

plus fréquemment atteintes d'un gliome cérébral que les personnes peu exposées. Dans le cas des personnes atteintes, la tumeur était plus souvent localisée du côté où le téléphone mobile était utilisé. Mais l'étude de ces résultats et de la façon dont ils ont été obtenus semble indiquer que certains d'entre eux proviennent de biais d'interprétation.

Quant aux études de L. Hardell, plus alarmistes, elles ont d'ores et déjà fait l'objet de critiques, car elles présenteraient des erreurs méthodologiques. Le groupe de travail du CIRC a néanmoins conclu que les résultats ne sont probablement pas uniquement dus à des biais ou des erreurs. C'est la raison pour laquelle il a considéré qu'un effet causal ne peut être totalement exclu à ce jour, tout au moins en ce qui concerne les gliomes et les neurinomes acoustiques. Les données pour les autres types de cancer (lymphomes, méningiomes etc.) ont été jugées insuffisantes pour que le CIRC rende un avis.

Le CIRC a donc classé les radiofréquences dans la catégorie 2B, c'est-à-dire celle des agents « peut-être cancérogènes pour

l'homme », la même classification que celle des champs magnétiques de très basses fréquences. Rappelons que le café, la laine de verre ou le styrène sont d'autres exemples d'agents classés dans cette catégorie 2B. Cette classification est un signal important, mais il ne faut pas lui donner plus de signification qu'elle n'en mérite, puisqu'elle indique que ces ondes sont des agents cancérogènes possibles, mais non pas probables.

Quelles conclusions ?

Dans ce domaine où les résultats scientifiques – essentiellement négatifs, rappelons-le – s'accumulent au fil des années et où nous n'avons pas un recul suffisant pour avoir des études épidémiologiques tout à fait fiables, nous avons essayé de faire un état des lieux. Ainsi, les lignes à haute tension semblent indiquer une augmentation des leucémies infantiles de un cas pour une population de 35 millions de personnes, sans que la relation de cause à effet n'ait pu être démontrée. En ce qui concerne les radiofréquences, les intensités utilisées pour

la téléphonie mobile ou pour les antennes relais sont insuffisantes pour produire le seul effet réellement connu qui pourrait être nocif, à savoir un effet thermique. Les méta-analyses des études fiables n'indiquent pas d'effet sur la santé. Toutefois, comme il est impossible de prouver une absence d'effet, et que le CIRC a classé les radiofréquences dans la catégorie des agents peut-être cancérogènes pour l'homme, on peut conseiller d'utiliser une oreillette et d'éviter l'usage du téléphone portable dans des zones où la réception est mauvaise, car, dans ces conditions, l'intensité de l'émission des ondes par le téléphone augmente.

Enfin, en ce qui concerne les enfants, beaucoup sont suivis et les résultats des études prospectives à long terme permettront de savoir si les ondes radiofréquences ont ou non un effet sur leur santé. Toutefois, les résultats ne seront pas disponibles avant... une vingtaine d'années. Dès lors, mieux vaut éviter que les jeunes enfants n'abusent du téléphone portable. Peut-être pourrait-on recommander de privilégier les SMS, car le téléphone est alors plus loin du cerveau... ■



Comment on attribue les fréquences

Jean-Jacques Guitot

Téléphonie mobile, télévision, radio, radars, Wi-Fi...

Chaque service de radiocommunication émet dans une bande de fréquences précise. Leur attribution dépend de nombreux paramètres scientifiques, techniques... et économiques.

Le 15 juin dernier, le gouvernement a ouvert la procédure d'attribution des licences de téléphonie mobile de quatrième génération (4G) en publiant au *Journal officiel* les arrêtés relatifs aux conditions d'attribution et d'utilisation de fréquences dans les bandes 2,6 gigahertz et 800 mégahertz en France métropolitaine. Ces fréquences serviront à déployer les réseaux de la prochaine génération de téléphonie mobile, lesquels permettront des connexions à très haut débit en mobilité – plusieurs dizaines de mégabits par seconde, contre un mégabit par seconde actuellement avec la génération 3G – avec un objectif de 100 mégabits par seconde d'ici quelques années.

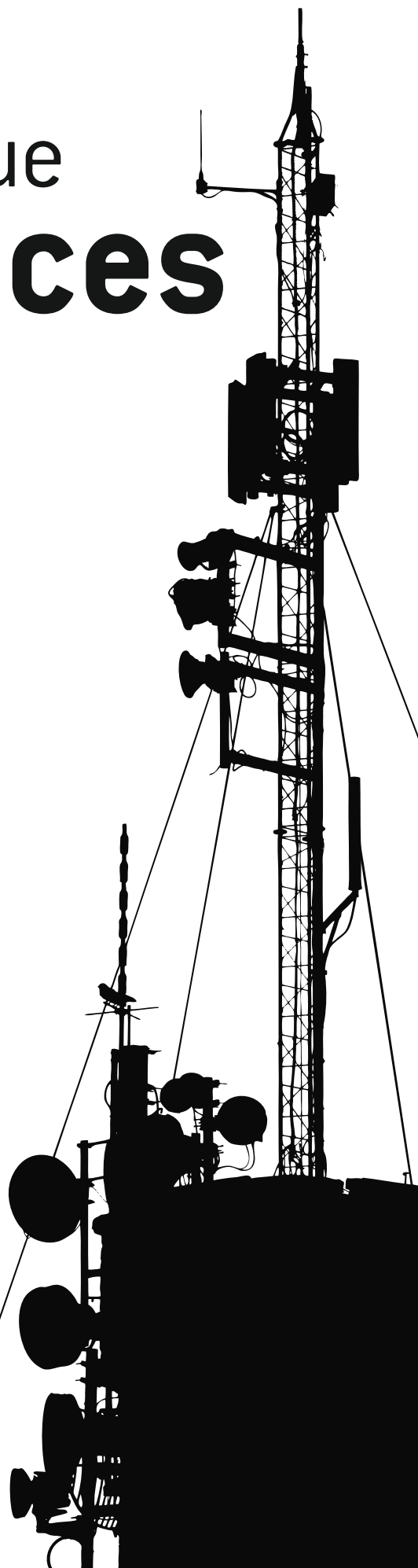
Les prix de réserve fixés par l'État reflètent l'enjeu économique que représentent ces bandes de fréquences et la forte compétition qui oppose les opérateurs candidats aux attributions de blocs de fréquences: 700 millions d'euros pour la bande 2,6 gigahertz, et 1,8 milliard d'euros pour la bande 800 mégahertz.

L'enjeu de l'accès au spectre est de taille en effet, car il s'agit d'une ressource limitée: selon la définition de l'Union internationale des télécommunications, les ondes radioélectriques sont des ondes électromagnétiques se propageant dans l'espace sans guide artificiel et, par convention, de fréquence inférieure à 3000 gigahertz. Avec l'explosion des moyens de radiocommu-

nication de tous types et malgré l'évolution des techniques, les fréquences encore disponibles et exploitables se font rares.

L'utilisation du spectre est réglementée: il s'agit d'une ressource internationale, et chaque État est souverain pour le spectre utilisé sur son territoire. En France, il appartient au domaine public. Comment optimiser l'usage de cette ressource naturelle, collective, permanente et omniprésente au bénéfice de la société? Comment intégrer de nouveaux modes de communication répondant aux exigences actuelles de débit, de couverture et de cohérence internationale, sans brouillage des signaux? Tel est le casse-tête quotidien des diverses institutions internationales et nationales chargées de la gestion de cette ressource.

Pour comprendre les enjeux et les difficultés de l'attribution des fréquences, et la façon dont elle s'opère aujourd'hui, il faut savoir que la plupart des applications de radiocommunication – radio, télévision, communication en mer, défense, radioamateur, alarmes, implants médicaux, etc. – fonctionnent sur le même principe: une ou plusieurs ondes dites porteuses servent de support de transmission des informations (voir l'encadré page 136). La régulation des fréquences porte sur les fréquences de ces ondes porteuses et non sur l'information transmise.



En pratique, les attributions de fréquences pour les radiocommunications ne portent pas sur des fréquences pures, mais sur des canaux, constitués de bandes du spectre dont la position et la largeur dépendent des propriétés physiques des ondes et des contraintes liées à l'utilisation envisagée.

Des contraintes physiques

Dans un premier temps, on attribue des bandes de fréquences aux services de radiocommunication, c'est-à-dire aux différents types de radiocommunication (mobile terrestre, mobile par satellite, radiodiffusion, trafic maritime, amateur, etc.), en fonction de leurs objectifs. Le spectre des fréquences radioélectriques ne présente pas des qualités homogènes : selon sa fréquence, une onde se propage par voie directe, par réflexion ou par diffraction, et sa propagation dépend de l'environnement. Les atténuations de propagation sont plus importantes lorsque la fréquence s'élève, favorisant ainsi la densification des stations d'émission. Enfin, la réception de l'onde peut être perturbée par les bruits parasites naturels et industriels, qui varient dans le spectre des fréquences. Certaines régions du spectre sont ainsi moins propices que d'autres à l'exploitation de certains services de radiocommunication selon les caractéristiques de l'usage recherché : type d'information véhiculé (voix, vidéo, données), degré de mobilité souhaité (fixe, nomade, mobile), technique de traitement du signal, couverture géographique...

Par exemple, entre 30 mégahertz et 6 gigahertz, les réflexions des ondes porteuses sur les obstacles deviennent négligeables devant les diverses atténuations dues à la propagation et aux bruits radioélectriques naturels ou industriels.

Cela en fait une portion très demandée. Mais plus la fréquence est élevée, plus les obstacles perturbent et atténuent le signal. Les bandes entre 300 mégahertz et 3 gigahertz sont donc les plus recherchées pour la télévision, la radiotéléphonie cellulaire de deuxième (norme GSM), troisième et quatrième (normes UMTS et LTE) générations, la radiotéléphonie professionnelle (police, pompiers, ambulances, taxis, transports publics...) ou encore les communications aéronautiques et militaires. Mais ces bandes contiennent aussi les radars, les systèmes de navigation GPS et *Galileo*, le système mondial de détresse et de sécurité en mer, les radioamateurs ainsi que l'exploration de la Terre par satellite ou la radioastronomie (voir la figure 2).

Dans un deuxième temps, à l'intérieur des bandes attribuées à chaque service de radiocommunication, des canaux sont assignés aux diverses applications (telle la 4G dans le service mobile terrestre), en tenant compte de la largeur de bande occupée. Celle-ci dépend notamment du signal et du débit de l'application à transmettre, de la puissance rayonnée, du gain de l'antenne, de la polarisation de l'onde transmise.

Aujourd'hui, on distingue 19 services de radiocommunication terrestre, 26 par satellite, chaque service pouvant regrouper plusieurs applications différentes (par exemple, dans le service de radiodiffusion, on trouve la radio sonore, la télévision analogique et la télévision numérique). Plusieurs services pouvant par ailleurs se partager la même bande de fréquences, l'attribution des fréquences peut vite devenir un casse-tête, d'autant qu'outre l'industrie des télécommunications, elle implique nombre d'acteurs publics et privés tels que l'État, les autorités administratives indépendantes (le Conseil supérieur de l'audiovisuel et l'Autorité de régulation des postes et des communications électroniques), ainsi que les collectivités territoriales et, bien sûr,

L'ESSENTIEL

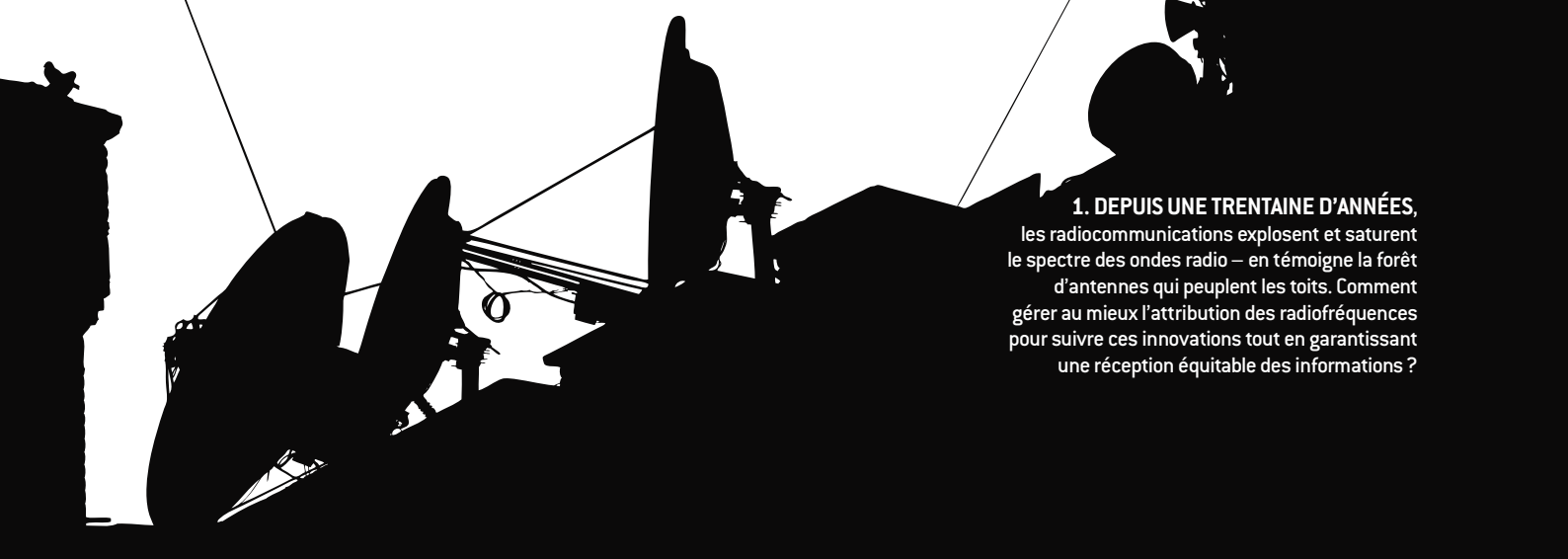
✓ Le spectre des ondes radio est une ressource limitée.

✓ Les contraintes techniques restreignent le spectre exploitable pour la télécommunication.

✓ Or les services de radiocommunication se multiplient.

✓ Pour repousser ces limites, la régulation de l'attribution des fréquences, gérée conjointement aux échelles internationale et nationales, intègre en permanence les nouveaux paramètres scientifiques, techniques, économiques et sociaux.

1. DEPUIS UNE TRENTAINE D'ANNÉES, les radiocommunications explosent et saturent le spectre des ondes radio – en témoigne la forêt d'antennes qui peuplent les toits. Comment gérer au mieux l'attribution des radiofréquences pour suivre ces innovations tout en garantissant une réception équitable des informations ?



L'AUTEUR

Jean-Jacques GUITOT est responsable du Département planification et prospective au sein de l'Agence nationale des fréquences (ANFR).

BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Chaduc, *La gestion des fréquences*, Hermès Science, 2005.

SUR LE WEB

Rapport annuel 2010 du Conseil supérieur de l'audiovisuel, CSA, 2011.
www.csa.fr/rapport2010/

Organisation et évolution de la gestion du spectre, Rapport du groupe de travail du conseil d'administration de l'Agence nationale des fréquences, 2008.
www.anfr.fr

Fréquences : vers une flexibilité harmonieuse, *La lettre de l'Autorité*, n°46, 2005.
www.arcep.fr

les usagers. Afin d'optimiser la gestion de la ressource hertzienne, des réglementations techniques normalisent les conditions d'émission et de réception.

Une gestion mondiale et nationale

La gestion des fréquences se fait à différents niveaux : global dans le cadre de l'Union internationale des télécommunications et local autour de l'Agence nationale des fréquences. Si le niveau national donne le cadre juridique aux utilisateurs de fréquences, l'Europe impose les directives sur la libre circulation des terminaux et sur l'harmonisation de l'utilisation du spectre.

La coordination internationale des fréquences est un impératif. Non seulement les ondes ne connaissent pas les frontières, mais les utilisateurs d'équipements radioélectriques s'attendent à pouvoir les utiliser partout. Les règles d'attribution, de partage et d'harmonisation des fréquences se décident à l'Union internationale des télécommunications. En Europe, elles sont préparées au sein de la Conférence européenne des administrations des postes et des télécommunications, qui regroupe les 48 administrations européennes, au-delà des pays membres

de l'Union européenne. Par ailleurs, l'Union met en place un programme politique pluriannuel qui assurera la coordination entre les États membres et l'utilisation efficace du spectre, afin de doper la croissance économique sur tout le territoire de l'Union européenne.

Cette organisation a permis de développer les technologies numériques : téléphonie mobile de deuxième (GSM) et troisième (UMTS) générations, téléphonie sans fil (DECT), radiocommunication numérique professionnelle (TETRA) et radiodiffusion sonore (T-DAB), télévision numérique terrestre (DVB-T), transmission entre antennes fixes (faisceaux hertziens), appareils de faible puissance tels les implants médicaux, ou encore *Galileo*, l'équivalent européen du GPS.

Le Règlement des radiocommunications, qui coordonne la gestion des fréquences à l'échelle mondiale, est revu tous les quatre ans au cours de conférences mondiales (la prochaine aura lieu en 2012). Il engage les États : après une analyse prenant en compte l'évolution des connaissances scientifiques et techniques, chaque administration propose des modifications du règlement. Les membres de l'Union internationale des télécommunications évaluent ces mesures, qui, une fois approu-

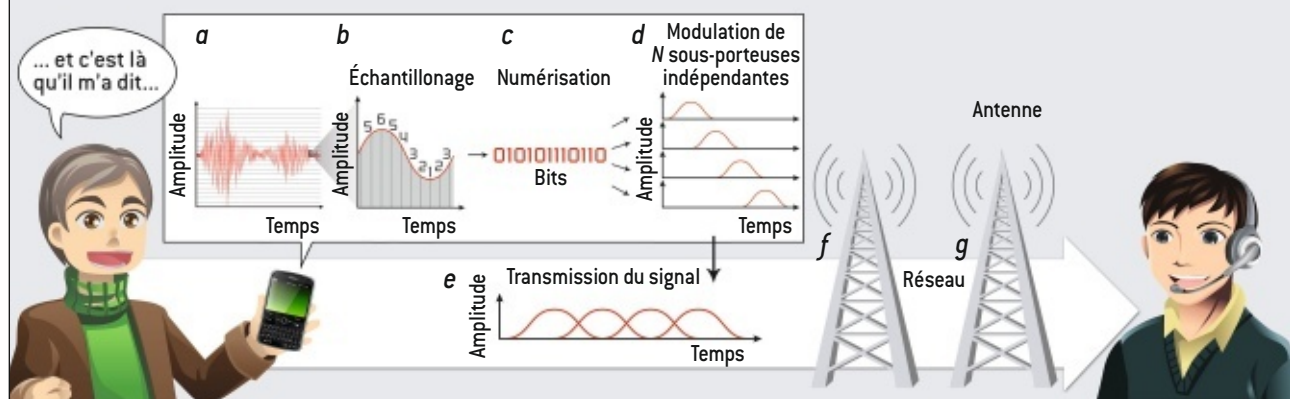
COMMENT UN TÉLÉPHONE MOBILE TRANSMET VOTRE VOIX

Lors d'une conversation par téléphonie mobile, l'onde acoustique de la voix (de fréquence de l'ordre du kilohertz) subit plusieurs transformations dans le téléphone mobile afin d'être transmise à l'antenne la plus proche de l'opérateur. Elle est transformée en une onde électromagnétique (a), échantillonnée (b, à intervalles de temps réguliers, un nombre est attribué à l'amplitude

de l'onde) et numérisée (c, chaque nombre est codé en bits) au fur et à mesure. Au fil de leur constitution, les bits modulent en amplitude une onde porteuse (de fréquence de l'ordre du gigahertz). Dans le cas de la téléphonie 4G, l'onde porteuse est constituée de plusieurs sous-porteuses, qui sont suffisamment déphasées les unes par rapport aux autres pour être indépendantes (d). Au moment de

leur codage, plusieurs bits (un bloc de bits) modulent une sous-porteuse, puis la suivante, etc. Le signal transmis est une onde porteuse constituée de l'ensemble de ces sous-porteuses modulées (e). Nommée OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), cette technique non seulement augmentera le débit d'un facteur 100 par rapport aux techniques de la génération 3G, mais réduira

les erreurs de reconstitution du signal en garantissant un écart suffisant entre les blocs de bits sur une même sous-porteuse. Émise par l'antenne du téléphone, l'onde porteuse modulée est détectée par une antenne de l'opérateur (f), transmise via son réseau jusqu'à l'antenne la plus proche de l'interlocuteur (g), puis démodulée par le téléphone récepteur, qui restitue alors l'onde acoustique de la voix.



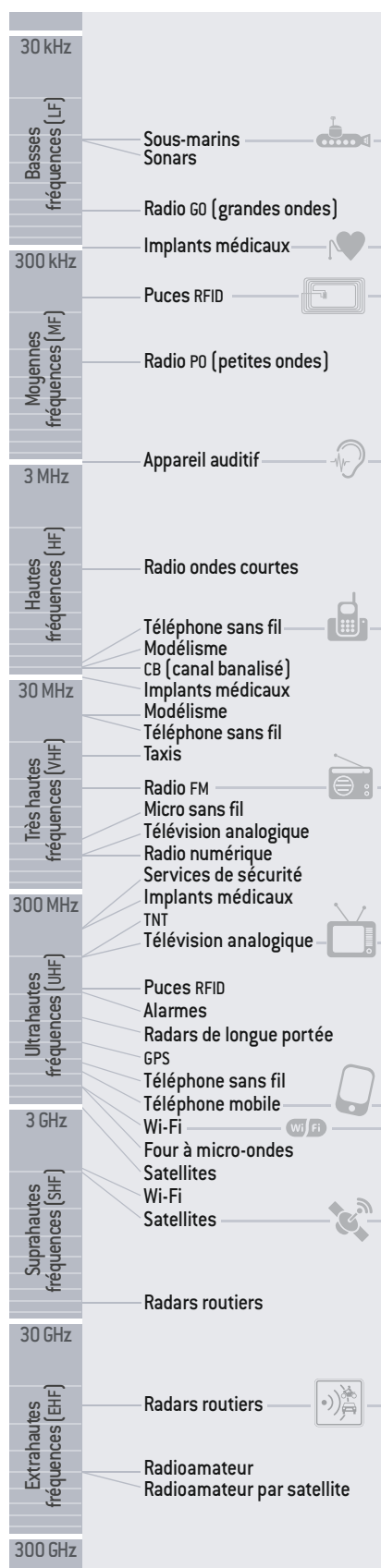
Pour la Science, © Shutterstock/Artisticco, Igor Nazarenko, zphoto, cobal88, Malson, Christoph Weiss

vées, sont appliquées dans chaque État. Par ailleurs, l'Union internationale des télécommunications organise des conférences régionales afin de définir de façon équitable les ressources spectrales attribuées à chaque pays. La dernière conférence de ce type, en 2006, a ainsi fixé le cadre pour la planification de la télévision numérique terrestre dans certaines régions du monde.

Les planifications des bandes de fréquences doivent tenir compte des systèmes existants ou envisagés dans les autres bandes. Par exemple, un groupe de travail de l'Union internationale étudie le réaménagement, au profit du service mobile, de la bande 790-862 mégahertz, nommée dividende numérique, rendu possible par le passage de la télévision analogique à la télévision numérique.

En France, le spectre des fréquences radioélectriques appartenant au domaine public, l'État a la responsabilité de le gérer, d'en planifier et d'en contrôler les usages. Ces missions ont été confiées à l'Agence nationale des fréquences en collaboration avec les affectataires de portions du spectre. Ces affectataires sont des autorités administratives indépendantes : Conseil supérieur de l'audiovisuel (CSA), Autorité de régulation des postes et des communications électroniques (ARCEP), ministères (défense, intérieur, aviation civile, météorologie, espace, recherche), ainsi que les autorités représentant l'État dans les collectivités d'outre-mer. Elles ont la responsabilité d'assigner les fréquences, c'est-à-dire de donner les autorisations pour leur utilisation, selon les conditions fixées par l'Union internationale. L'ARCEP gère ainsi les autorisations d'utilisation des fréquences pour la future génération de réseaux de haut débit mobile (4G). L'aviation civile, quant à elle, autorise les fréquences des communications aéronautiques, des radars, etc.

En fonction des services de radiocommunication, la répartition des fréquences entre les affectataires est fixée par le Tableau national de répartition des bandes de fréquences et fait l'objet d'un arrêté du premier ministre. Cette répartition évolue en fonction des demandes des secteurs marchand et non marchand. Les changements d'affectation de bandes de fréquences se font à l'occasion de l'introduction de nouvelles technologies, telle la télévision numérique, ou à la suite de décisions à l'échelle nationale ou mondiale.



2. LE SPECTRE DES ONDES RADIO est largement exploité par nombre de services de télécommunication, dont les principaux sont représentés ici.

Ces changements entraînent parfois des réaménagements, lesquels sont, si nécessaire, facilités par des mécanismes de compensation financière à travers le Fonds de réaménagement du spectre, géré par l'Agence nationale des fréquences. Les réaménagements s'accompagnent souvent de travaux importants et coûteux – addition de systèmes de filtrages, modification de modulation ou remplacement d'équipements fonctionnant sur d'autres fréquences –, voire d'une remise en cause de l'organisation ou des missions des opérateurs libérant les fréquences.

Densifier l'utilisation du spectre

La quatrième génération de téléphonie mobile sera opérationnelle en France en 2012. Des améliorations de cette génération sont déjà envisagées, et la cinquième génération est évoquée. Les innovations s'y prêtant, les usages évoluant, la demande de disponibilité en fréquences est toujours croissante. Si autrefois la gestion du spectre a consisté à définir des règles de partage des fréquences selon des critères de séparation géographique, les réflexions actuelles visent à optimiser ce partage. D'un point de vue technique, on cherche à augmenter le nombre de services de radiocommunication dans une même bande de fréquences en introduisant des méthodes d'accès dynamique et opportuniste à cette bande (partage temporel ou fréquentiel de la bande). Des méthodes fondées sur des considérations économiques sont aussi envisagées pour densifier l'utilisation des fréquences, telles l'ouverture de marchés secondaires (revente, par des exploitants, de portions de leur spectre) ou la vente aux enchères de bandes libérées.

Néanmoins, la gestion du spectre hertzien est une activité de long terme. Les activités et les pratiques évoluent. Si aujourd'hui la téléphonie mobile est au cœur des discussions, nombre d'autres réflexions sont en cours. L'Union internationale des télécommunications a ainsi inscrit à l'ordre du jour de sa prochaine conférence mondiale 25 demandes d'utilisation de fréquences, allant des besoins de fréquences pour assurer la sécurité d'exploitation des systèmes d'aéronef sans pilote jusqu'à l'utilisation par les services passifs (météorologie, exploration passive de la Terre par satellite) des fréquences comprises entre 275 et 3 000 gigahertz. ■

Pour la Science, © Shutterstock/soyinh, Ecolop, hbas, tele2, aller, VectorForEver, sketch

Mémento des

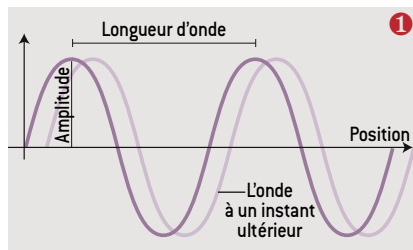
Les ondes, sous leurs nombreuses formes, constituent un aspect essentiel de la réalité physique. En voici les principales notions et un panorama.

ONDES

NOTIONS ÉLÉMENTAIRES

Le terme **ONDE** désigne en général la propagation de proche en proche, à une vitesse finie, de la perturbation d'une certaine grandeur physique (déplacement transversal dans le cas d'une corde vibrante, variation de la hauteur de l'eau dans le cas d'une onde à la surface d'un lac, amplitude et direction du vecteur champ électrique ou magnétique dans le cas d'une onde électromagnétique, etc.).

Une situation répandue et importante sur le plan théorique est celle où la grandeur qui se propage oscille de façon sinusoïdale; dans ce cas, on parle d'**ONDE SINUSOÏDALE** ou d'**ONDE MONOCHROMATIQUE**. Une telle onde se caractérise principalement par sa longueur d'onde ou sa fréquence, son amplitude, sa vitesse et sa direction de propagation ❶.



L'**AMPLITUDE** A de l'onde sinusoïdale est le maximum, en valeur absolue, atteint par la grandeur qui oscille. Selon le contexte, le même terme désigne parfois la valeur algébrique $a(r, t)$ de cette grandeur à un instant t et en un point r donnés.

La **LONGUEUR D'ONDE** λ (lettre grecque *lambda*) est la distance minimale qui sépare, le long de la direction de propagation, deux points se trouvant dans exactement le même état d'oscillation à tout instant.

La **FRÉQUENCE** ν (lettre grecque *nu*) est, en chaque point, le nombre de cycles d'oscillation par unité de temps.

La **PULSATION** ω (lettre grecque *oméga*) désigne la quantité $\omega = 2\pi\nu$; elle est parfois abusivement appelée aussi fréquence.

La **PÉRIODE** T est la durée d'un cycle d'oscillation. Fréquence et période sont inverses l'une de l'autre: on a $\nu = 1/T$. Et si l'on note c la vitesse de propagation de l'onde, on a $\lambda = cT$.

Le **VECTEUR D'ONDE** est le vecteur $\mathbf{k}$ qui a pour norme (ou longueur) $k = 2\pi/\lambda$ et qui est dirigé dans le sens de la propagation. Le **NOMBRE D'ONDE** désigne en général le nombre $1/\lambda$, c'est-à-dire le nombre de longueurs d'onde contenues dans une unité de longueur.

À une dimension, on peut représenter une onde sinusoïdale se propageant le long de l'axe Ox , dans le sens positif de cette direction, par l'expression:

$$a(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \phi).$$

La **PHASE** ϕ (lettre grecque *phi*) est un angle qui caractérise le décalage (dans le temps ou l'espace) des états d'oscillation entre l'onde sinusoïdale considérée et une onde identique, mais qui atteint son amplitude positive maximale à l'instant $t = 0$ et pour l'abscisse $x = 0$. Le décalage entre deux ondes sinusoïdales semblables $A \cos(\omega t - kx + \phi)$ et $A' \cos(\omega t - kx + \phi')$ est caractérisé par leur **DÉPHASAGE** $\Delta\phi = \phi' - \phi$.

Une onde de forme (spatiale ou temporelle) quelconque peut être assimilée à la somme d'un nombre fini, d'une infinité dénombrable ou d'une infinité continue d'ondes sinusoïdales de fréquences et amplitudes différentes. La composition en fréquences d'une onde, avec les amplitudes respectives, définit son **SPECTRE**.

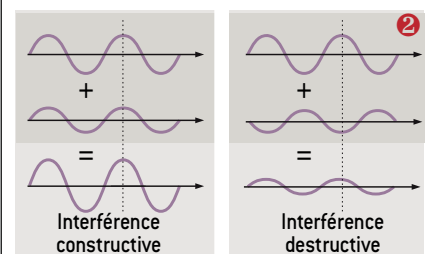
INTERFÉRENCES ET ONDES STATIONNAIRES

Lorsque deux ondes $a_1(r, t)$ et $a_2(r, t)$ se propagent dans une même région de l'espace, leur superposition crée des

INTERFÉRENCES ❷. Si les amplitudes des ondes ne sont pas trop élevées, on est dans un régime dit linéaire (cas classique) et les deux ondes s'additionnent: en chaque point r et à tout instant t , l'onde résultante $a(r, t)$ est égale à la somme des deux ondes:

$$a(r, t) = a_1(r, t) + a_2(r, t).$$

C'est le **PRINCIPE DE SUPERPOSITION LINÉAIRE**.



Pour deux ondes sinusoïdales de même fréquence, se propageant à la même vitesse et dans le même sens, on a **INTERFÉRENCE CONSTRUCTIVE** si les deux ondes sont en phase (déphasage nul, les amplitudes s'ajoutent) et **INTERFÉRENCE DESTRUCTIVE** si les deux ondes sont en opposition de phase (déphasage égal à $\pm\pi$, les amplitudes se soustraient).

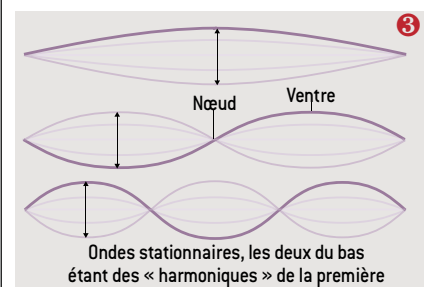
Lorsqu'une onde sinusoïdale s'ajoute à une onde identique, mais se propageant dans le sens opposé, le résultat est une **ONDE STATIONNAIRE** ❸:

$$\text{si } a_1(x, t) = A \cos(\omega t - kx)$$

$$\text{et } a_2(x, t) = A \cos(\omega t + kx),$$

$$\text{alors } a(x, t) = a_1(x, t) + a_2(x, t) =$$

$$2A \cos kx \cos \omega t.$$

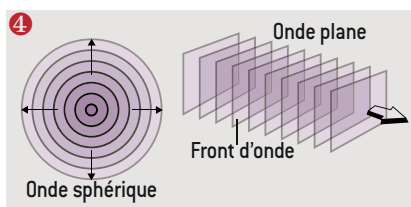


L'amplitude de l'oscillation, égale à $2A \cos kx$, varie périodiquement selon la position. Les positions x pour lesquelles cette amplitude est nulle sont les **NŒUDS** de l'onde stationnaire ou de l'oscillation; les positions x pour lesquelles l'amplitude est maximale en valeur absolue sont les **VENTRES** de l'onde stationnaire. Par opposition à une onde stationnaire où il n'y a pas de propagation, une onde ordinaire est qualifiée d'**ONDE PROGRESSIVE** ou **PROPAGATIVE**.

Plus généralement, à une ou plusieurs dimensions, une onde stationnaire correspond à une oscillation de la forme $a(r, t) = A(r)B(t)$, où B est une fonction sinusoïdale du temps t . La fonction $A(r)$ indique comment l'amplitude de l'oscillation varie dans l'espace. La fréquence d'oscillation et la répartition des nœuds et des ventres, spécifiée par la fonction $A(r)$, définissent le **MODE D'OSCILLATION** du système considéré. Une onde stationnaire est en général créée par une onde se propageant dans un espace limité (une cavité par exemple) et qui se réfléchit sur les bords de cet espace.

ONDES PLANES OU SPHÉRIQUES

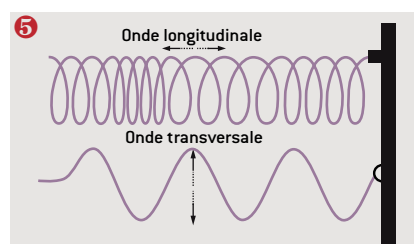
Pour une onde sinusoïdale se propageant dans l'espace à trois dimensions, les **FRONTS D'ONDE** sont les surfaces formées des points où la phase de l'onde est identique. Pour une **ONDE PLANE**, dont les caractéristiques sont les mêmes sur chaque plan perpendiculaire à l'axe de propagation, les fronts d'onde sont des plans. Pour une **ONDE SPHÉRIQUE** émise par un point central, les fronts d'onde sont des sphères centrées sur ce point ④.



ONDES TRANSVERSALES ET POLARISATION

On parle d'**ONDES LONGITUDINALES** lorsque la grandeur qui oscille est un vecteur de même direction que l'axe de propagation, et d'**ONDES TRANSVERSALES** quand ce vecteur est perpendiculaire à l'axe de propagation ⑤. Dans le cas d'ondes transversales, la direction du vecteur oscillant définit la **POLARISATION** de l'onde: si ce vecteur a une direction fixe, on a une **POLARISATION LINÉAIRE**; si le vecteur tourne autour de l'axe de propagation, on a une

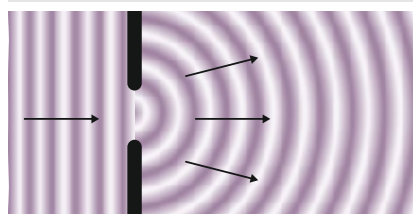
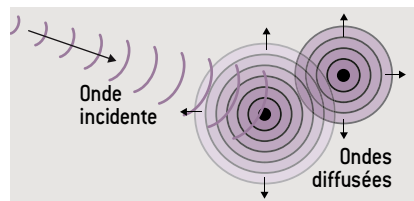
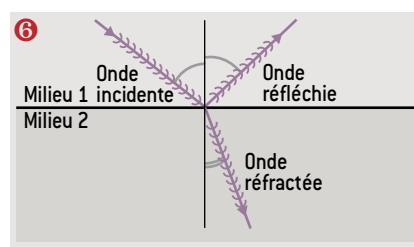
POLARISATION CIRCULAIRE, gauche ou droite selon le sens de rotation.



RÉFLEXION, RÉFRACTION, DIFFUSION, ETC.

Une onde incidente peut être réfléchi à l'interface de deux milieux différents. Cette **RÉFLEXION** a lieu avec un angle symétrique de l'angle d'incidence et dans le plan contenant l'axe d'incidence et la perpendiculaire à l'interface. L'onde incidente peut aussi traverser l'interface en étant déviée: c'est la **RÉFRACTION** ⑥. L'angle de réfraction dépend de l'angle d'incidence et des indices de réfraction des deux milieux. L'**INDICE DE RÉFRACTION** est le rapport c/v , où c est la vitesse de l'onde dans le vide (ou dans l'air) et v cette vitesse dans le milieu matériel. La vitesse de propagation de l'onde, donc l'indice de réfraction, dépend en général de la fréquence de l'onde. Pour une onde formée de plusieurs composantes monochromatiques, ces dernières se propagent donc à des vitesses différentes; c'est le phénomène de **DISPERSION**.

Lorsqu'une onde rencontre, sans être absorbée, un objet de taille proche de la longueur d'onde ou plus petit, elle est généralement renvoyée dans de multiples di-



rections: c'est la **DIFFUSION**. Une diffusion par un ensemble de particules disposées aléatoirement brouille la cohérence ondulatoire. Dans d'autres cas (diffusion par les atomes ordonnés d'un cristal, diffusion par les bords d'un trou de forme régulière, etc.), cette cohérence se maintient et l'on a alors des interférences bien caractérisées. On parle alors de **DIFFRACTION**.

ONDES ÉLASTIQUES DANS UN FLUIDE

Si, dans un milieu matériel, les atomes ou molécules soumis à un déplacement subissent une force qui les ramène vers leur position d'équilibre, on parle d'élasticité. Une **ONDE ÉLASTIQUE** se propageant dans un liquide ou un gaz correspond à la propagation d'une variation locale de pression; on la qualifie d'**ONDE ACOUSTIQUE**. C'est une onde longitudinale: l'oscillation des atomes ou molécules autour de leurs positions d'équilibre s'effectue dans la direction de propagation. Les ondes acoustiques perçues par l'oreille humaine sont les **ONDES SONORES**; leurs fréquences vont de 20 à 20 000 hertz environ. Les **ULTRASONS** ont des fréquences supérieures, les **INFRASONS** des fréquences inférieures. Les **HYPERSONS** ont une fréquence supérieure au gigahertz. Le *la* du diapason correspond à une fréquence de 440 hertz; les sons graves vont jusqu'à 500 hertz environ, les sons aigus commencent à quelque 4 000 hertz.

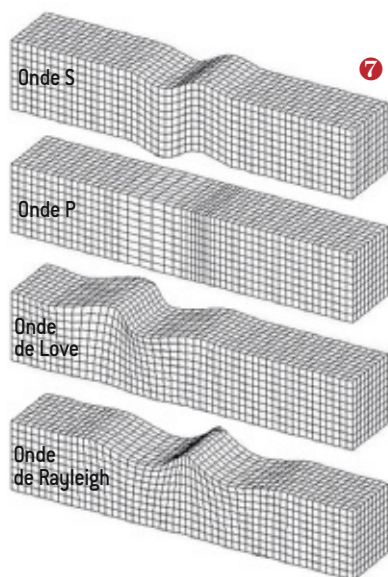
ONDES ÉLASTIQUES DANS UN SOLIDE

Dans un solide, une onde élastique est en général à la fois une **ONDE DE COMPRESSION** et une **ONDE DE CISAILEMENT** (le cisaillement est une force tangentielle qui s'exerce entre deux surfaces solides ou liquides en déplacement relatif). Dans le contexte géologique, une onde élastique est appelée **ONDE SISMIQUE**.

Il existe plusieurs types d'ondes sismiques ⑦. Elles se propagent à des vitesses de quelques kilomètres par seconde, qui dépendent du milieu traversé et du type d'onde. Celles qui se propagent dans le volume de la Terre sont dites **ONDES DE VOLUME**. Il s'agit des ondes P et des ondes S: les **ONDES P** (pour *primaires*) sont les ondes de compression, les **ONDES S** (pour *secondaires*) les ondes de cisaillement. Les **ONDES DE SURFACE** se propagent uniquement à la surface de la Terre. Elles regroupent les **ONDES L** et les **ONDES R**. Les ondes L, ou **ONDES DE LOVE**, sont des ondulations horizontales

du sol. Les ondes R, ou **ONDES DE RAYLEIGH**, sont des ondulations verticales.

Les **ONDES DE LAMB** sont des ondes qui se propagent dans des plaques solides, dont la matière effectue un mouvement soit perpendiculaire à la plaque, soit dans la direction de la propagation.



ONDES OCÉANIQUES ET ATMOSPHÉRIQUES

Une **ONDE DE GRAVITÉ** est une onde à la surface d'un fluide soumis à la gravité, où le fluide oscille verticalement. Les vagues à la surface de l'eau sont des ondes de gravité.

En météorologie, les **ONDES DE GRAVITÉ (ATMOSPHÉRIQUES)** sont des ondes de densité ou de pression créées par la poussée d'Archimède, qui tend à soulever les masses d'air moins denses. Les **ONDES DE ROSSBY** et les **ONDES DE KELVIN** sont deux types d'ondes de gravité (océaniques ou atmosphériques) d'échelle planétaire, où intervient la force de Coriolis due à la rotation de la Terre.

Les ondes de gravité ne doivent pas être confondues avec les **ONDES GRAVITATIONNELLES** : ces dernières sont, d'après la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui identifie la gravitation à une courbure de l'espace-temps, des ondes de déformation de l'espace-temps. On attend toujours leur découverte directe.

Les **ONDES DE KELVIN-HELMHOLTZ** sont des ondulations qui se forment à la surface

de contact de deux couches de fluide en mouvement à des vitesses suffisamment différentes.

Le mouvement de la marée le long des mers peut être décrit comme une somme de nombreuses ondes périodiques, nommées **ONDES DE MARÉE**.

LES ONDES EN PHYSIQUE QUANTIQUE

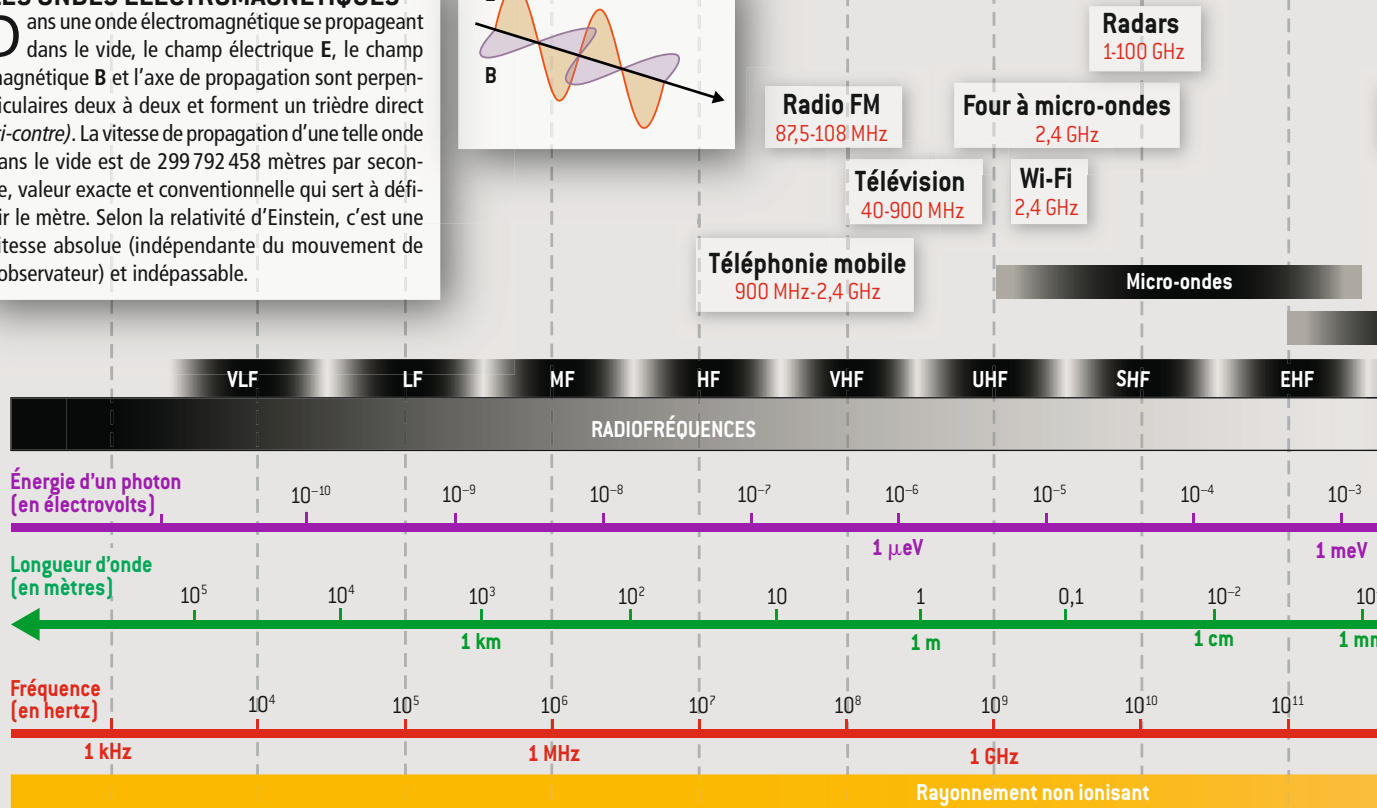
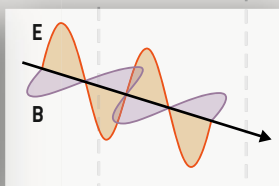
La mécanique quantique attribue à toute particule libre une longueur d'onde égale à h/p , où h est la constante de Planck et p la quantité de mouvement (produit de la masse par la vitesse) de la particule. Cette **LONGUEUR D'ONDE DE BROGLIE** confère à la matière des propriétés ondulatoires, d'où la notion d'**ONDES DE MATIÈRE**.

Plus généralement, en mécanique quantique non relativiste, un système physique est décrit par une **FONCTION D'ONDE**, solution de l'équation dite de Schrödinger ; cette fonction de la position et du temps détermine, en termes probabilistes, le comportement du système (par exemple la densité de probabilité de présence d'un électron dans un atome).

LE SPECTRE

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Dans une onde électromagnétique se propageant dans le vide, le champ électrique **E**, le champ magnétique **B** et l'axe de propagation sont perpendiculaires deux à deux et forment un trièdre direct (*ci-contre*). La vitesse de propagation d'une telle onde dans le vide est de 299 792 458 mètres par seconde, valeur exacte et conventionnelle qui sert à définir le mètre. Selon la relativité d'Einstein, c'est une vitesse absolue (indépendante du mouvement de l'observateur) et indépassable.



En théorie quantique des champs, qui intègre la théorie de la relativité restreinte, les entités fondamentales sont les **CHAMPS QUANTIQUES**, objets mathématiques définis partout et à tout instant, et obéissant à des équations analogues à celles des ondes classiques. Un champ quantique transporte de l'énergie et de la quantité de mouvement par quantités bien définies appelées **QUANTA**. Ainsi, les quanta du champ électromagnétique sont les **PHOTONS**. Les électrons et les positrons sont les quanta d'un autre type de champ, etc.

De façon analogue, les **PHONONS** sont les quanta des **ONDES DE VIBRATION** qui se propagent dans un réseau cristallin, et les **MAGNONS** sont les quanta des **ONDES DE SPIN** (ondes où la grandeur qui change est l'orientation du spin ou moment magnétique des atomes).

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Dans les **ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES**, dont font partie les **ONDES LUMINEUSES**, c'est la combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui se propage (voir ci-dessous).

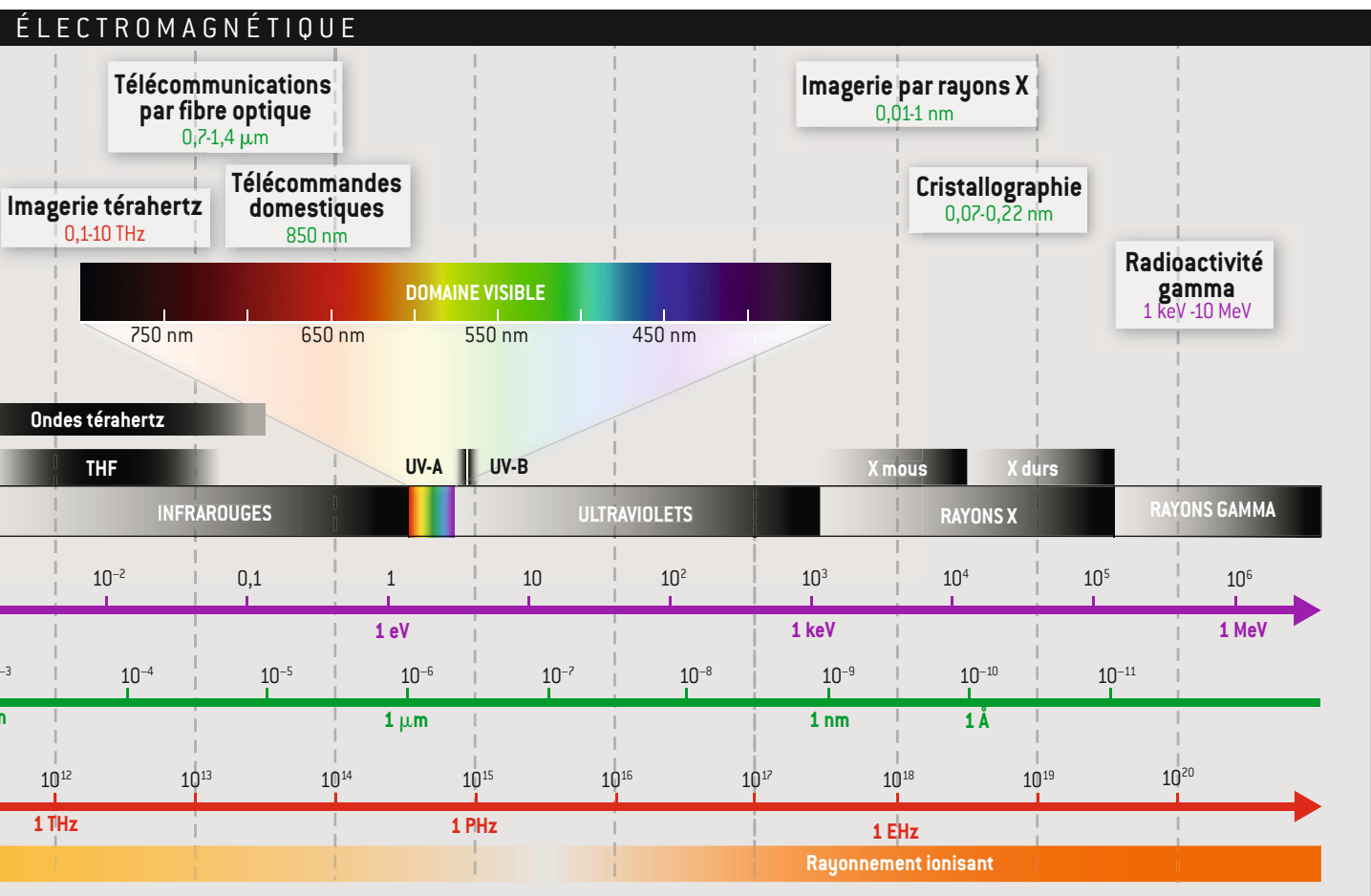
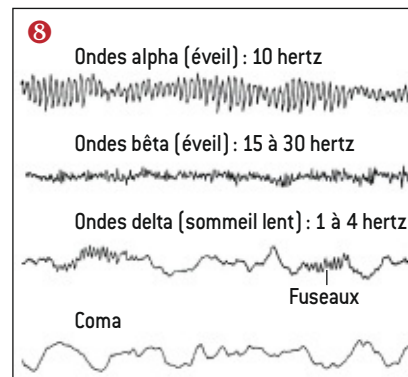
LES ONDES DU CERVEAU

On peut enregistrer à la surface du cerveau des différences de potentiel variant de quelques microvolts à plusieurs millivolts. Ces variations résultent de la présence d'ondes électriques qui naissent et se propagent dans le cerveau. En effet, de minuscules courants électriques se créent dans les neurones, dus à la circulation d'ions entre l'intérieur et l'extérieur de ces cellules, au niveau des synapses (les connexions entre neurones). Les courants individuels sont infimes,

mais, parce que les prolongements des neurones où ils se déplacent sont parallèles, la somme d'innombrables courants infimes donne un courant macroscopique, à l'origine des ondes électriques cérébrales.

Le tracé d'un électroencéphalogramme, EEG, est extrêmement compliqué, mais il est possible de le décomposer en types d'ondes particuliers que l'on sait associer aux différentes phases de vigilance de l'individu : éveil (au repos, en activité, méditation, etc.), sommeil (sommeil lent profond ou paradoxal) ou encore absence de conscience, par exemple coma. Chacun de ces types d'ondes présente une bande de fréquences caractéristique ⑧.

Les données enregistrées sur un EEG varient selon l'emplacement des électrodes sur le cuir chevelu. C'est l'analyse de toutes les composantes d'un EEG qui donnent accès en temps réel aux processus cognitifs en cours, normaux ou pathologiques. Les EEG ont une précision temporelle (une milliseconde) supérieure à celle qu'offrent les autres méthodes d'investigation de l'activité cérébrale.



HISTOIRE DES SCIENCES

La victoire posthume de Robert Scott

Il y a 100 ans, l'explorateur britannique Robert Scott perdait la course à la conquête du pôle Sud, choisissant de privilégier les objectifs scientifiques de son expédition. Ses découvertes jouèrent un rôle majeur dans l'acceptation de la théorie de l'évolution.

Edward LARSON

Juin 1911. Robert Scott et 32 explorateurs – scientifiques, officiers et marins britanniques, pour la plupart – patientent, reclus dans leur campement, en plein hiver austral. Dans l'Antarctique, à cette époque de l'année, le soleil ne dépasse jamais l'horizon et une couche de 2,50 mètres de glace fige la mer alentour. Le blizzard souffle presque sans discontinuer. Les températures hivernales sur l'île de Ross, la terre émergée la plus méridionale qu'ait pu atteindre le bateau de Scott, peuvent descendre en dessous de -45°C . Coupé du monde extérieur, l'équipage attend les journées printanières du mois d'octobre. Alors, certains parcourront les quelque 1 500 kilomètres de banquise qui couvrent la baie de Ross (voir la figure 4). Leur objectif : le pôle Sud.

Deux expéditions britanniques ont déjà tenté l'aventure, l'une menée par Scott (1901-1904) et l'autre par Ernest Shackleton (1907-1909). Sans succès. Cette fois, Scott est parti confiant. Ayant tiré les leçons des expéditions précédentes, il a organisé celle-ci de façon méthodique, afin non seulement d'être le premier à atteindre le pôle, mais aussi de remplir d'ambitieux objectifs scientifiques. Il a mis en place plusieurs équipes qui se déploieront dans la baie de la mer de Ross, collecteront des fossiles et diverses données scientifiques. Et au printemps, sa propre équipe se mettra en route vers le Sud, pour atteindre le pôle au début de l'été austral et y planter le drapeau anglais.

Mais un événement a perturbé ces plans. En février 1911, en tentant de rallier la péninsule Édouard VII, à l'Est de la baie de Ross,

des hommes de Scott se sont retrouvés nez à nez avec un autre équipage, à environ 560 kilomètres du campement britannique : neuf hommes originaires de Norvège, avec à leur tête Roald Amundsen, expert dans la manœuvre des chiens d'attelage et skieur hors pair. En 1905, il a été le premier à franchir le passage du Nord-Ouest dans l'Arctique canadien. Amundsen aurait dû être en route pour le pôle Nord. Mais, dans le plus grand secret, il a modifié ses plans et mis le cap sur

La nouvelle a créé le trouble dans le campement de Scott. Certains membres de l'équipe ont suggéré d'abandonner la partie scientifique pour se concentrer sur le pôle. Mais Scott n'était pas de cet avis. Sa première expédition avait permis d'amasser une grande quantité d'échantillons géologiques et biologiques, de relevés météorologiques et magnétiques et de découvertes océanographiques et glaciologiques. Une part importante de la nouvelle expédition doit rester dévolue à la science : « Pour suivre l'exécution de notre programme, comme si aucun fait nouveau ne s'était produit, c'est le seul parti à prendre », note-t-il dans son journal. D'un point de vue scientifique, on ne peut que lui être reconnaissant d'avoir maintenu ses plans : ses découvertes constitueront une preuve importante en faveur de la théorie de l'évolution de Darwin. Mais lui et ses hommes paieront cher cette décision.



1. GEORGE SIMPSON, météorologue de l'expédition, effectue des observations au cap Evans.

le Sud. Une tentative de prendre les explorateurs britanniques de vitesse, interprétera Scott. Les hommes d'Amundsen voyagent légers, sans objectifs scientifiques. Avec leurs seuls skis et chiens de traîneau, ils ont prévu de foncer vers le pôle à partir d'une base plus proche de 100 kilomètres que celle de Scott.

À la recherche d'une plante fossile

Au début du XX^e siècle, la théorie de l'évolution, publiée par le naturaliste britannique en 1859, est un sujet brûlant. Les scientifiques sont à l'affût d'un fossile qui appuierait les thèses de Darwin : une plante de l'ère paléozoïque appelée *Glossopteris*. Des fossiles de cette plante à feuilles larges ont été retrouvés en Afrique, en Australie et en Amérique du Sud. Les créationnistes, qui défendent une lecture littérale du récit biblique de la création et s'opposent à la vision darwinienne de l'évolution des espèces, sou-