

Martine Villegas · Fabien Robert · Lucas Letailleur

CONNECTIVITÉ WIRELESS

**Évolutions des systèmes
et enjeux technologiques**

DUNOD

Crédits iconographiques

1.4, 7.2, 7.3, 8.7 : Rachid Maraï ; 6.4, 12.4 : Bernadette Coleno ; 7.1 : Robysot/Shutterstock.com ; 10.1 : Jo Sam Re/Shutterstock.com ; 10.2 : magnetix/Shutterstock.com

Direction artistique : Nicolas Wiel

Conception graphique de la couverture : Élisabeth Riba

Illustrations de couverture : Blue Planet Studio/shutterstock.com

Composition : Lumina Datamatics, Inc.

© Dunod, 2022

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-084932-1

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

Il existe diverses expressions pour désigner les liens sans fil utilisant les ondes radiofréquences ou micro-ondes, mais elles sont souvent un peu désuètes, ambiguës ou trop spécialisées. Aussi, les auteurs de cet ouvrage ont-ils choisi d'utiliser l'expression « connectivité *Wireless* » qui a l'avantage de la clarté et de la généralité.

La connectivité *Wireless* joue un rôle prépondérant dans de très nombreux domaines comme les communications, la connexion entre objets, la détection, la localisation, ou l'observation de la Terre. En effet, l'onde radio peut être modulée pour transporter de l'information d'un point à un autre. Elle peut aussi être utilisée pour détecter une cible par réflexion, pour estimer une distance ou une vitesse par mesure de temps de propagation ou de décalage de fréquence, pour réaliser des images de scènes éloignées avec une haute résolution.

La connectivité *Wireless* est omniprésente dans notre vie quotidienne, de façon paradoxale, souvent invisible et source de questions ou de polémiques.

Le développement de la téléphonie mobile avec ses générations successives jusqu'à l'actuelle 5G, associé à celui d'Internet a révolutionné notre accès à l'information et fait naître de nouveaux usages comme les réseaux sociaux, qui modifient profondément nos sociétés. Le mobile est devenu un objet personnel indispensable pour une majorité de la population mondiale.

La connectivité *Wireless* est aussi présente dans les objets du quotidien, les réseaux de capteurs et les machines. Elle se diffuse avec l'Internet des objets dans de nouveaux domaines tels que les transports, les véhicules autonomes, la surveillance de l'environnement, la santé, la gestion des situations d'urgence et transforme profondément la chaîne logistique et l'industrie en général. Elle conduit vers un monde global connecté.

L'évolution des usages et des besoins nécessite des progrès dans plusieurs domaines : réseaux et infrastructures des systèmes de communication terrestres ou spatiaux, techniques de communication et de traitement numérique des signaux et de l'information, architectures et sous-systèmes clés des émetteurs-récepteurs pour les stations de base et les terminaux, antennes, électronique, technologie des semi-conducteurs et intégration.

Face à l'urgence des enjeux écologiques, ces transformations doivent se faire avec le souci essentiel de minimisation de la consommation d'énergie.

Les émetteurs-récepteurs doivent être capables de supporter des débits de transmission de plus en plus importants, de co-exister sans trop interférer, de fonctionner de façon synchrone ou asynchrone, de répondre avec un temps de latence de plus en plus court, de partager de façon efficace et dynamique les ressources spectrales ; et ceci tout en optimisant leur rendement énergétique.

Les techniques multi-antennes MIMO et multi-porteuses OFDM ont beaucoup contribué à l'amélioration des performances numériques des liaisons mais elles ont également généré de nouveaux défis en termes de rendement énergétique et d'intégration des émetteurs-récepteurs.

Les applications et les systèmes exploitant la connectivité *Wireless* présentent une très grande diversité de caractéristiques en ce qui concerne les distances à parcourir par l'onde radio, les bandes de fréquences utilisées, les largeurs de bande nécessaires, les puissances rayonnées, les dimensions des équipements, la complexité et le coût de leurs infrastructures et de leur exploitation. Ils s'appuient cependant sur des principes fondamentaux communs : antennes et rayonnement, propagation des ondes, techniques de communications numériques, électronique des émetteurs-récepteurs, physique des semi-conducteurs et technologies d'intégration microélectronique. En outre, la transformation d'un élément du système nécessite de bien appréhender les conséquences sur les autres éléments de l'ensemble, ainsi que les possibilités d'optimisation conjointe.

Dans ce contexte, l'ouvrage *Connectivité Wireless : les évolutions des systèmes et les enjeux technologiques* rédigé par Martine Villegas, Fabien Robert et Lucas Letailleur apporte un éclairage original sur ces questions par le choix d'une « approche système » qui aborde avec beaucoup de pédagogie l'ensemble des points clés (physique, technologie du semi-conducteur, électronique, circuits d'émission-réception, applications, systèmes et normes) de façon progressive et équilibrée.

Il est structuré en quatre grandes parties. La première est consacrée aux fondamentaux avec les concepts de base des systèmes de communication, de localisation et de détection puis une présentation des fonctions et grandeurs caractéristiques des dispositifs, circuits et composants des émetteurs-récepteurs. La deuxième partie expose les principaux standards de couches physiques des réseaux de communications cellulaires, des réseaux locaux ou personnels et de connectivité pour l'Internet des objets. La troisième partie est dédiée aux communications spatiales et aux systèmes radar. Enfin, la

dernière partie traite des technologies d'intégration des circuits fonctionnant dans les bandes radiofréquences jusqu'aux fréquences millimétriques.

L'ouvrage aborde les développements les plus récents ou les plus prometteurs comme la 5G, la 6G, les nouvelles activités spatiales commerciales favorisées par le *new-space*, l'utilisation des bandes de fréquences millimétriques pour les communications et les radars, la technologie GaN (nitrure de gallium), matériau semi-conducteur présentant de nombreux intérêts pour les applications hautes fréquences et/ou forte puissance.

Les trois auteurs ont une expérience de la recherche académique et industrielle et de l'enseignement supérieur à destination de publics variés sur l'ensemble des sujets traités dans l'ouvrage. Cette riche expérience leur permet d'exposer des concepts complexes avec rigueur et pédagogie et de suggérer des voies de recherche liées aux défis scientifiques et technologiques de la connectivité *Wireless*.

L'ouvrage est principalement destiné aux étudiants et aux professionnels de l'électronique et de ses applications dans les systèmes de télécommunications, de localisation ou de détection. Mais, il pourra aussi être utile à un public plus large désireux de s'informer sur les dernières avancées, les perspectives et les potentialités de cette technologie pour de nouveaux domaines d'applications à explorer.

Paris, le 26 mai 2022

Geneviève Baudoin, professeur émérite à ESIEE Paris, université Gustave-Eiffel

Table des matières

Préface	III
----------------	------------

Partie 1

Les fondamentaux

Chapitre 1 ■ Systèmes de communication, de localisation, de détection	3
1.1 Canal de propagation	5
1.1.1 Utilisation du spectre électromagnétique	5
1.1.2 Propagation en espace libre	7
1.1.3 Modélisation des canaux	8
1.2 Systèmes de communication	15
1.2.1 Principes et classification	15
1.2.2 Canaux de transmission et débit	16
1.2.3 Modulations numériques	18
1.2.4 Modes d'accès	21
1.2.5 OFDM	23
1.2.6 Techniques SISO, MISO, SIMO, MIMO	26
1.2.7 Architectures d'émission-réception	29
1.2.8 Techniques d'amélioration de rendement et de linéarisation	35
1.3 Systèmes de géolocalisation	43
1.3.1 Quelques rappels sur les transmissions par satellites	43
1.3.2 Principes de localisation	45
1.3.3 Localisation de type GPS	48
1.4 Systèmes de détection	50
1.4.1 Équation radar	50
1.4.2 Cas du radar impulsionnel : grandeurs dimensionnantes	51
Chapitre 2 ■ Fonctions élémentaires d'un émetteur-récepteur	57
2.1 Antennes	57
2.1.1 Grandeurs caractéristiques	57
2.1.2 Types d'antennes et classification	62

2.2 Dispositifs linéaires : grandeurs caractéristiques	63
2.2.1 Coefficient de réflexion et paramètres S	63
2.2.2 Quadripôle bruyant	66
2.3 Composants actifs discrets	68
2.3.1 Différents types de technologies d'intégration	68
2.3.2 Caractéristiques fréquentielles	69
2.4 Circuits linéaires passifs et actifs	73
2.4.1 Circuits passifs linéaires	73
2.4.2 Fonctions actives linéaires	79
2.5 Circuits non linéaires	82
2.5.1 Grandeurs caractéristiques de type circuit	82
2.5.2 Amplificateurs de puissance	86
2.5.3 Oscillateurs et PLL	91
2.5.4 Mélangeurs et modulateurs	95
2.5.5 Commutateurs	98
2.5.6 Déphaseurs	100
2.6 Grandeurs caractéristiques de type « système »	101
2.6.1 <i>Adjacent Channel Power Ratio</i> (ACPR)	101
2.6.2 <i>Error Vector Magnitude</i> (EVM)	102
2.6.3 <i>NPR</i> (<i>Noise Power Ratio</i>)	103

Partie 2

Les standards de connectivité

Chapitre 3 ■ Couches physiques des réseaux cellulaires	107
3.1 Concepts de la téléphonie cellulaire	107
3.2 Évolution des besoins et standards : de la 1G à la 3G	109
3.3 3G/3G+	111
3.4 4G/4G+	112
Chapitre 4 ■ Couches physiques des réseaux WPAN, WLAN	119
4.1 Normalisation	119
4.2 Standards Bluetooth (BT)	120
4.3 Standards WiFi	123
Chapitre 5 ■ Connectivité pour l'Internet des objets	131
5.1 Contexte des objets connectés	131
5.1.1 Contexte et besoins	131
5.1.2 Défis des LPWAN	132

5.2	Caractéristiques des réseaux LPWAN	132
5.3	Les spécificités des systèmes LR WPAN	134
5.3.1	ZigBee	135
5.3.2	UWB (<i>Ultra Wide Band</i>)	136
5.4	Systèmes propriétaires : Sigfox® et LoRa®	138
5.4.1	Système Sigfox®	138
5.4.2	Système LoRa®	140
5.5	Standards NB-IoT et LTE-M	141
5.5.1	Standard NB-IoT	142
5.5.2	Standard LTE-M	143
Chapitre 6 ■	Communications 5G	145
6.1	Enjeux de la 5G	145
6.2	Spécificité de la couche physique de la 5G	148
6.2.1	Attribution des bandes de fréquences	148
6.2.2	Forme d'onde, trame de transmission, largeur de bande, modulations et modes d'accès de la 5G NR	150
6.2.3	Technologie MIMO	158
6.2.4	Les bandes 5G non licenciées (5G NR-U)	160
6.3	Choix des architectures	163
6.4	Vers la 6G	168

Partie 3

Communications spatiales et systèmes radars

Chapitre 7 ■	Différentes applications des systèmes de communications spatiales	173
7.1	Satellites de communication et de radiodiffusion	173
7.1.1	Constitution d'un satellite de radiodiffusion	174
7.1.2	Satellites en orbite géostationnaire	177
7.1.3	Satellites en orbites moyennes	181
7.1.4	Satellites en orbites basses	182
7.2	Satellites d'observation	185
7.3	Éléments critiques dans les architectures d'émission réception	190
7.3.1	Puissances embarquées et émetteurs	194
7.3.2	Réception et bruit	197
7.4	Perturbations et expositions aux radiations	199

Chapitre 8 ■ Évolution des systèmes communicants spatiaux	205
8.1 Évolution du <i>NewSpace</i>	205
8.1.1 Du <i>Femtosat</i> au <i>Microsat</i>	205
8.1.2 Puissances disponibles et débits associés	208
8.1.3 Utilisation des composants COTS	210
8.1.4 Défis et opportunités de la densification	211
8.1.5 Vers la 5G spatial	213
8.2 Liens optiques	215
Chapitre 9 ■ Systèmes radars	219
9.1 Bandes de fréquences liées aux applications radars	219
9.2 Grandes familles de systèmes radars et fonctionnements	224
9.2.1 Radars Doppler	224
9.2.2 Radars FM-CW	227
9.2.3 Radars à balayage	231
9.2.4 Radars passifs	237
9.2.5 Radars SAR (<i>Synthetic Aperture Radar</i>)	238

Partie 4

Technologies d'intégration de la radiofréquence aux ondes millimétriques

Chapitre 10 ■ Caractéristiques fondamentales des semi-conducteurs	247
10.1 Propriétés des semi-conducteurs	247
10.1.1 Physique du solide et diagramme de bandes	247
10.1.2 Concentration de porteurs	252
10.1.3 Courant dans les semi-conducteurs	255
10.2 Dopage	257
10.2.1 Dopage de type N	257
10.2.2 Dopage de type P	258
10.2.3 Conséquences du dopage	260
10.3 Matériaux semi-conducteurs IV, IV-IV, III V	262
10.4 Hétérostructures et hétérojonction	263
10.4.1 Hétérostructures	263
10.4.2 Hétérojonctions	266

Chapitre 11 ■ Différents types de transistors et classification des technologies	271
11.1 Rappels sur la jonction PN et le transistor bipolaire	271
11.1.1 Rappels sur le fonctionnement de la jonction PN	271
11.1.2 Rappels sur les fondamentaux du transistor bipolaire	273
11.1.3 Caractéristiques statiques du transistor bipolaire	275
11.1.4 Schémas équivalents linéaires et non linéaires	276
11.1.5 Transistor bipolaire à homojonction et hétérojonction pour des applications hautes fréquences	279
11.2 Les transistors à effet de champ	282
11.2.1 Technologies de type MOSFET	282
11.2.2 Technologie MESFET	286
11.2.3 Caractéristiques des HEMT	288
11.2.4 Caractéristiques statiques des transistors à effet de champ	291
11.2.5 Schémas équivalents linéaires et non linéaires	292
11.3 Classification des technologies d'intégration	294
Chapitre 12 ■ Procédés de fabrication des composants et circuits intégrés	297
12.1 Techniques de dépôt et d'épitaxie	297
12.1.1 Dépôts physiques en phase vapeur (PVD)	298
12.1.2 Dépôts chimiques en phase vapeur (CVD)	301
12.1.3 Épitaxies	303
12.2 Dopage	305
12.2.1 Dopage par diffusion	305
12.2.2 Implantation ionique	309
12.3 Techniques de gravure	314
12.3.1 Gravure humide	314
12.3.2 Gravures sèches	315
12.4 Lithographie	317
12.4.1 Photolithographie	318
12.4.2 Photolithographie extrême UV (EUV)	321
12.4.3 Lithographie par flux d'électrons ou par flux d'ions	321
Chapitre 13 ■ Évolution des performances des technologies d'intégration	323
13.1 Grandeurs électriques caractérisant les performances	323
13.2 État de l'art des performances en fréquences	324
13.3 État de l'art des performances en bruit	327

13.4 État de l'art des performances en puissance	328
13.5 Les besoins technologiques pour la 6G	329
Références	331
Glossaire	336
Index	345

1

LES FONDAMENTAUX

Chapitre 1

Systèmes de communication, de localisation, de détection

L'utilisation des ondes électromagnétiques permet deux grands domaines d'application, celui des communications et celui de la télédétection. Un système de communication permet d'assurer la transmission d'informations entre un ou plusieurs émetteurs et un ou plusieurs récepteurs à travers un canal de transmission (Figure 1.1).

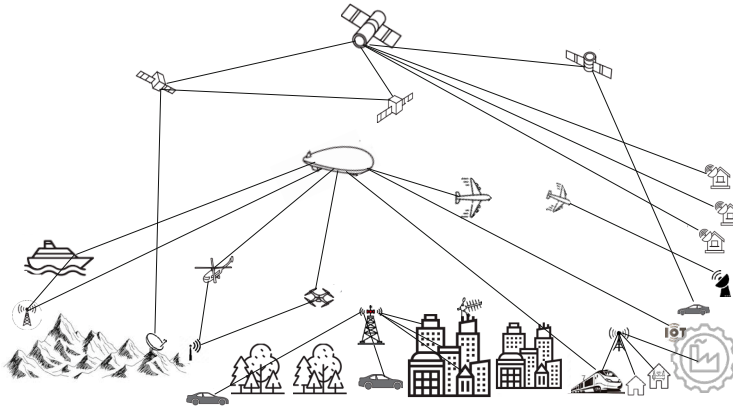


Figure 1.1 – Liaisons de communication

Dans le cas des applications que nous traitons dans ce livre, la transmission se fait essentiellement en espace libre. Cela couvre toutes les applications dites sans fil, ou *Wireless*, c'est-à-dire sans support matériel de transmission. L'air, ou le vide, est dans ce cas le canal de propagation. On distingue les

communications hertziennes et spatiales. Les communications hertziennes permettent des liaisons en espace libre d'un point à un autre point sur Terre, sans passage à travers les couches de l'atmosphère. Les communications spatiales se font avec un passage à travers toutes les couches de l'atmosphère, ce qui modifie les caractéristiques du canal de propagation. Le paragraphe 1.1.2 détaille les caractéristiques des canaux de propagation.

Les communications avec rebonds sur la couche ionosphérique ne sont ni des communications hertziennes ni des communications spatiales, puisqu'il n'y a pas de passage à travers les couches de l'ionosphère, mais elles utilisent les caractéristiques de celle-ci pour générer un phénomène de réflexion.

On distingue les applications *outdoor* et *indoor*, en extérieur ou à l'intérieur des bâtiments. Dans le dernier cas, la modélisation du canal est plus complexe et est analysée dans le paragraphe 1.1.3. Les signaux à transmettre peuvent être analogiques ou numériques.

L'essentiel des applications d'aujourd'hui utilise des transmissions de signaux numériques. Cela impose des étapes de traitement du signal (Figure 1.2) telles que la numérisation des signaux analogiques, puis le codage, la modulation et les fonctions réciproques en réception.

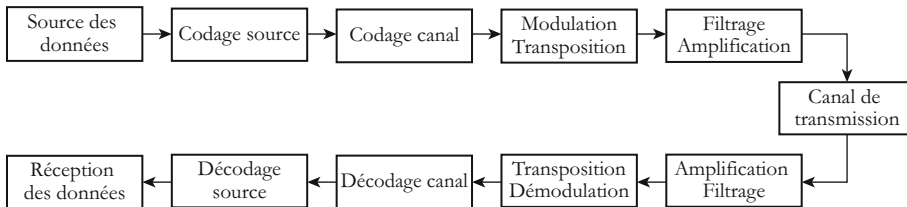


Figure 1.2 – Éléments fondamentaux d'une chaîne de transmission numérique

Un ensemble d'émetteurs et de récepteurs peuvent former un réseau dont les caractéristiques varient en fonction des applications : réseaux de communication mobile, réseaux de capteurs, réseaux satellitaires, etc.

Les systèmes de télédétection utilisent également les ondes électromagnétiques et sont de deux types : télédétection passive et active. Les systèmes passifs détectent naturellement une émission. Un système actif produit sa propre énergie pour illuminer une cible. Le rayonnement réfléchi par la cible est mesuré par le récepteur. On distingue classiquement les dispositifs imageurs et non imageurs.

Le radar, *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging, (Figure 1.3), par exemple, n'est pas un système de communication, mais un système de détection qui peut être imageur ou non.

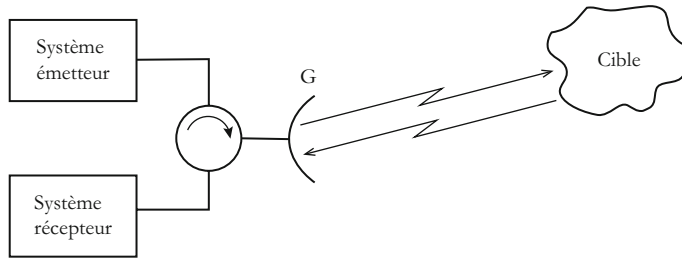


Figure 1.3 – Liaison Radar

1.1 Canal de propagation

Le canal de propagation est l'élément qui se situe entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception. Il est nécessaire de caractériser l'utilisation des ondes électromagnétiques et tous les phénomènes perturbateurs dans la propagation.

1.1.1 Utilisation du spectre électromagnétique

Les applications *Wireless* développées utilisent, pour la transmission des informations, une partie du spectre électromagnétique (Figure 1.4). La fréquence de l'onde porteuse utilisée est liée à la longueur d'onde par la formule : $\lambda = c/f$ avec $c = 3,0 \times 10^8$ m/s.

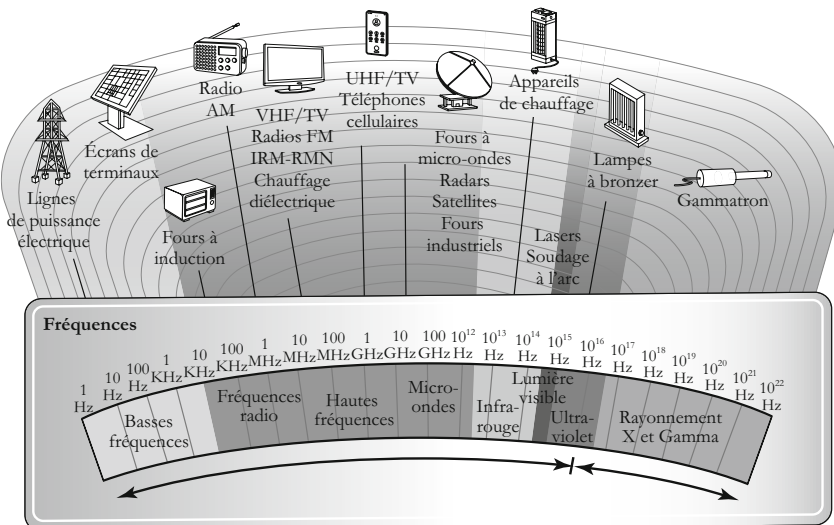


Figure 1.4 – Spectre des ondes électromagnétiques

L'utilisation de ce spectre est gérée par les organismes de normalisation et l'utilisation des bandes de fréquences est répartie en fonction des utilisations et des services : radiodiffusion, radiolocalisation, radioamateur,

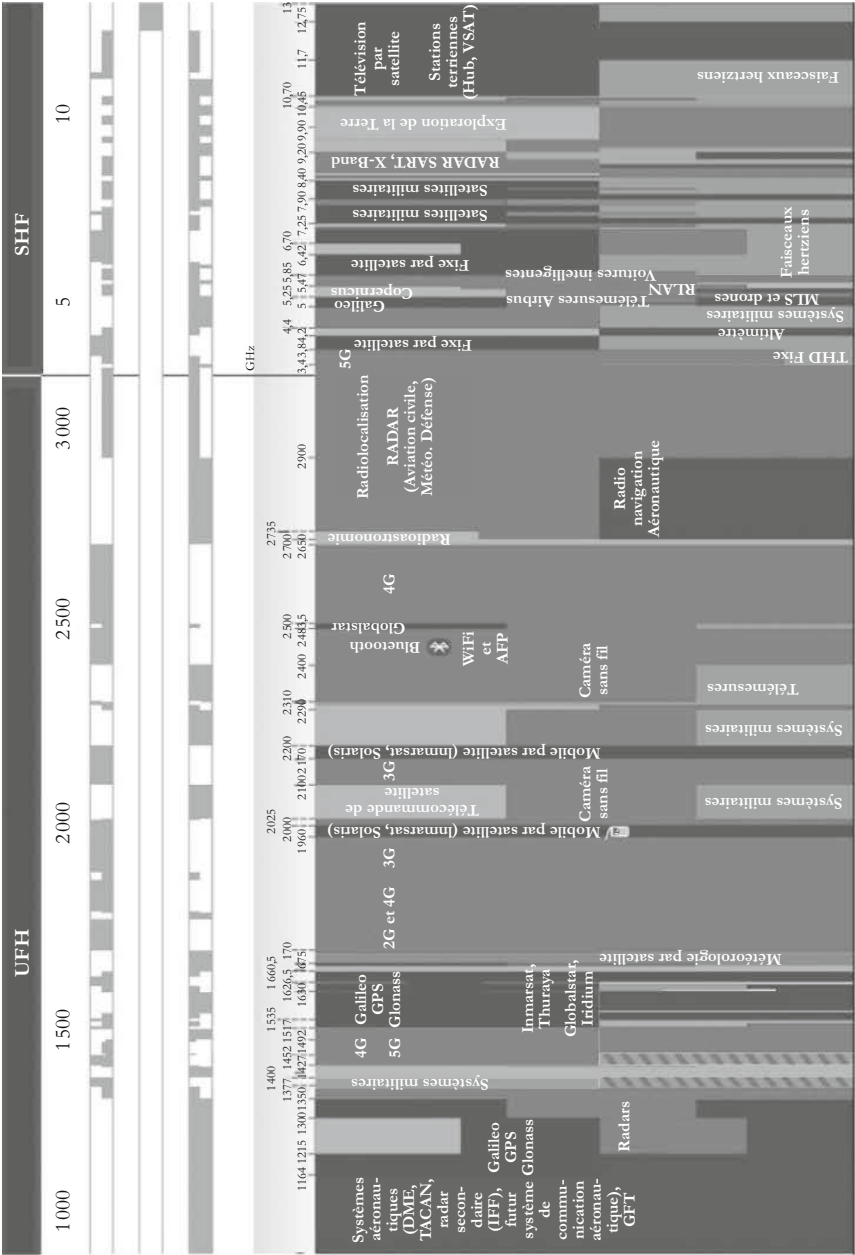


Figure 1.5 – Frise partielle des utilisations du spectre électromagnétique