.



Martine VILLEGAS *et coll.*
Radiocommunications
numériques, Tome 2, 368 p.



François DE DIEULEVEULT
 et Olivier ROMAIN
Électronique appliquée aux
hautes fréquences, 552 p.



Dominique PARET
RFID en ultra et super hautes
fréquences UHF-SHF, 496 p.

Odile Picon *et coll.*

LES ANTENNES

Théorie, conception et application

Préface de Maurice Bellanger

L'USINENOUVELLE

DUNOD

Consultez nos parutions sur dunod.com



Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements



d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© Dunod, Paris, 2009
ISBN 978-2-10-054245-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PRÉFACE

En une décennie, les radiocommunications ont apporté des changements fondamentaux dans la société, au niveau mondial. Ainsi, la téléphonie mobile a apporté à l'individu la liberté de communication et l'accès universel aux réseaux d'information. Une telle évolution a été rendue possible par les progrès de l'électronique et des techniques et moyens de traitement numérique de l'information dans les terminaux. Cependant, il ne faut pas oublier que la liaison entre ces terminaux, téléphones portables, ordinateurs, stations de base et autres infrastructures, est assurée par les ondes électromagnétiques, qui sont un point de passage obligé. C'est dire l'importance, dans les systèmes de radiocommunications et pour leur fonctionnement, des organes qui effectuent l'interface entre les moyens de traitement de l'information et les ondes qui véhiculent cette information, c'est-à-dire les antennes. Parfois spectaculaires, souvent non visibles, ces antennes, en réalité, déterminent des paramètres essentiels des communications, comme la puissance émise, la direction de rayonnement ou la portée, et elles ont un impact fort sur des caractéristiques critiques comme les débits numériques ou les dimensions des équipements.

Les antennes suscitent aussi, parfois et chez certains, des inquiétudes, comme dans le cas des antennes-relais. En effet, les ondes électromagnétiques utilisées en radiofréquences transportent de l'énergie et sont invisibles. En réalité, c'est par la présence des antennes que l'on réalise la présence des ondes et que l'on peut apprécier ou imaginer certaines de leurs caractéristiques. Indépendamment des recherches sur les effets potentiels de ces ondes sur l'environnement et sur l'individu, notamment sur la santé, il est certain que la connaissance des propriétés des antennes et la maîtrise de leurs caractéristiques sont des éléments importants pour leur acceptation par le public. En fait, il faut optimiser les antennes et leur utilisation, afin de minimiser leur impact sur l'environnement et les recherches qui visent à améliorer leurs performances techniques et à augmenter leur souplesse d'application, tout en limitant les coûts, vont contribuer au progrès des systèmes de radiocommunications de tous types et à leur exploitation harmonieuse dans la société. Dans le présent contexte, l'ouvrage d'Odile Picon et de ses collègues est une contribution importante aux progrès de l'électronique en général et des radiocommunications en particulier. D'abord, par la synthèse des connaissances de base sur la nature des ondes électromagnétiques, leur propagation et leur manipulation, qu'il met à la portée des ingénieurs et des étudiants en électronique. Ensuite, par les correspondances et les liaisons qu'il développe entre les antennes et les traitements de l'information dans les terminaux et l'importance qu'il fait apparaître pour les conceptions conjointes. Enfin, par les axes de recherche qu'il souligne et les stimulations qui vont en résulter pour les scientifiques, ingénieurs et chercheurs. Les méthodes de mesure et de modélisation se perfectionnent et la meilleure maîtrise de l'environnement électromagnétique qui en résulte est de nature à donner confiance aux utilisateurs, dans tous les domaines d'application. Bien que l'ouvrage s'adresse principalement aux professionnels de l'électronique, débutants ou confirmés, le public moins averti devrait en tirer profit également. En fait, en rendant accessibles et en clarifiant des propriétés fondamentales des antennes, en montrant les avancées dans la connaissance et la maîtrise de l'environnement électromagnétique, en faisant apparaître des perspectives de progrès, l'ouvrage contribuera à l'acceptation par le public d'une technologie dont la société moderne ne peut plus se passer.

Paris, le 26 juin 2009.

Maurice BELLANGER

Professeur au CNAM

Membre de l'Académie des technologies

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	XI
Introduction	1
1 • Principe de fonctionnement des antennes	5
1.1 Le rôle des antennes	5
1.2 Différents types d'antennes	5
1.3 Le rôle de la diffraction	9
1.4 Classification des antennes en fonction du type de la source	10
2 • Principes théoriques pour l'étude des antennes	11
2.1 Équations de Maxwell	11
2.2 Potentiels électromagnétiques	21
2.3 Vecteur de Poynting	27
2.4 Théorèmes importants de l'électromagnétisme	30
3 • Calcul du rayonnement d'antennes de référence	37
3.1 Rayonnement créé par des courants	37
3.2 Diffraction par une ouverture et principe d'équivalence	51
3.3 Rayonnement des ouvertures planes	61
3.4 Différentes zones de rayonnement	68
Bibliographie	72
4 • Caractéristiques des antennes	73
4.1 Fonction caractéristique de rayonnement	73
4.2 Diagramme de rayonnement	74
4.3 Directivité	78
4.4 Gain d'une antenne	82
4.5 Facteur d'antenne	83
4.6 Polarisation d'une onde	84
4.7 Impédance d'une antenne	92
4.8 Alimentation	94
4.9 Largeur de bande	97
4.10 Bilan de liaison	99
4.11 Température de bruit d'une antenne	100
Bibliographie	101

5 • Réseaux d'antennes	103
5.1 Les réseaux d'antennes	103
5.2 Antennes multifaisceaux	115
5.3 Synthèse de réseaux	118
5.4 Alimentation des réseaux	121
Bibliographie	125
6 • Différents domaines d'utilisation des antennes	127
6.1 Gestion du spectre radiofréquence	127
6.2 Les systèmes de communications	130
6.3 Télévision et radiodiffusion FM	162
6.4 Radar	167
6.5 Télédétection	176
6.6 Radioastronomie	194
Bibliographie	196
7 • Systèmes multi-antennes	197
7.1 Éléments de traitement d'antenne	197
7.2 Diversité	213
7.3 Systèmes MIMO	220
Bibliographie	245
8 • Antennes définies selon le phénomène physique créant le rayonnement	249
8.1 Antennes boucles	249
8.2 Antennes à résonateurs	253
8.3 Antennes à ondes progressives	256
8.4 Antennes à ondes de surface et à ondes de fuite	260
8.5 Antennes Yagi-Uda	264
8.6 Antennes à réflecteurs	270
Bibliographie	275
9 • Antennes définies selon des caractéristiques systèmes	277
9.1 Différentes géométries d'antennes	277
9.2 Antennes définies par leur largeur de bande en fréquence	300
Bibliographie	319
10 • Mesures d'antennes	323
10.1 Introduction	323
10.2 Rappels sur les différentes zones de rayonnement	323
10.3 Diagramme de rayonnement et directivité	324
10.4 Conditions sur la mesure du diagramme de rayonnement	328
10.5 Gain	330
10.6 Polarisation	332
10.7 Impédance	333

10.8	Efficacité	335
	Bibliographie	336
11 •	Modélisation numérique du rayonnement des antennes	337
11.1	Introduction aux méthodes de modélisation numérique	337
11.2	Méthode intégrale associée à la méthode des moments	338
11.3	La méthode des éléments finis	350
11.4	La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)	357
	Bibliographie	366
	Index	367

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

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

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

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

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

L'ouvrage débute par une présentation globale des antennes suivie du rappel de bases théoriques en électromagnétisme (chapitres 1 et 2). La théorie des antennes est ensuite développée en détail dans le chapitre 3. Des démonstrations y sont proposées en détail et permettront au lecteur qui le souhaite d'approfondir certains points théoriques. Le chapitre 4 s'appuie sur ces bases pour définir les caractéristiques générales du rayonnement. Celles-ci sont indispensables au dimensionnement d'une antenne dans le cadre d'une application précise. Le chapitre 5 concerne la mise en réseau des éléments rayonnants et les avantages qu'on peut en attendre.

Le chapitre 6 est consacré aux différents domaines d'applications des antennes : communications, diffusion, radars, télédétection, radioastronomie. Le lecteur pourra parcourir ce chapitre pour y découvrir toute la variété des domaines utilisant le rayonnement électromagnétique. Il pourra aussi s'attarder sur un type d'application qui le concerne plus particulièrement. Les domaines d'application ont été décrits de façon rapide en insistant sur le contexte, afin de mettre en avant les spécifications des antennes.

De nouveaux développements dans le domaine des communications ont prouvé que les performances étaient nettement améliorées par l'utilisation de systèmes multi-antennes. Le chapitre 7 en présente les avantages attendus. On y aborde les bases du traitement d'antenne et de la

diversité. Les principes du fonctionnement des systèmes MIMO (*Multi Input, Multi Output*) terminent ce chapitre.

Dans la suite, en s'appuyant sur la théorie, un grand nombre d'exemples est proposé en insistant sur les caractéristiques des différents types d'antennes. Dans le chapitre 8 les antennes sont regroupées selon les phénomènes physiques qui sont à la base de leur rayonnement (par exemple : antennes résonnantes, antennes à ondes de fuite, antennes Yagi-Uda). Le chapitre 9 est consacré aux antennes dont les caractéristiques sont imposées par des considérations vis-à-vis du système : constitution (par exemple : antennes guides, antennes miniatures) ou bien largeur de bande. Toutes les descriptions d'antennes s'attachent à donner les éléments essentiels intervenant dans leur conception. L'ensemble est largement illustré de schémas et d'abaques permettant leur dimensionnement.

Une étape de la conception consiste à valider la structure par des mesures dont les principales méthodes sont décrites dans le chapitre 10, uniquement consacré à ce point.

Dans le chapitre 11 sont présentés les principes de quelques méthodes de simulations numériques. Ces méthodes constituent une aide précieuse à la conception d'antennes complexes pour lesquelles le calcul analytique est impossible. Elles évitent aussi la réalisation de maquettes intermédiaires très coûteuses.

L'ensemble des chapitres s'organise en partant du principe général du rayonnement des antennes pour aller vers leurs diversités. Cet ouvrage peut être lu, soit de façon théorique comme base aux calculs de rayonnement, soit de façon pratique dans le but de choisir un type d'antenne et de poursuivre jusqu'à sa conception. Ces aspects complémentaires permettront aux débutants comme aux spécialistes de trouver un intérêt dans la lecture de cet ouvrage. Il contient les éléments indispensables pour des études en recherche et développement dans le domaine des antennes.

■ À propos des auteurs

Cet ouvrage est le résultat du travail d'une équipe de spécialistes en antennes, électromagnétisme, systèmes hyperfréquences et traitement du signal, tous enseignants chercheurs à l'université de Paris-Est. Les auteurs ont une large expérience de l'enseignement dans le domaine des antennes. Ils enseignent au niveau master et en école d'ingénieurs. Leur compétence est reconnue grâce à leurs nombreux travaux de recherche tant théoriques qu'appliqués, menés en partie en collaboration avec des partenaires du milieu industriel.

Laurent Cirio est diplômé de l'université de Nice Sophia-Antipolis. Maître de conférences à l'université Paris-Est Marne-la-Vallée, ses travaux portent sur la conception et la caractérisation des antennes planaires et leurs applications.

Christian Ripoll est diplômé de l'University College London, professeur associé en systèmes électroniques à l'université Paris-Est-ESIEE-Paris.

Geneviève Baudoin est diplômée de Télécom Paris, habilitée à diriger des recherches de l'université Paris-Est, professeur en traitement du signal et communications numériques et directrice de la recherche à l'université Paris-Est-ESIEE-Paris.

Jean-François Bercher est ingénieur INPG, docteur de l'université de Paris-Sud, professeur en traitement de signal à l'université Paris-Est-ESIEE-Paris.

Martine Villegas est diplômée de l'ENSEA, habilitée à diriger des recherches de l'université Paris-Est, professeur en architecture de systèmes à l'université Paris-Est-ESIEE-Paris, responsable ESIEE pour le master *Systèmes de communications hautes fréquences*.

Odile Picon, ancienne élève de l'École normale supérieure de Fontenay-aux-Roses, agrégée de physique, docteur de l'université de Paris-Sud, docteur d'état de l'université de Rennes I, est professeur en électromagnétisme et antennes à l'université Paris-Est-Marne-la-Vallée, directrice du laboratoire ESYCOM, (commun à l'UPE-MLV, à l'UPE-ESIEE-Paris et au Cnam) et responsable du master *Systèmes de communications hautes fréquences* de l'UPE-MLV.

INTRODUCTION

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou pour le capter. Comme nous le verrons dans cet ouvrage, il existe de nombreux types d'antennes. Il est important d'avoir une connaissance globale de leur fonctionnement lors du choix d'un dispositif rayonnant. La compréhension de ce fonctionnement aidera, d'une part à utiliser l'antenne au mieux de ses performances et d'autre part, à en réaliser une conception optimale.

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

Dans cet ouvrage, nous présenterons la théorie liée aux antennes qui servira de base à leur conception. Nous tenterons de classer les antennes par rapport à leur principe de fonctionnement et par rapport à leur rôle dans les systèmes. Nous terminerons par des principes de modélisation numérique.

La transmission d'information

La transmission d'information s'effectue généralement grâce à une onde porteuse, caractérisée par sa fréquence. C'est une onde sinusoïdale. Sa modulation par un signal de plus basse fréquence représente l'information à transmettre. Nous n'aborderons pas ici les différents types de modulations existant qui peuvent être analogiques ou numériques.

Les ondes porteuses sont de différentes natures. Ce sont les caractéristiques du système qui permettent de choisir le type de transmission. Les ondes les plus utilisées pour la transmission sont les ondes acoustiques et les ondes électromagnétiques. Nous ne parlerons, dans cet ouvrage, que de ce dernier type.

Bien qu'une onde électromagnétique n'ait besoin d'aucun support pour se propager, il se trouve que, dans son utilisation pour la transmission d'information, elle se propage à travers un milieu. Les différents milieux dans lesquels s'effectue la propagation d'ondes électromagnétiques sont :

- les conducteurs (transmission filaire),
- la silice (transmissions par fibres optiques),
- l'air (transmissions hertziennes).

L'exemple de transmission dans les conducteurs est celui du téléphone filaire. Afin d'augmenter le débit d'informations, la téléphonie fixe utilise un autre support, constitué par la fibre optique. Dans ce cas, l'onde optique constitue la porteuse. Le troisième cas est celui de la téléphonie sans fil dont le canal de propagation est l'air. Actuellement, les applications utilisant ce canal de propagation sont nombreuses : télévision, téléphonie mobile, téléphonie fixe par liaisons hertziennes ou satellites, radar, télédétection, etc., d'où le rôle des antennes dans ces systèmes.

Rappelons ici le spectre des ondes électromagnétiques afin de bien situer les différentes utilisations de celui-ci. La figure I.1 présente une échelle par rapport aux longueurs d'ondes (λ) et une autre par rapport aux fréquences (f), sachant que, dans le vide, ces deux grandeurs sont liées par

l'intermédiaire de la vitesse de la lumière dans le vide c (cette valeur est sensiblement la même dans le vide et dans l'air) :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{avec} \quad c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

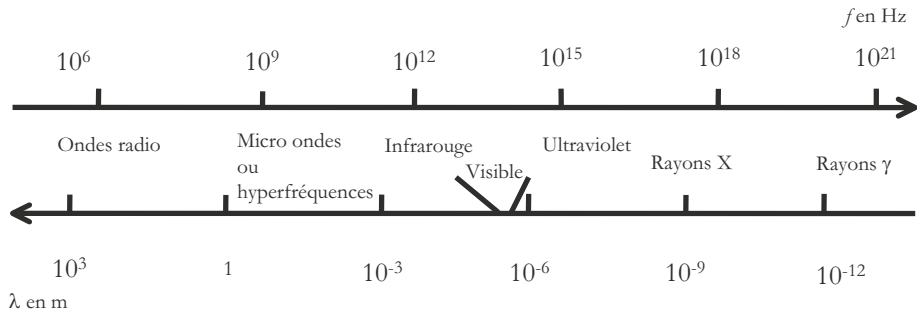


Figure I.1 – Spectre des ondes électromagnétiques.

Les ondes radiofréquences occupent la région du spectre correspondant aux basses fréquences du spectre électromagnétique. Les longueurs d'ondes correspondant aux ondes longues sont de l'ordre de 1 000 m. En montant en fréquence, on trouve les ondes courtes, puis un peu plus haut les micro-ondes ou hyperfréquences. Ensuite, pour des longueurs d'ondes de l'ordre du micromètre se trouvent les infrarouges, domaine assez étendu dont la limite haute en fréquence est le visible. Cette zone s'étend de 0,4 à 0,8 micromètre de longueur d'onde. Ensuite vient le domaine des ultra-violet. Les longueurs d'ondes de l'ordre de l'angström définissent le domaine des rayons X. Ceux-ci permettent de scruter la structure atomique en utilisant le phénomène de diffraction sur les atomes, dont la taille est l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Plus haut en fréquence, on trouve les rayons gamma, accompagnant les réactions nucléaires.

La partie du spectre qui concerne l'utilisation des antennes est celui qui va des ondes radio aux ondes submillimétriques ou quasi optiques qui sont intermédiaires entre les micro-ondes et l'infrarouge. Les hyperfréquences ou micro-ondes occupent la bande de fréquences comprise entre 300 MHz et 300 GHz. Cette partie du spectre est divisée en bandes de fréquences standardisées (voir chapitre 6).

La transmission d'ondes électromagnétiques dans l'air

Les ondes électromagnétiques se propagent bien dans l'atmosphère pour des fréquences basses du spectre radiofréquence jusqu'à des fréquences de l'ordre d'une vingtaine de giga-hertz. L'atténuation due à l'atmosphère se manifeste au-delà de 20 GHz. La figure I.2 donne les valeurs de l'absorption des ondes relativement aux deux composants les plus absorbants dans cette partie du spectre (vapeur d'eau et oxygène), pour 1 km d'atmosphère standard en fonction de la fréquence. On constate une atténuation globale qui augmente au fur et à mesure que la fréquence augmente. Pour certaines fréquences (environ : 22, 60, 120 et 180 GHz), l'atmosphère absorbe spécifiquement les ondes électromagnétiques. Ces phénomènes d'absorption sont dus à des interactions (résonantes ou non) des molécules avec les ondes électromagnétiques. Ils ont des explications différentes. Pour les fréquences correspondant au spectre micro-ondes, ils sont dus soit aux résonances rotationnelles, soit à la polarisation d'orientation liée aux moments dipolaires des molécules, compte tenu des énergies mises en jeu. La molécule d'eau possède un moment dipolaire électrique, alors que la molécule d'oxygène possède un moment dipolaire magnétique.

Les bandes d'absorption à 60 et 120 GHz sont dues à la résonance rotationnelle des molécules d'oxygène. À 22 et 180 GHz, un phénomène analogue apparaît pour les molécules d'eau. Les bandes sont élargies par des résonances vibrationnelles, en particulier à 60 GHz.

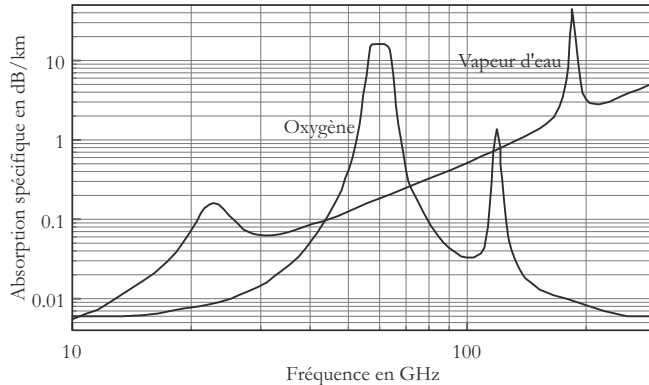


Figure I.2 – Absorption par la vapeur d'eau et l'oxygène des ondes électromagnétiques pour 1 km d'atmosphère standard.

L'observation du diagramme d'absorption de l'oxygène et de l'eau conduit à plusieurs remarques concernant l'utilisation du spectre électromagnétique.

- Tout d'abord il faut remarquer que, d'une manière générale, l'objectif des communications est d'obtenir un débit toujours plus grand. Or, plus la fréquence d'utilisation est élevée, plus la largeur de bande utilisable est grande et donc plus le débit supporté est élevé. Cette tendance à l'augmentation de la fréquence des systèmes de communication au cours de leur évolution est incontestable.
- L'utilisation de fréquences basses (< 20 GHz) ne pose pas de problèmes particuliers d'atténuation.
- L'atténuation existant autour de 22 GHz est relativement peu importante. Elle peut cependant dégrader le signal. Pour les transmissions satellites, en particulier, pour lesquelles la distance atmosphérique parcourue est grande, les systèmes sont conçus de façon à se placer sur les bords de cette bande. C'est actuellement le cas de certains systèmes satellites japonais utilisant les bandes 20-30 GHz. Mais en général les bandes satellites utilisées sont plus basses.
- Une atténuation très forte existe à 60 GHz, qui est de l'ordre de – 16 dB/km. Il est envisagé d'utiliser cette bande pour des transmissions intrabâtiment. On profite alors de l'atténuation existant pour éviter la pollution électromagnétique d'un bâtiment à l'autre.
- Vers le haut du spectre, l'atténuation est très forte. Les fréquences utilisées dans cette partie sont celles qui intéressent les radioastronomes. C'est la raison pour laquelle les observatoires de radioastronomie sont placés dans des lieux où l'atmosphère a un rôle moindre. En effet, en altitude, la densité de la couche atmosphérique traversée est plus faible et l'air est plus sec.
- Signalons aussi que l'atténuation par les hydrométéores (pluie et neige) est un phénomène à prendre en compte pour l'évaluation de la qualité d'une liaison lors de transmissions terrestres.

1 • PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES ANTENNES

1.1 Le rôle des antennes

☐ Antenne d'émission

Afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur.

☐ Antenne de réception

De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Elle joue le même rôle qu'un télescope qui capte la lumière issue des étoiles et la transforme.

☐ Réciprocité

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité qui sera démontré plus loin. Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques.

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

1.2 Différents types d'antennes

Afin de comprendre comment s'effectue cette transformation entre la puissance guidée et la puissance rayonnée, nous allons présenter un certain nombre d'antennes. Elles sont classées ici selon un ordre qui suit approximativement leur chronologie d'apparition. Il n'est pas question dans ce paragraphe de présenter tous les types d'antennes, mais d'en introduire certains des plus utilisés.

En conclusion, nous aboutirons à un classement des antennes selon le type de la source rayonnante qui apparaîtra soit comme un courant électrique, soit comme une surface caractérisée par un champ électrique.

☐ Antenne dipolaire

L'antenne dipolaire est constituée de deux fils alignés, très courts et reliés chacun à deux fils parallèles et très proches constituant une ligne bifilaire (figure 1.1). En émission, cette ligne est reliée à un générateur alternatif, caractérisé par sa fréquence et son impédance interne. À la réception, la ligne bifilaire est branchée sur un récepteur.