

Fabien Ndagijimana
François Gaudaire

Au cœur des ondes

Les champs
électromagnétiques
en question

DUNOD

Conception de la couverture : Raphaël Tardif
Photographie de couverture : © Manuel Fernandes - Fotolia.com
Illustrations de l'intérieur : Jacques Sardat

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, 2013
ISBN 978-2-10-058503-8

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.

Table des matières

Introduction	Les champs électromagnétiques en question	I
1	À quoi servent les ondes électromagnétiques ?	3
2	Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?	11
3	Quelles sont les caractéristiques d'une onde électromagnétique ?	19
4	Comment transmet-on des informations avec une onde électromagnétique ?	29
5	Qu'est-ce que la modulation pour la transmission d'une onde électromagnétique ?	37
6	Qu'est-ce que le multiplexage ?	45
7	Quelles sont les caractéristiques d'une antenne ?	53
8	Comment se propagent les ondes électromagnétiques ?	65
9	Comment l'onde électromagnétique interagit-elle avec les matériaux ?	73
10	Comment fonctionnent les matériaux de blindage électromagnétique ?	81
11	Qu'est-ce que la compatibilité électromagnétique ?	89
12	Quelles sont les ondes électromagnétiques émises non intentionnellement par les équipements de notre environnement ?	97
13	Comment fonctionne un réseau de téléphonie mobile ?	105
14	Les émetteurs Wi-Fi et autres applications sans fil dans notre environnement	121
15	Les ondes électromagnétiques pour la radiodiffusion et la télédiffusion	129
16	Quelles sont les interactions entre les ondes électromagnétiques et la matière vivante ?	135

TABLE DES MATIÈRES

17	Quelles sont les différentes configurations d'exposition et comment caractérise-t-on l'exposition ?	141
18	Quelles sont les valeurs limites d'exposition liées aux effets sanitaires et d'où viennent-elles ?	157
Annexe	Tableaux des unités	169
Glossaire	des abréviations utilisées	171
Notes		179
Index		185

Les champs électromagnétiques en question

L'exposition aux ondes électromagnétiques est d'actualité depuis l'utilisation intensive des objets communicants sans fil. La présence d'antennes de stations de base de téléphonie mobile ou d'émetteurs Wi-Fi inquiète les riverains. Les manifestations d'associations contre les ondes électromagnétiques sont devenues fréquentes. Beaucoup de personnes demandent aux pouvoirs publics d'appliquer le principe de précaution, de modifier les normes d'exposition actuelles et de réduire les niveaux d'émission des émetteurs.

Les ondes sont parfois considérées comme faisant partie des nuisances ou de la pollution. Il est cependant important de distinguer les ondes émises volontairement dans le cadre d'un service ou d'une application comme la radiodiffusion, la télédiffusion, la téléphonie mobile ou la transmission d'informations par liaisons sans fil et les rayonnements parasites émis de façon involontaire par les équipements électriques : moteurs, alimentations électriques, lampes fluo compactes... En effet, s'il est possible de limiter par des blindages appropriés le niveau de ces derniers, il apparaît difficile, sauf en supprimant ou en dégradant le service associé, de réduire les ondes électromagnétiques émises par les émetteurs de radiodiffusion ou de téléphonie mobile.

Les rayonnements électromagnétiques diffèrent selon la quantité d'énergie qu'ils transportent et leurs possibilités d'interactions avec la matière. Ils peuvent être décrits par deux modèles physiques complémentaires, soit comme un flux de particules soit comme une onde électromagnétique.

Cet ouvrage explique les principes de fonctionnement des applications utilisant les ondes électromagnétiques afin que le lecteur

puisse mieux comprendre les mécanismes en jeu et appréhender les risques éventuels liés à l'exposition des personnes.

Nous nous limitons au domaine des radiofréquences, c'est-à-dire à l'ensemble des champs électromagnétiques non ionisants rayonnés à des fréquences comprises entre 10 kilohertz et 10 gigahertz environ, correspondant à l'ensemble des applications actuelles de radiocommunication. Nous abordons la problématique de la propagation et de l'exposition aux ondes électromagnétiques. Nous n'abordons pas les effets biologiques et sanitaires qui sont traités dans des ouvrages spécialisés⁰⁻¹. Sur l'ensemble du spectre des radiofréquences, de très nombreuses bandes de fréquences sont réservées pour des applications militaires. Le présent ouvrage ne porte pas sur ces bandes de fréquences militaires classifiées.

Nous abordons ici les aspects techniques comme la propagation, le transport d'information, les techniques de modulation utilisées, l'interaction des ondes avec la matière, le fonctionnement des antennes. À partir d'exemples concrets, nous présentons les principes de fonctionnement, les normes d'exposition et nous répondons aux questions fréquemment posées⁰⁻².

I

À quoi servent les ondes électromagnétiques ?



Les ondes électromagnétiques sont soit d'origine naturelle, soit générées par l'activité industrielle. Dans ce cas, il s'agit d'ondes parasites émises par des équipements électriques ou d'ondes émises intentionnellement pour transmettre des informations correspondant à un service ou une application industrielle donnée. Il existe également des ondes électromagnétiques spécifiques utilisées dans des applications médicales comme la radiothérapie ou l'imagerie.

Tableau 1.1
Origine des ondes électromagnétiques

Foudre, orage	Décharge électrique de forte puissance dans l'air	Origine naturelle
Champ terrestre	Champ magnétique lié à la structure interne de la terre	
Équipements industriels	Distribution électrique, lignes hautes tension, transformateurs électriques, systèmes de chauffage, applications médicales...	Liées à l'activité humaine
Appareils domestiques	Moteurs électriques, régulateurs et transformateurs, équipements domestiques...	
Radiocommunications	Radiodiffusion, télédiffusion, téléphonie mobile, accès multimédia sans fil...	

Les applications industrielles

Dans des applications industrielles, les ondes sont utilisées pour le chauffage, le séchage, la télédétection, la radiolocalisation.

Par exemple, les systèmes de chauffage à micro-ondes utilisent une source d'ondes électromagnétiques de forte puissance à une fréquence de 2,45 gigahertz. Ce principe a longtemps été utilisé en séchage industriel pour la canne à sucre par exemple, avant d'être appliqué au four à micro-ondes domestique.

À QUOI SERVENT LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES ?

Les systèmes de chauffage à induction sont basés sur la production de chaleur sur un support métallique placé dans un champ magnétique variable, à une fréquence située autour de 40 kilohertz. Ce champ magnétique rayonne sous la forme d'une onde électromagnétique à proximité du support. Ce principe a été adapté aux plaques de cuisson domestiques. Il est aussi utilisé comme système de freinage pour les camions ou des machines outils.

Des ondes électromagnétiques sont aussi émises de façon involontaire par des équipements électriques : lignes de distribution électrique, moteurs, transformateurs... Ces émissions sont limitées à la conception et à l'installation des équipements par les normes de compatibilité électromagnétique.

Qui a inventé le four à micro-ondes et quel est son principe de fonctionnement ?

Percy Spencer a eu l'idée d'utiliser les rayonnements micro-ondes pour chauffer les aliments, alors qu'il travaillait pour la société Raytheon à la construction de magnétrons pour les radars de fortes puissances. Alors qu'il était à proximité d'un radar en fonctionnement, il a constaté qu'une barre de chocolat placée dans sa poche avait fondu. Après des tests sur différents aliments, le procédé de chauffage par micro-ondes a été breveté en 1947 et le premier four à micro-ondes industriel a été construit en 1953 par la société Raytheon.

Le principe physique de ce système de chauffage repose sur l'échauffement produit par l'interaction du rayonnement micro-onde émis avec les molécules d'eau. Lorsqu'elles sont soumises à ce rayonnement, les molécules d'eau s'orientent suivant la direction du champ électrique émis. Ce champ électrique est alternatif, c'est-à-dire que son amplitude varie périodiquement dans le temps. Il en résulte des changements d'orientation du champ électrique dans le temps, au même rythme que la fréquence de propagation de l'onde électromagnétique. Cette oscillation du champ électrique produit une absorption d'énergie et donc un dégagement de chaleur.

L'échauffement de l'eau est optimal à la fréquence de 2,45 gigahertz. Pour des fréquences plus basses, des oscillations des molécules d'eau existent mais avec moins d'absorption d'énergie.

Les radiocommunications

Un très grand nombre d'applications, dont les services de diffusion et de télécommunications, utilisent les ondes électromagnétiques comme support pour transmettre et véhiculer de l'information entre un émetteur et un récepteur. Ces informations sont des données, de la voix, des images, de la vidéo. Elles sont liées à différents services : radio et télédiffusion, réseaux de téléphonie mobile, téléphones sans fil, réseaux indépendants (police, secours-incendie), bornes d'accès internet Wi-Fi, radars aériens et maritimes, périphériques informatiques sans fil, talkies-walkies, interphones pour bébé, télécommandes pour la domotique, automobile, systèmes d'alarmes sans fil.

Il existe un grand nombre de systèmes sans fil qui utilise des émetteurs radiofréquences, et participent ainsi au niveau de champ électromagnétique ambiant mesurable dans l'environnement.

Pour l'ensemble de ces systèmes, et dans le contexte de l'exposition du public, il faut distinguer deux configurations d'émetteurs :

- les émetteurs de radiocommunications fixes fonctionnant en permanence : c'est le cas par exemple des émetteurs de radio et télédiffusion ou des antennes de station de base de téléphonie mobile ;
- les émetteurs portables dont l'émission est ponctuelle et liée à un usage déterminé, comme par exemple des talkies-walkies, un téléphone portable, une carte Wi-Fi sur un ordinateur portable.

Le tableau suivant indique les différents services, applications et les bandes de fréquence utilisées.

Tableau 1.2

Application des ondes pour la radiocommunication

Bande de fréquences	Services/Applications
9 kHz - 30 MHz	Radiodiffusion grandes ondes, ondes moyennes et ondes courtes – Détecteurs de victimes d'avalanches – Systèmes de détection antivol – Lecteur de cartes sans contact – Applications médicales
30 MHz - 87,5 MHz	Télédiffusion analogique et numérique – Réseaux professionnels (taxis, pompiers, gendarmerie nationale, réseaux radioélectriques indépendants) – Radioamateurs – Microphones sans fil – Radiolocalisation aéronautique – Radars – Applications médicales
87,5 - 108 MHz	Radiodiffusion en modulation de fréquences
108 - 136 MHz	Gestion du trafic aéronautique
136 - 400 MHz	Télédiffusion analogique et numérique – Réseaux professionnels (police, pompier, SAMU) – Fréquences réservées au vol libre – Gestion du trafic maritime – Radiomessagerie
400 - 470 MHz	Balise ARGOS – Réseaux professionnels (gendarmerie, SNCF, EDF) – Télécommandes et télémessure médicale – Systèmes de commande – Réseaux cellulaires TETRA et TETRAPOL – Applications médicales
470 - 860 MHz	Télédiffusion analogique et numérique
860 - 880 MHz	Bande ISM (Industriel, Scientifique, Médical) : appareils à faible portée type alarmes, télécommandes, domotique, capteurs sans fil, RFID
880 - 960 MHz	Téléphonie mobile (GSM 900)
960 - 1 710 MHz	Radiodiffusion numérique – Réseaux privés – Faisceaux hertziens
1 710 - 1 880 MHz	Téléphonie mobile (GSM 1800)
1 880 - 1 900 MHz	Téléphones sans fil DECT
1 920 - 2 170 MHz	Téléphonie mobile (UMTS)

Bande de fréquences	Services/Applications
2 400 - 2 500 MHz	Réseaux Wi-Fi - Bluetooth – Four à micro-ondes
3 400 - 3 600 MHz	Boucle locale radio large bande (WiMAX)
> 3 600 MHz	Radars – Boucle locale radio – Faisceaux hertziens

En France, l'Agence Nationale des fréquences (ANFR¹⁻¹) gère la réglementation et les autorisations d'installation de l'ensemble des émetteurs fixes installés sur le territoire.

Les équipements émetteurs de radiofréquences sont présents dans l'environnement quotidien depuis une soixantaine d'années avec principalement les émetteurs de radiodiffusion et de télédiffusion déployés dans les années 1950 à 1970, puis les émetteurs de radiodiffusion en modulation de fréquences dans les années 1980. Les usages étaient alors principalement limités à la diffusion massive de signaux de radio et télévision à l'ensemble de la population. Depuis une vingtaine d'années, on assiste à une multiplication des systèmes utilisant des radiofréquences et une diversification des usages associés. On peut citer dès l'apparition et la diffusion massive de la téléphonie mobile :

- le développement des accès internet sans fil ;
- le développement des usages nomades et des équipements portables et mobiles ;
- le développement généralisé du « sans fil » : réseau de capteurs, domotique, informatique...

Beaucoup d'appareils électroniques peuvent être aujourd'hui interconnectés par liaison sans fil et échanger ainsi des informations : consoles de jeux, appareils multimédias, équipements de la maison... Ces liaisons sans fil se rajoutent aux équipements émetteurs d'ondes électromagnétiques présentes dans notre environnement domestique : four à micro-ondes, téléphone sans

fil, systèmes d'alarmes sans fil, systèmes de gestion d'énergie et d'éclairage, domotique.

Les systèmes et applications déployés actuellement comme la radiodiffusion, télédiffusion, la téléphonie mobile, les réseaux sans fil, utilisent des fréquences situées entre 30 kilohertz et 3 gigahertz. La tendance générale avec l'évolution des technologies et des applications sans fil est l'utilisation de fréquences de plus en plus élevées, au-delà de 3 gigahertz. Des fréquences de propagation élevées sont associées à des largeurs de bande de fréquences importantes qui permettent de transmettre des quantités d'informations de plus en plus élevées.

Parmi les applications qui nécessitent des débits élevés, on peut citer par exemple la télédiffusion numérique terrestre (TNT), la téléphonie mobile 3G et 4G ou la télévision mobile personnelle sur Smartphones.

Dans le domaine des réseaux sans fil, de nombreuses applications sont en cours de développement et donnent ou donneront lieu à de nouveaux protocoles de communication, et donc au déploiement et à l'utilisation de nouveaux émetteurs radioélectriques fixes ou intégrés dans des équipements mobiles.

Les applications médicales

Les applications médicales utilisent des ondes électromagnétiques en radiothérapie, en radiographie et en imagerie.

La radiothérapie est une méthode de traitement local des tumeurs qui utilise des radiations de fortes amplitudes pour aider à l'assimilation de médicaments et bloquer la multiplication des cellules cancéreuses.

L'imagerie médicale regroupe les moyens d'acquisition et de restitution d'images en utilisant différents phénomènes physiques tels que l'absorption des rayons X, la résonance magnétique nucléaire, la réflexion d'ondes ultrasons ou la radioactivité auxquels on associe parfois les techniques d'imagerie optique comme l'endoscopie.

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) utilise l'effet d'un champ magnétique intense permettant d'obtenir des coupes virtuelles du corps humain suivant trois plans de l'espace. L'imagerie par résonance magnétique nécessite l'émission d'un champ magnétique puissant et stable qui est produit par un aimant supraconducteur.

L'imagerie par ondes millimétriques est utilisée aujourd'hui dans les scanners de contrôle d'aéroport. Le contraste produit par l'atténuation des différents matériaux diffractant ou traversés par une onde de fréquence autour de 20 gigahertz permet de reconstituer une image et d'identifier des objets.

En bref

Les ondes électromagnétiques sont utilisées depuis longtemps pour les applications de radiodiffusion et télédiffusion. Aujourd'hui, la téléphonie mobile et les applications multimédia sans fil les rendent plus présentes et proches des personnes. Elles sont aussi utilisées dans des applications industrielles, des applications médicales ou générées par des équipements électriques. De nouvelles applications de radiocommunications sont en permanence développées. Elles utilisent des ondes électromagnétiques associées à des systèmes de transmission de plus en plus complexes.

2

Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?



Une onde électromagnétique est la vibration d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui varient dans le temps et peuvent se propager dans l'air ou dans le vide.

Il existe des ondes électromagnétiques générées par l'activité industrielle et les équipements de radiocommunication, et des ondes d'origine naturelle comme par exemple l'onde de foudre due à la présence de charges électriques dans l'atmosphère. La valeur du champ électrique naturel terrestre varie entre quelques dizaines de volts par mètre par temps stable et quelques dizaines de milliers de volts par mètre par temps d'orage. Le champ magnétique terrestre est de l'ordre de 40 microteslas à la latitude de la France.

Une onde électromagnétique est produite par un courant électrique et une tension électrique dans un conducteur. Elle se propage ensuite dans l'air ou dans le vide sans support matériel, contrairement par exemple aux ondes acoustiques ou mécaniques. Ces dernières se propagent par déplacement de matière comme une vague sur la surface de l'eau.

Il existe en physique deux théories pour décrire et comprendre les ondes électromagnétiques : la théorie ondulatoire et la théorie corpusculaire. La théorie ondulatoire décrit les ondes par les lois de l'optique géométrique, sous forme par exemple de propagation de rayons. La théorie corpusculaire décrit les ondes sous forme de particules énergétiques élémentaires. Les travaux des physiciens Thomas Young et Albert Einstein ont montré qu'une onde électromagnétique peut être décrite par l'une ou l'autre des deux théories.

Dans cet ouvrage, nous allons considérer une onde électromagnétique comme l'association d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui se propagent et qui interagissent sous forme de tensions et de courants électriques avec les objets de l'environnement.

Les ondes électromagnétiques sont utilisées pour transmettre des informations ou sont simplement produites par un courant