

# Enjeux numériques



## Les fréquences, gestion d'une ressource-clé

UNE SÉRIE DES  
ANNALES  
DES MINES  
FONDÉES EN 1794

N° 9 - MARS 2020

*Publié avec le soutien  
de l'Institut MinesTélécom*



## ENJEUX NUMÉRIQUES

Série trimestrielle • N°9 - Mars 2020

### Rédaction

Conseil général de l'Économie,  
ministère de l'Économie et des Finances  
120, rue de Bercy - Télédéc 797  
75572 PARIS Cedex 12  
Tél. : 01 53 18 52 68  
<http://www.annales.org>

### François Valérian

Rédacteur en chef

### Gérard Comby

Secrétaire général

### Delphine Mantienne

Secrétaire générale adjointe

### Liliane Crapanzano

Correctrice

### Myriam Michaux

Webmestre et maquettiste

### Membres du Comité de Rédaction

#### Jean-Pierre Dardayrol

Président du Comité de rédaction

#### Edmond Baranes

#### Godefroy Beauvallet

#### Côme Berbain

#### Pierre Bonis

#### Serge Catoire

#### Michel Cosnard

#### Arnaud de La Fortelle

#### Caroline Le Boucher

#### Alban de Nervaux

#### Bertrand Pailhès

#### Grégoire Postel-Vinay

#### Jacques Serris

#### Hélène Serveille

#### Laurent Toutain

#### Françoise Trassoudaine

#### François Valérian

### Photo de couverture :

Robert Delaunay (1885-1941), *Rythme n°2*,  
huile sur toile, 1938.  
Paris, musée d'Art moderne.  
Photo ©Musée d'Art moderne/Roger-Viollet.

### Iconographie

Christine de Coninck

### Abonnements et ventes

COM & COM

Bâtiment Copernic - 20, avenue Édouard-  
Herriot

92350 LE PLESSIS-ROBINSON

Alain Bruel

Tél. : 01 40 94 22 22 - Fax : 01 40 94 22 32

[a.bruel@cometcom.fr](mailto:a.bruel@cometcom.fr)

Mise en page : Nadine Namer

Impression : Printcorp

N° ISSN : 2607-9984

Éditeur délégué :

FFE – 15, rue des Sablons - 75116 PARIS -  
[www.ffe.fr](http://www.ffe.fr)

### Régie publicitaire : Belvédère Com

Fabrication : Aïda Pereira

[aida.pereira@belvederecom.fr](mailto:aida.pereira@belvederecom.fr)

Tél. : 01 53 36 20 46

Directeur de la publicité : Bruno Slama

Tél. : 01 40 09 66 17

[bruno.slama@belvederecom.fr](mailto:bruno.slama@belvederecom.fr)

Le sigle « D. R. » en regard de certaines illustrations correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

# Les fréquences, gestion d'une ressource-clé

04 Avant-propos  
Gilles BRÉGANT

06 Introduction : le spectre des fréquences, une ressource à urbaniser et à mettre en valeur  
François RANCY

## La gestion de la ressource

08 Cadres et instruments juridiques des fréquences  
Olivier JAPIOT et Eddie TADEJ

13 Le cadre mondial de la gestion des fréquences : réglementation et normalisation  
François RANCY

19 Le cadre régional de la gestion des fréquences en Europe : un niveau élevé d'harmonisation,  
par la coopération entre l'UE, la CEPT et l'ETSI  
Eric FOURNIER

25 La gestion nationale  
Gilles BRÉGANT

30 Le contrôle du spectre  
Nicolas SPANJAARD-HUBER

35 Spectrum economics: serving public policies  
Gérard POGOREL

41 La valeur patrimoniale du spectre radioélectrique  
Olivier COROLLEUR

47 Radiofréquences et santé  
Olivier MERCKEL

## Les nouveaux usages des fréquences

55 Les fréquences de l'IoT : un nouveau paradigme pour les ingénieurs radio  
Benoît PONSARD

60 5G Connectivity  
Roberto VIOLA

- 64 Plateformes à haute altitude et Constellations de satellites  
Christine MENGELLE François RANCY
- 72 L'utilisation des fréquences radioélectriques pour l'observation de la Terre  
Dominique MARBOUTY
- 78 Les besoins actuels et futurs en fréquences pour les armées : un défi stratégique pour la France  
Jérôme BORDELLÈS et Mickaël ULVOA

### **Les nouveaux outils d'aménagement : innovations de gestion et gestion des innovations**

- 89 La couche physique : un élément-clé des réseaux sans fil  
Philippe CIBLAT et Alain SIBILLE
- 94 Les outils techniques de la gestion des fréquences  
Yann MAIGRON
- 98 L'évolution de la télévision et de son usage des fréquences  
Walid SAMI
- 104 La gestion des fréquences en temps de crise  
Claire LANDAIS
- 108 Police du spectre, brouillage offensif, brouillage non intentionnel. Contrôle du spectre, cyber-sécurité, cybersécurité et guerre électronique : même combat ?  
Catherine GABAY
- 114 Les enjeux des fréquences pour la radioastronomie  
Ivan THOMAS et Karl-Ludwig KLEIN

### **Hors dossier**

- 119 Le baromètre du numérique 2019  
Gérard LALLEMENT, Matthias DE JOUVENEL et Michel SCHMITT
- 130 Résumés
- 138 Abstracts
- 146 Contributeurs

*Ce numéro est coordonné par François RANCY.*

# Avant-propos

Par **Gilles BRÉGANT**

Directeur général de l'Agence nationale des Fréquences (ANFR)

Les fréquences radioélectriques sont invisibles et pourtant, elles orchestrent aujourd'hui une grande partie du monde visible. Notre quotidien, en effet, se conjugue désormais sans fil : télécommandes, téléphones, satellites, radars tissent autour de nous d'imperceptibles correspondances qui nous procurent des pouvoirs jadis réservés aux héros ou aux dieux : action à distance, ubiquité, prescience du temps qu'il fera, vision dans l'obscurité, accès illimité et instantané à la connaissance...

En quelques décennies, les hommes ont découvert, puis bientôt appris à maîtriser cette étrange ressource naturelle que constitue le spectre radioélectrique. Si la découverte du Nouveau Monde a bouleversé l'Histoire depuis la fin du XV<sup>e</sup> siècle, l'on découvrira sans doute que c'est l'exploration d'une autre *terra incognita*, dont les hectares se comptent en hertz, qui aura imprimé sa marque sur nos destins depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. TSF, discours radiophoniques, radars, Mondovision, satellites, GPS puis téléphones mobiles ont, depuis plus d'un siècle, imposé leur rythme effréné à une humanité tantôt émerveillée, tantôt déroutée. À mesure que les ingénieurs parvenaient à domestiquer de nouvelles bandes de fréquences, dont les noms ésotériques conservent encore aujourd'hui leur part de mystère (bande Ku, bande X, bande Ka...), cette ressource, pourtant limitée, a sans cesse offert de nouvelles possibilités. La rapidité avec laquelle ces évolutions se sont succédé n'a pas manqué de susciter quelques inquiétudes : pour certains, la magie radioélectrique est ainsi parfois soupçonnée d'être une magie noire... Et, pourtant, ces technologies n'ont jamais été aussi bien maîtrisées qu'en ce début de XXI<sup>e</sup> siècle.

Ces succès n'ont pas été atteints sans effort. En effet, les fréquences restent une ressource difficile à domestiquer : deux fréquences proches se brouillent souvent ; quoique rapidement atténuées par la distance, leur portée demeure presque infinie pour les récepteurs sensibles ; enfin, dans les villes, la prolifération des bâtiments entrave leur propagation. Pour parvenir à tirer le meilleur parti de cette ressource capricieuse, il est donc indispensable de gérer les fréquences : anticiper leur implantation, accompagner leur déploiement, vérifier régulièrement l'absence de dérive. Pour y parvenir, il convient de tirer parti de l'exceptionnel flux d'innovations technologiques dont bénéficie ce secteur, mais aussi d'expliquer inlassablement l'utilité du déploiement de ces nouveaux services et de leurs antennes, dont l'apparition trouble parfois nos concitoyens. Organiser les fréquences à l'échelle d'un pays constitue ainsi une œuvre vivante, en perpétuelle évolution.

Ces préoccupations sont devenues communes à tous les pays du monde. Comme les fréquences ignorent superbement les frontières, l'exploitation du spectre a également très tôt suscité une coordination supranationale. L'Union internationale des Télécommunications (UIT) a ainsi tenu sa première conférence internationale sur ce sujet dès 1906. Depuis lors, les grandes évolutions de l'usage du spectre, écrites en plusieurs langues, sont régulièrement consignées dans des traités internationaux. La dernière conférence mondiale des radiocommunications, réunie en novembre 2019 en Égypte, a ainsi rassemblé plus de 3 500 experts issus des 193 États membres de l'UIT pour statuer sur l'avenir du spectre, sur Terre et dans l'espace.

Ce recueil est ainsi à l'image de cette épopée technique, qui est, en réalité, avant tout une grande aventure humaine : ses auteurs, issus de tous les continents, partagent des préoccupations qui se jouent des frontières. Vous trouverez dans ce numéro d'*Enjeux numériques* une introduction à la gestion des fréquences, une présentation des futurs usages, une mise en perspective des évolutions en cours. Je remercie ici tous les auteurs qui ont bien voulu apporter leur concours à cette entreprise. Je forme enfin le vœu que cette lecture suscite des vocations nouvelles, qui, je l'espère, viendront demain renforcer celles qui, jour après jour, rendent possible cette magie toujours renouvelée d'un univers sans fil !

# Introduction :

## Le spectre des fréquences, une ressource à urbaniser et à mettre en valeur

Par **François RANCY**

Le spectre des fréquences radioélectriques constitue la ressource rare qui sous-tend la plupart des applications dont nos sociétés sont devenues largement dépendantes en quelques décennies : du GSM à la 5G, du Wi-Fi au Bluetooth, de la radio FM ou DAB à la TNT et à la télévision par satellite, du GPS à l'imagerie spatiale. Le spectre nourrit également nombre d'autres activités essentielles, telles que les transports aériens, fluviaux ou maritimes, la défense et la sécurité des populations, la recherche scientifique et spatiale, la météorologie, l'observation du climat et des ressources de la Terre.

Aujourd'hui, cinq milliards de personnes disposent d'au moins un abonnement mobile, dont trois milliards pour le large-bande. Six milliards de récepteurs de radionavigation par satellite permettent de se localiser à tout instant et en tout point du globe, près de deux milliards de personnes disposent de la TNT et plus d'un milliard d'un récepteur de télévision par satellite. Tout cela dans des bandes de fréquences harmonisées mondialement, organisées et protégées depuis des décennies, au fur et à mesure que les technologies sous-jacentes ont émergé.

Ce résultat, qui mobilise des investissements de milliers de milliards de dollars, n'est pas le fruit du hasard. Pour l'obtenir, il a fallu, depuis plus d'un siècle, les efforts conjugués de tous les Etats de la planète et de toutes les parties intéressées pour organiser et gérer le spectre, sur la Terre et dans l'espace, d'une manière rationnelle, équitable, efficace et économique en assurant :

- la protection des investissements contre les brouillages préjudiciables et leur sécurisation sur le long terme, par des réglementations nationales et internationales contraignantes, stables, prédictibles et rigoureusement mises en œuvre ;
- l'adaptation régulière de ces réglementations à l'évolution des technologies et aux besoins de la société dans tous les pays ;
- l'harmonisation internationale des usages du spectre, nécessaire à la réalisation d'économies d'échelle sur les terminaux et équipements de réseau, à l'interfonctionnement des réseaux de radiocommunication et à l'itinérance des mobiles, par des normes d'application universelle.

Du fait des progrès incessants de la technologie et du bouleversement des usages du spectre qui en résultent, la gestion du spectre est l'enjeu de luttes permanentes, sans cesse renouvelées au sein des instances de légitimation nationales et internationales, pour imposer la « bonne » façon de gérer le spectre.

L'ambition de ce numéro d'*Enjeux numériques* est de montrer le point de vue et la vision des différentes parties prenantes dans la gestion du spectre (gouvernements, régulateurs, industriels et opérateurs) sur la meilleure façon d'adapter cette gestion à l'évolution des usages et des technologies.

La première partie décrit les cadres juridique, mondial, régional et national de la gestion du spectre, et les dimensions de cette gestion en termes économiques et patrimoniaux, mais aussi en termes de contrôle et de santé.

La deuxième et la troisième partie montrent, sur quelques exemples, comment l'évolution des usages et des technologies remet en cause, de manière permanente, l'organisation du spectre et comment celle-ci évolue pour s'adapter.

Je vous souhaite une très bonne lecture.



# Cadres et instruments juridiques des fréquences

Par **Olivier JAPIOT**

Conseiller d'État

et **Eddie TADEJ**

Chef du service juridique de l'ANFR

Le spectre des fréquences radioélectriques constitue une ressource naturelle finie, donc rare et limitée, dont dépendent de nombreuses industries. La gestion de cette ressource s'organise dans des cadres juridiques propres à chaque niveau géographique. Après avoir présenté le règlement des radiocommunications et le cadre institutionnel et réglementaire européen, cet article présentera le cadre juridique français et enfin les instruments juridiques à la disposition de l'Agence nationale des Fréquences (ANFR).

## **Le règlement des radiocommunications fixe le cadre juridique pour l'accès aux fréquences par les services de radiocommunications**

Institution spécialisée des Nations Unies pour les technologies de l'information et de la communication, l'Union internationale des Télécommunications (UIT) est organisée en trois grands domaines d'activités. Le secteur des radiocommunications (UIT-R) est chargé d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre des fréquences et des orbites des satellites par tous les utilisateurs de radiocommunication, et vise à éviter les brouillages préjudiciables entre les services de radiocommunications.

Le cadre juridique mondial des fréquences résulte de la Constitution de l'UIT et de la Convention de l'UIT de 1992, ainsi que des règlements administratifs qui sont considérés comme instruments internationaux contraignants (Constitution, article 54 § 1), notamment le Règlement des radiocommunications (RR). Celui-ci est révisé régulièrement pour tenir compte de l'évolution des technologies et des usages dans le cadre des Conférences mondiales des Radiocommunications (CMR) dont la dernière s'est déroulée à Charm el-Cheikh du 28 octobre au 22 novembre 2019.

Ayant valeur de traité international, le RR fixe le cadre juridique pour l'utilisation du spectre radioélectrique par les États membres. L'article 5 du RR attribue des bandes de fréquences à des services de radiocommunications, soit à titre primaire, soit à titre secondaire, dont la liste et les définitions sont fixées à l'article 1<sup>er</sup> du RR (par exemple : services de terre, spatiaux, fixe mobile ou radiodiffusion.). L'article 4.3 prévoit que toute nouvelle assignation doit éviter de causer des brouillages préjudiciables aux stations utilisant des fréquences qui sont conformes au tableau d'attribution des bandes de fréquences et dont les assignations sont inscrites au tableau d'attribution des bandes de fréquences et dont les caractéristiques sont inscrites au Fichier de référence international des fréquences (MIFR). Les stations d'un service secondaire ne doivent pas causer de brouillages préjudiciables aux stations d'un service primaire et ne peuvent prétendre à la protection contre les brouillages causés par les stations d'un service primaire (RR, art. 5, sect. 2). Enfin, l'établissement ou l'exploitation des stations est conditionné à la délivrance d'une forme appropriée de licence par les administrations et autorités compétentes de l'État (RR, art. 18).



Dernière édition de la Conférence mondiale des Radiocommunications (CMR) organisée par l'Union internationale des Télécommunications (UIT) à Charm el-Cheikh, 28 octobre – 22 novembre 2019.

©ITU/ D. Woldu

## **L'Union européenne a fixé un régime d'autorisation pour les services de communications électroniques et mis en œuvre une politique de gestion du spectre**

Depuis la libéralisation du marché européen des télécommunications en 1998, le cadre juridique européen appliqué aux fréquences comprend notamment la directive « autorisation » et la décision « spectre ».

Ainsi, d'une part, la directive 2002/20/CE du Parlement européen et du Conseil du 7 mars 2002, relative à l'autorisation de réseaux et de services de communications électroniques, dite « autorisation <sup>(1)</sup> », simplifie les procédures en mettant fin au système des licences individuelles au profit d'un régime d'autorisation générale. En vertu de l'article 3 de cette directive, l'établissement et l'exploitation des réseaux ouverts au public et la fourniture au public de services de communications électroniques sont libres, dans le respect du régime déclaratif mis en place et, le cas échéant, de l'octroi de droits d'utilisation spécifiques pour les ressources rares.

Désormais, la fourniture de réseaux ou de services de communications électroniques ne peut être soumise qu'à une simple déclaration. Toutefois, pour l'utilisation des ressources rares, comme les fréquences, les États européens conservent la faculté de prévoir un dispositif d'autorisation générale ou individuelle, cette dernière étant réservée aux cas dans lesquels le risque de brouillage préjudiciable est significatif.

D'autre part, la décision 676/2002/CE du 7 mars 2002 du Parlement européen et du Conseil relative à un cadre réglementaire pour la politique en matière de spectre radioélectrique dans

(1) JOCE n°L 108, 24 avril 2002, p. 21 – Modifiée par la directive 2009/140/CE du 25 novembre 2009.

la Communauté européenne, communément appelée décision « spectre radioélectrique <sup>(2)</sup> », s'applique à l'ensemble des fréquences comprises entre 9 KHz et 3 000 GHz.

L'article 3 de cette décision a créé le Comité du spectre radioélectrique (RSCOM) pour assister la Commission européenne dans son travail de coordination des politiques pour lesquelles les usages du spectre sont un enjeu. Composé de représentants des vingt-huit pays de l'Union et présidé par la Commission, le RSCOM examine les propositions de la Commission sur les mesures techniques d'application visant à harmoniser les conditions relatives à la disponibilité et à l'utilisation du spectre (art. 4). Il émet des avis relatifs aux mandats que la Commission confie à la Conférence européenne des administrations des postes et des télécommunications (CEPT) concernant l'harmonisation de l'attribution des fréquences radioélectriques et de la disponibilité des informations. L'article 5 de la décision précise que les États membres mettent à la disposition du public les tableaux d'attribution des fréquences nationales ainsi que les informations sur les droits, conditions, procédures, redevances et taxes concernant l'utilisation du spectre radioélectrique.

Le RSCOM se distingue du Groupe pour la politique en matière de spectre radioélectrique (RSPG) créé par la décision 2002/622/CE de la Commission du 26 juillet 2002 <sup>(3)</sup>. Le RSPG est composé d'un expert gouvernemental par État membre et d'un représentant de la Commission. Sa mission est d'assister la Commission et de lui fournir des conseils sur les aspects relatifs à la politique du spectre tels que la disponibilité et l'utilisation du spectre, l'harmonisation et l'attribution des fréquences, l'octroi des droits d'utilisation et la tarification.

### **En France, les fréquences radioélectriques appartiennent au domaine public de l'État et leur utilisation est soumise à un régime d'autorisation**

La loi française prévoit que les fréquences radioélectriques appartiennent au domaine public de l'État (CGPPP <sup>(4)</sup>, art. L. 2111-17) et que leur utilisation est conditionnée à l'obtention d'une autorisation (CGPPP, art. L. 2122-1). Ces principes sont rappelés à l'article L. 2124-26 (« *l'utilisation, par les titulaires d'autorisation, de fréquences radioélectriques disponibles sur le territoire de la République, constitue un mode d'occupation privatif du domaine public de l'État* »), ainsi qu'à l'article 22 de la loi n°86-1067 du 30 septembre 1986 et à l'article L. 41-1 du CPCE <sup>(5)</sup>.

L'autorisation administrative individuelle d'occupation privative du domaine public des fréquences correspond à la notion d'assignation prévue par l'article 1.18 du RR. Les autorisations individuelles sont délivrées par l'autorité affectataire compétente, en général l'Autorité de Régulation des Communications électroniques, des Postes et de la Distribution de la presse (ARCEP) pour les services de communications électroniques et le Conseil supérieur de l'Audiovisuel (CSA) pour les services de communication audiovisuelle. Si un service de communication électronique est diffusé sur des fréquences de communication audiovisuelle, le CSA ne peut l'autoriser qu'après avis conforme de l'ARCEP (loi n°86-1067, art. 23). Les installations radioélectriques qui reçoivent les signaux pour les besoins de la Défense nationale ou de la sécurité publique sont également soumises à autorisation (CPCE, art. L. 41-1) délivrée soit par le ministre chargé de la défense, soit par le ministre chargé de l'intérieur (CPCE, R. 20-44-5).

---

(2) JOCE n°L 108, 24 avril 2002, p. 1.

(3) JOCE n°L 198, 27 juillet 2002, p. 49.

(4) Code général de la Propriété des Personnes publiques (CGPPP).

(5) Code des Postes et des Communications électroniques (CPCE).

## **Le tableau national de répartition des bandes de fréquences constitue l'instrument de référence pour la gestion du spectre en France**

Préparé par l'ANFR, le tableau national de répartition des bandes de fréquences (TNRBF) est annexé à un arrêté du Premier ministre qui l'approuve, après avis du CSA (loi n°86-1067, art. 21) et de l'ARCEP (CPCE, L. 41), et est publié au *Journal officiel*. Le tableau fait l'objet d'une mise à jour majeure après chaque CMR et d'ajustements mineurs entre chaque conférence.

Le TNRBF décide de la répartition des bandes de fréquences entre les bénéficiaires que sont, d'une part, les affectataires gouvernementaux (notamment les ministères en charge des armées, de l'intérieur, des transports maritimes et aéronautiques, de la météorologie, de la recherche, du domaine spatial et de la radioastronomie), pour une durée non limitée et pour accomplir les missions qui leur sont confiées et, d'autre part, les autorités indépendantes, l'ARCEP et le CSA, qui en autorisent l'usage à titre privatif par des tiers, par des autorisations générales ou individuelles, soit pour des services de communications électroniques, soit pour des services de communication audiovisuelle.

À cette fin, le TNRBF précise, pour chaque bande de fréquences, le ou les services attribués en France, et le ou les affectataires qui ont accès à ces services. Il fixe les droits et obligations des affectataires ainsi que les principales règles à appliquer pour la coordination et l'enregistrement des assignations de fréquences. Les règles de répartition entre les services distinguent les attributions primaires et les attributions secondaires.

Les droits d'accès des affectataires aux services primaires dépendent de leur statut (exclusif, prioritaire et égal). L'affectataire ayant un statut « exclusif » est le seul affectataire du ou des services primaires dans une bande de fréquences, mais d'autres affectataires peuvent y être autorisés soit par une dérogation, soit pour un service secondaire. Lorsque plusieurs affectataires partagent une même bande de fréquences, l'affectataire de statut « prioritaire » bénéficie du droit prioritaire de protéger ses intérêts dans cette bande et en est le coordonnateur. Les statuts « exclusif » et « prioritaire » donnent aux affectataires les moyens pour mettre en œuvre des politiques publiques de long terme, comme dans les domaines de l'audiovisuel, du mobile large bande ou de la sécurité publique. Les affectataires autorisés dans une bande de fréquences avec un statut « égal » la partagent à égalité de droits selon une procédure de coordination. L'accès à égalité de droit repose sur le principe « premier arrivé/premier servi ».

Les affectataires de services secondaires ne doivent pas causer de brouillages préjudiciables aux stations d'un service primaire auxquelles des fréquences ont été assignées antérieurement ou sont susceptibles d'être assignées ultérieurement. Ils ne peuvent pas prétendre à la protection contre les brouillages préjudiciables causés par les stations d'un service primaire. Ils ont néanmoins droit à la protection contre les brouillages préjudiciables causés par les stations d'autres services secondaires assignés ultérieurement.

## **L'Agence nationale des Fréquences (ANFR) est chargée de la gestion nationale des fréquences**

Créée le 1<sup>er</sup> janvier 1997 sous la forme d'un établissement public à caractère administratif, l'ANFR est chargée de la planification, de la gestion et du contrôle de l'utilisation des fréquences en concertation avec les affectataires de bandes de fréquences<sup>(6)</sup> définis par le TNRBF.

En premier lieu, l'ANFR autorise l'implantation des stations radioélectriques de toute nature et assure leur coordination afin d'assurer la meilleure utilisation des sites disponibles ainsi que la prévention

(6) CPCE, art. L. 43.

des brouillages préjudiciables entre utilisateurs de fréquences. Elle veille également au respect des valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques, ainsi qu'au recensement et au suivi des « points atypiques <sup>(7)</sup> ». Toutefois, s'agissant des stations autorisées par le CSA, l'ANFR est seulement consultée par celui-ci mais son avis s'impose s'il est fondé sur le non-respect des valeurs limites d'exposition (CPCE, art. L. 43). Une autorisation individuelle n'est par ailleurs pas nécessaire pour les installations radioélectriques bénéficiant d'une autorisation générale ni pour celles dont la puissance est comprise entre 1 et 5 watts, lesquelles sont soumises à déclaration auprès de l'ANFR.

Ces autorisations et avis résultent en général d'une décision implicite qui naît de l'absence de réponse à la consultation de l'ensemble des affectataires et acteurs concernés dans un délai de deux mois après la saisine de l'ANFR. Ces autorisations et avis deviennent caducs en l'absence de tout commencement d'exécution des opérations qu'ils concernent dans un délai de douze mois à compter de leur notification ou, si elle est postérieure, de l'entrée en vigueur de l'autorisation d'utilisation de fréquences.

En deuxième lieu, l'ANFR tient à jour le fichier national des fréquences et notifie les assignations nationales au MIFR de l'UIT (CPCE, art. R. 20-44-11, 4°). L'assignation correspond à l'autorisation individuelle d'utiliser une fréquence radioélectrique par une station selon des conditions techniques spécifiques. L'enregistrement de l'assignation produit des effets juridiques consistant en l'octroi d'un droit à la protection contre les brouillages. L'enregistrement peut être refusé s'il méconnaît le TNBRF ou si la consultation des acteurs concernés fait apparaître une difficulté.

En troisième lieu, l'ANFR contrôle l'utilisation des fréquences par l'inspection des sites de stations radioélectriques et par le traitement des perturbations signalées (CPCE, art. L. 43 I, R. 20-44-11, 10°). Dans ce dernier cas, l'ANFR instruit le signalement et formule des préconisations pour remédier aux perturbations. Elle peut également suspendre l'autorisation d'implantation de la station perturbatrice après le respect d'une procédure contradictoire. La violation d'une suspension engage la responsabilité civile et pénale de l'exploitant de la station (CPCE, art. L. 43 I, R. 20-44-11, 5°bis).

Enfin, l'ANFR accompagne les mutations des bandes de fréquences entre affectataires et, à ce titre, gère le Fonds de Réaménagement du Spectre (FRS).

## **Bibliographie**

ACHILLEAS P. (2011), « Droit international des télécommunications », JurisClasseur, Fasc. 7350.

ACHILLEAS P. (2011), « Droit communautaire communications électroniques », JurisClasseur, Fasc. 4650.

AUTIN J.-L. et IDOUX P. (2011), « Droit national des communications électroniques », JurisClasseur, Fasc. 4600.

PEZ T. (2011), *Le Domaine public hertzien*, LGDJ, Systèmes.

RANCY F. (2019), « Normalisation et fréquences », *Annales des Mines, Enjeux numériques* n°5, en téléchargement sur : <http://www.anales.org/enjeux-numeriques/2019/en-2019-05/2019-03-11.pdf>

Règlement des radiocommunications (4 volumes), ITU, édition 2016.

Tableau national de répartition des bandes de fréquences : <https://www.anfr.fr/gestion-des-frequences-sites/tnrbf/>, édition 2017

<https://www.anfr.fr/>

---

(7) Lieux dans lesquels le niveau d'exposition aux champs électromagnétiques dépasse substantiellement celui généralement observé à l'échelle nationale.

# Le cadre mondial de la gestion des fréquences : réglementation et normalisation

Par François RANCY

Dès la mise au point du télégraphe sans fil, la nécessité d'organiser et d'encadrer l'usage du spectre au niveau mondial est apparue clairement et la conférence radiotélégraphique internationale de 1906 ouvrait la voie en adoptant la première édition du Règlement des Radiocommunications (RR), sous l'égide de l'Union internationale des Télécommunications (UIT). Deux ans après les premières expérimentations de télévision, la conférence de 1927 adoptait le premier tableau d'attribution des bandes de fréquences, répartissant le spectre entre services compatibles afin d'éviter les brouillages, et créait la structure chargée de conduire les études techniques pour l'élaboration de normes en matière d'usage du spectre et la préparation des décisions des conférences mondiales. Les ingrédients nécessaires étaient dès lors en place pour assurer le développement durable de l'écosystème mondial des radiocommunications par la production de règles et de normes d'application universelle, comme en témoigne la croissance exponentielle du secteur dans les cinquante dernières années.

Depuis 1906, l'organisation internationale de la gestion du spectre a été régulièrement améliorée dans le cadre du mandat donné au Secteur des Radiocommunications de l'UIT (l'UIT-R) d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre des fréquences radioélectriques par tous les services de radiocommunications, sur la Terre et dans l'espace.

L'UIT-R est aujourd'hui un champ particulièrement mature de production de règles et de normes, où les pouvoirs législatif, normatif, judiciaire et exécutif sont clairement séparés, à l'issue d'une évolution de 113 ans (voir Tableau 1), et sans changement notable depuis 1992. L'UIT-R est également un champ essentiellement autonome au sein de l'UIT, le directeur du Bureau des Radiocommunications (BR) et les membres du Comité du Règlement des Radiocommunications étant élus directement par la Conférence des Plénipotentiaires de l'UIT. Cette autonomie tient à ce que, structurellement, le secteur n'a été intégré à l'UIT qu'en 1947, même s'il s'appuyait administrativement sur le secrétariat de l'UIT.

Le succès de l'UIT-R réside en grande partie dans l'adéquation d'une structure à un objectif : instance mondiale chargée de définir la bonne façon de gérer le spectre, l'UIT-R met en œuvre dans ce but un processus de construction de consensus entre toutes les parties prenantes (gouvernements, régulateurs, opérateurs, industriels, organisations internationales sectorielles). La légitimité de ce processus tient au fait qu'il est validé à toutes ses étapes par les instances nationales légitimes, c'est-à-dire les gouvernements et régulateurs, qui disposent du pouvoir de proposer les lois, de décider de la réglementation et de la normalisation nationales sur l'usage des fréquences, et du pouvoir de police pour les faire appliquer. En ce sens, le travail national, régional et mondial sur les règles et normes en matière d'usage des fréquences est un continuum où les Etats sont présents à toutes les étapes, à la fois en tant qu'acteurs, décideurs et modérateurs des luttes entre toutes les parties prenantes.

Ce processus conduit à l'adoption consensuelle de deux sortes de produits organisant l'usage du spectre : les règles et les normes internationales.



Tableau 1 – Evolution de l'organisation des activités de l'UIT en radiocommunications

| NORMATIF  | LEGISLATIF  | JUDICIAIRE  | EXECUTIF   |
|---|---|---|--|
| Production de normes mondiales et de meilleures pratiques en matière de radiocommunications                               | Production de règles internationales sur l'usage du spectre                   | Adoption de règles de procédure et résolution des difficultés rencontrées dans l'application du Règlement des Radiocommunications | Administration, publication, information et assistance en relation avec les activités du secteur |
| 1927-1992<br>Comité consultatif international des Radiocommunications (CCIR) : Assemblée plénière et Commissions d'études | 1906-1938<br>Conférence radiotélégraphique internationale                     |   | 1906-1947<br>Bureau international de l'UIT   |
|   | 1938-1966<br>Conférence administrative internationale des Radiocommunications |   | 1947-1992<br>Comité international d'Enregistrement des Fréquences (IFRB)                         |
|   | 1967-1992 Conférence Administrative Mondiale des Radiocommunications (CAMR)   |   |  |
| 1993-<br>Assemblée des Radiocommunications et Commissions d'études de l'UIT-R   | 1993-<br>Conférence mondiale des Radiocommunications (CMR)                    | 1995-<br>Comité du Règlement des Radiocommunications (RRB)  | 1993-<br>Bureau des Radiocommunications  |

## Les règles internationales sur l'usage du spectre

Il s'agit du Règlement des Radiocommunications (RR) et des règles de procédure qui en précisent l'application.

Le RR, qui comprend des procédures et les dispositions techniques et opérationnelles associées, est un traité international qui s'impose aux cent quatre-vingt-treize Etats membres de l'UIT. Son application permet aux Etats membres d'obtenir et de garantir la reconnaissance et la protection internationales des utilisations du spectre qu'ils autorisent sur leur territoire ou dans l'espace.

Les Règles de Procédure (RoP) sont adoptées par le Comité du Règlement des Radiocommunications (RRB), composé de douze membres élus, et visent à préciser l'application du RR. Elles sont adoptées par consensus et soumises à consultation préalable des Etats membres de l'UIT.

Le RR est mis à jour tous les quatre ans par les Conférences mondiales des Radiocommunications (CMR) pour prendre en compte l'évolution des technologies et des usages du spectre. Ce processus comprend :

- l'adoption de l'ordre du jour par la CMR précédente ;
- la conduite des études préparatoires par les commissions d'étude de l'UIT-R et leurs groupes de travail (une trentaine de réunions par an, chacune avec typiquement 300 délégués de 50 Etats membres et 30 membres du secteur UIT-R) ;
- la finalisation de ces études par la réunion préparatoire à la conférence (typiquement 1 300 délégués de 110 Etats membres et 80 membres du secteur UIT-R) ;
- sur la base de ces études, la finalisation des propositions des Etats membres et des propositions communes des Etats membres d'une même région ;
- la tenue de la conférence elle-même (typiquement 3 200 délégués de 165 Etats membres et 130 membres du secteur UIT-R).

Il s'agit donc d'un processus qui engage tout le secteur UIT-R. Celui-ci est le lieu de luttes entre agents pour faire reconnaître leur point de vue comme le point de vue universel. Les agents en lutte

sont les représentants des Etats membres qui gèrent le spectre et défendent le consensus national, c'est-à-dire la résultante des intérêts nationaux. Ce sont aussi les représentants des opérateurs qui utilisent une partie du spectre et souhaitent protéger cette utilisation ou avoir accès à plus de spectre. Ce sont enfin les représentants des industriels qui fabriquent et vendent les équipements qui sont ou pourraient être utilisés. En cas de succès, le profit est évident : l'harmonisation mondiale travaille pour vous. En cas d'échec, elle travaille contre vous : pour l'industriel ou l'opérateur concerné, ce sont des milliards d'euros d'investissement qui deviennent problématiques, ceux qui sont déjà faits ou ceux qui doivent l'être. Pour l'Etat, c'est la perspective de milliards d'euros à verser en dédommagement pour avoir fait le mauvais choix cinq ou dix ans plus tôt.

On comprend dès lors que ces luttes soient acharnées et commencent dès qu'il s'agit de décider de la prochaine question qu'on va se poser, c'est-à-dire des points qui seront mis à l'ordre du jour de la prochaine CMR. Pour ces derniers, l'impulsion vient généralement de la nécessité de modifier le Règlement pour prendre en compte, dans une bande de fréquences donnée, une nouvelle technologie ou un nouvel usage qui sans cela ne pourra tout simplement pas se développer. L'opposition vient de ceux qui ont déjà réalisé des investissements dans la bande de fréquences visée et risquent de voir ces investissements menacés<sup>(1)</sup>.

Une fois un point inscrit à l'ordre du jour de la prochaine CMR, l'examen de ce point va être précédé d'études de partage du spectre visant à définir les conditions de compatibilité entre le nouvel usage proposé et les usages autorisés dans la bande précédemment. Ces études, conduites par les Commissions d'étude de l'UIT-R, vont caractériser le nouvel usage du point de vue de sa capacité de nuisance (en termes de brouillage) aux utilisations existantes. Parvenir à un résultat positif nécessite donc d'emporter l'adhésion des acteurs qui pourraient être affectés dans leurs investissements passés ou futurs, donc de ceux qui sont le plus susceptibles de s'opposer. Cela peut paraître exorbitant, mais c'est aussi de cette manière que la science avance et fonde sa légitimité en offrant une possibilité maximale de réfutation et en cumulant les acquis.

En modifiant le RR tous les quatre ans, les CMR organisent donc l'usage du spectre au niveau mondial pour plusieurs décennies dans les bandes de fréquences concernées, en intégrant les nouvelles technologies et les nouveaux usages par un processus d'innovation sous contrainte, poussant devant elles le poids des contraintes liées à la protection des investissements encore productifs.

En 113 années d'existence, par l'engagement universel des gouvernements, des régulateurs et de toutes les parties prenantes dans ses décisions, cette institution a permis le développement d'un écosystème représentant plus de 10 000 milliards d'euros d'investissements et a intégré depuis vingt ans les conditions de développement de technologies qui arrivent seulement à maturité aujourd'hui, comme les méga-constellations de satellites non géostationnaires ou les plateformes à haute altitude. Elle a aussi permis le développement du mobile large-bande en harmonisant les bandes de fréquences pour le développement de la 3G, la 4G et, dès l'an prochain, de la 5G.

---

(1) Un exemple très actuel de ce genre de lutte est la décision prise par la CMR-15 d'exclure la bande des 28 GHz du champ des études couvert par l'ordre du jour de la CMR-19 sur le spectre additionnel pour les télécommunications mobiles internationales (IMT), c'est-à-dire la 5G. Huit pays, dont les États-Unis, le Japon et la Corée, souhaitaient retenir cette bande mais, n'ayant pas réussi à convaincre les autres, ont dû se ranger au consensus final, non sans faire une déclaration exprimant leur préoccupation. Ces pays ont engagé des investissements conséquents dans cette bande pour y déployer la 5G, mais la perspective de voir le reste du monde les y rejoindre est de ce fait compromise, ou à tout le moins, renvoyée à une date ultérieure.



## Les normes internationales sur l'usage du spectre

Il s'agit des « Recommandations » de l'UIT-R, qui définissent la bonne manière d'utiliser le spectre pour chacun des trente-neuf services de radiocommunication définis par le RR et de partager ce spectre entre et au sein de ces services afin d'éviter les brouillages préjudiciables. Un assez grand nombre de ces normes sont incorporées au RR et donc d'application obligatoire. Elles intègrent notamment des objectifs de performance et de conception, des critères de protection, des limites d'émission, des plans de fréquences, autant de paramètres qui visent à l'usage efficace et harmonisé du spectre, prenant en compte les technologies les plus avancées.

Les autres recommandations, de même que les Rapports et Manuels de l'UIT-R, qui définissent les meilleures pratiques dans l'usage et la gestion du spectre, sont reconnues et appliquées universellement comme instruments de base pour la législation, la réglementation, la tarification et l'autorisation d'usage des fréquences, ainsi que pour la gestion et le contrôle du spectre, la fabrication des équipements de radiocommunication, le déploiement et l'exploitation des réseaux de Terre et des réseaux à satellites.

Tableau 2 – Règles et normes UIT-R pour l'usage des fréquences par la 3G, 4G, 5G

|                | Décisions sur les règles   | Décisions sur les normes   | Déploiement commercial   |
|----------------|--|--|--|
| Février 1992   | CAMR-92 : attribution et identification des bandes à 1.9/2.1 GHz pour l'IMT  | Assemblée des Radiocommunications AR-95 : adoption de la norme concernant les arrangements de fréquences applicables à la mise en œuvre de IMT-2000 (Recommandation UIT-R <a href="#">M.1036-0</a> ) | 2002 (3G)  |
| Novembre 1997  | CMR-97 identification des bandes à 450 MHz, 850 MHz, 900 MHz et 1 800 MHz pour l'IMT   |  | 2012 (LTE : 4G)  |
| Juin 2000      | CMR-2000 : attribution et identification de la bande à 2.6 GHz pour l'IMT  | Assemblée des Radiocommunications AR-2000 : adoption de la norme IMT-2000 (Recommandation UIT-R <a href="#">M.1457-0</a> )   | 2012 (LTE : 4G)  |
| Novembre 2007  | CMR-07 : attribution et identification pour l'IMT des bandes à 700 MHz (Région 2), 800 MHz (mondial) et 3.5 GHz (une certaine de pays dont ceux d'Europe)                |  | 2009 (700 MHz aux USA pour LTE : 4G)<br>2010 (800 MHz : 4G en Europe)<br>2020 (date cible pour la 5G à 700 MHz et 3.5 GHz en Europe) |
| Janvier 2012   |  | Assemblée des Radiocommunications AR-12 : adoption de la norme IMT-Advanced (Recommandation UIT-R <a href="#">M.2012-0</a> )   | 2012 (LTE Advanced : 4G)   |
| Novembre 2015  | CMR-15 : attribution et identification pour l'IMT des bandes à 700 MHz, 1.5 GHz et 3.5 GHz (mondiales) et à 600 MHz (8 pays dont USA, Canada, Mexique, Nouvelle-Zélande) |  | 2020 (700 MHz, 3.5 GHz : 5G en Europe)<br>2020 (600 MHz 5G USA, Canada, Mexique)   |
| Novembre 2019  | CMR-19 : attributions et identifications attendues dans les bandes de fréquence au-dessus de 24 GHz.   |  | 2020   |
| Septembre 2020 |  | 2020 - Commission d'études 5 de l'UIT-R : adoption attendue de la norme IMT-2020   | 2020   |

Le développement de recommandations UIT-R pour les Télécommunications mobiles internationales (IMT) depuis 1992 donne un exemple de la façon dont l'activité de l'UIT-R (commissions d'études et CMR) a défini et encadré le développement de la 3G, de la 4G et aujourd'hui de la 5G (voir Tableau 2), après que l'absence d'un tel encadrement à la fin des années 1980 a conduit pour la 2G à l'émergence de deux normes concurrentes et incompatibles (GSM et CDMA) et à la fragmentation du marché mondial entre des normes et des fréquences différentes.

Les attributions de fréquences précèdent généralement le déploiement commercial de cinq à douze ans pour la 3G et la 4G. Ce décalage est lié au temps nécessaire pour la libération des bandes concernées par les utilisateurs précédemment autorisés<sup>(2)</sup>, pour le processus d'autorisation de fréquences aux opérateurs mobiles et pour le déploiement du réseau mobile proprement dit. De plus, tout cela ne peut se produire à grande échelle qu'une fois l'harmonisation mondiale clairement établie. Tel était le cas pour les bandes attribuées par la CAMR-92. En général, le processus d'harmonisation mondiale des fréquences se construit sur plusieurs CMR, le temps que tous les pays surmontent les réticences nationales au changement<sup>(3)</sup>.

En parallèle avec l'harmonisation des attributions de fréquences par les CMR, il convient d'harmoniser les normes capables d'utiliser ces fréquences. Le processus mis en place à cet effet par l'UIT-R a été appliqué avec succès pour la 3G (IMT-2000), la 4G (IMT-Advanced). Il est aujourd'hui en cours pour la 5G (IMT-2020) et associe l'ensemble des parties intéressées (gouvernements, régulateurs, organismes de normalisation, industriels et opérateurs) à travers les étapes suivantes :

- formulation et adoption de la définition de l'IMT-2020 : « Vision pour les IMT – cadre et objectifs généraux du développement futur des IMT à l'horizon 2020 et au-delà », 29 septembre 2015 – Recommandation ITU-R M.2083 ;
- adoption du calendrier de développement (30 novembre 2015) et des spécifications générales notamment en termes de débit, capacité, temps de latence (13 octobre 2016) ;
- adoption des critères d'évaluation pour la sélection des technologies candidates pour être inscrites dans la norme IMT-2020 (13 octobre 2016) – Rapport ITU-R M.2412 ;
- soumission des propositions de spécifications détaillées candidates (3 septembre 2019) et évaluation par des groupes indépendants de leur conformité aux spécifications générales – Rapport ITU-R M.2411 ;
- adoption de la norme sur la base des spécifications retenues à l'issue de ces évaluations.

À l'issue de ce processus, la norme pour l'interface radio de l'IMT-2020 sera approuvée formellement par les 193 Etats membres de l'UIT en 2020, conférant à cette norme la légitimité requise pour sa mise en œuvre universelle dans tous les pays.

## **La gestion nationale des fréquences**

C'est au niveau national que les normes et règles internationales sont mises en œuvre et appliquées. La gestion nationale du spectre est donc totalement immergée dans un contexte international qu'il s'agit à la fois de suivre et d'influencer. Elle est donc rythmée par la mise en œuvre des décisions de la dernière CMR et par la préparation de la suivante.

(2) Dans le cas des bandes à 800 MHz en Europe, il s'agissait de la radiodiffusion et la libération au profit du service mobile avait comme préalable le passage à la TNT et l'arrêt complet de la radiodiffusion analogique. Pour les bandes à 600 MHz aux USA et 700 MHz en Europe, des réaménagements de fréquences sont généralement nécessaires pour faire migrer la radiodiffusion, ce qui prend environ cinq ans.

(3) Ainsi, la bande des 700 MHz est ouverte par la CMR-07 pour les Régions 2 et 3 (Amérique et Asie) mais seulement par la CMR-15 mondialement. De même, la bande des 3,5 GHz est identifiée IMT par la CMR-07 pour une centaine de pays, mais seulement par la CMR-15 mondialement.

Le principal instrument juridique national dans la gestion du spectre est le tableau national d'attribution des bandes de fréquences. Il doit être conforme aux attributions de fréquences du RR applicables dans la région géographique correspondante. La réglementation internationale se trouve ainsi transposée dans la réglementation nationale, dont l'autorité administrative est la garante légitime (la police et la justice peuvent intervenir en cas de non-conformité).

Parce que les besoins en fréquences ne sont pas nécessairement les mêmes dans tous les pays, le RR laisse souvent le choix entre plusieurs attributions dans la même bande de fréquences, dès lors que l'utilisation d'attributions différentes dans des pays différents peut être rendue compatible par le truchement de limites ou de procédures de coordination spécifiées dans le RR. Les difficultés auxquelles sont confrontées les CMR résultent le plus souvent de choix historiques différents qui, par leur effet cumulatif, produisent à long terme des clivages entre pays ou régions qui s'opposent à tel ou tel choix d'harmonisation mondiale du fait que celui-ci conduirait à des réaménagements de fréquences trop coûteux. Ainsi, bien que l'harmonisation mondiale soit toujours un objectif partagé par tous les pays, chacun d'eux peut avoir des raisons de préférer une solution d'harmonisation différente.

Les normes internationales harmonisées par l'UIT-R, même si (au contraire des règles) elles ne sont pas d'application obligatoire et que le principe de « neutralité technologique » redouble cet aspect, sont *de facto* appliquées par tous les opérateurs de radiocommunication du fait des économies d'échelle et de l'interfonctionnement global qu'elles permettent, notamment pour les réseaux mobiles (voir les normes IMT de l'UIT pour la 3G, la 4G, et demain la 5G).

Pour les équipements de radiocommunication utilisables par le grand public sans autorisation, tels que les dispositifs WiFi, les conditions de partage entre services imposées par le RR peuvent conduire à inclure une règle dans la norme, ce qui nécessite un contrôle de la conformité de ces dispositifs. Dans l'Union européenne, ce contrôle se fait *a posteriori*, à travers une surveillance du marché par les régulateurs qui, après une vingtaine d'années, a montré ses limites. Ainsi, dans la bande des 5 GHz partagée entre radars météorologiques et dispositifs WiFi, 50 % de ces derniers sont non conformes et les brouillages qui en résultent affectent les prévisions météo.

## **La gestion régionale des fréquences**

Le besoin d'harmoniser l'usage des fréquences entre pays voisins afin de bénéficier des économies d'échelle et de l'interfonctionnement des réseaux de radiocommunication a conduit, depuis quelques dizaines d'années, à la création d'organismes régionaux de gestion du spectre, qui ont aussi pour vocation de définir un point de vue régional commun dans les CMR et les commissions d'études de l'UIT-R (voir l'article d'Eric Fournier sur le cadre régional, page suivante).

## **Conclusion**

Le développement et l'adoption de règles et de normes internationales sur l'usage du spectre s'inscrivent dans un processus de construction de consensus sous l'égide de l'UIT et sous la conduite de ses États membres, en y associant étroitement les principales parties prenantes dans l'utilisation du spectre (opérateurs, industriels, organisations internationales). Ce processus vise à construire un consensus régional et mondial sur la meilleure façon de gérer le spectre, en faisant évoluer conjointement les cadres nationaux et international de manière à les adapter à l'évolution rapide des technologies et des usages, sans pour autant mettre en danger les investissements réalisés précédemment. Ce processus de production de règles et de normes d'application universelle, en place depuis 113 ans, a permis le développement de l'écosystème des radiocommunications tel que nous le connaissons aujourd'hui.

# Le cadre régional de la gestion des fréquences en Europe : un niveau élevé d'harmonisation, par la coopération entre l'UE, la CEPT et l'ETSI

Par Eric FOURNIER  
ANFR

## Introduction : Quels objectifs pour un cadre régional de la gestion des fréquences ?

Le cadre régional pour la gestion des fréquences prend appui sur le cadre mondial (Règlement des radiocommunications et recommandations de l'UIT). Comme lui, il définit un ensemble de règles et de lignes directrices dans l'usage des fréquences qui s'impose au cadre national.

L'UIT définit les règles en matière de fréquences dans les relations entre Etats membres, en privilégiant la souveraineté et le droit de chaque Etat à gérer le spectre comme il l'entend à condition de ne pas affecter les droits des autres Etats, ce qui conduit à une forme relativement souple d'harmonisation pour les usages essentiellement mondiaux (spatial, aéronautique, maritime) mais aussi pour la radiodiffusion, pour les communications mobiles (IMT, *International Mobile Communication*) depuis la « 3G » et pour de nombreux autres usages du spectre (transports terrestres, réseaux privés, Internet des Objets, WiFi, appareils de faible portée, etc.).

Dans le respect du cadre défini par l'UIT, c'est aux niveaux régional et national que se décide la répartition des fréquences entre les différents usages, et que les autorisations d'utilisation des fréquences sont octroyées, avec des conditions fixées par l'administration et le régulateur, par exemple aux opérateurs de réseaux mobiles ou aux éditeurs de la télévision et de la radio.

Il y a deux raisons essentielles qui expliquent le développement d'un cadre régional un peu partout dans le monde. Le cadre général de l'UIT ne garantit pas toujours la possibilité pratique de déploiement aux frontières, notamment pour des applications de radiocommunications qui peuvent parfois être incompatibles sur des distances de plusieurs dizaines, voire centaines de kilomètres. De plus, l'harmonisation de l'utilisation des fréquences est un outil de coopération régionale économique entre Etats voisins, notamment lorsqu'ils sont liés par des accords de libre-échange (UE, ALENA, ASEAN, etc.).

Ces deux logiques priment en Europe plus qu'ailleurs, avec la multiplication des zones frontalières liées à la faible superficie des pays et avec le marché unique européen. De fait, c'est en Europe que le cadre régional de gestion des fréquences est le plus achevé, et de loin, à travers le jeu institutionnel de l'Union européenne, de la CEPT, organisation moins connue mais rouage essentiel dans la gestion des fréquences en Europe, mais aussi d'autres organisations comme l'ETSI, l'organisme européen de normalisation dans le domaine des télécommunications et des équipements radio. D'autres régions ont défini un cadre régional, parfois en s'inspirant de ce que fait la CEPT, notamment les cinq autres organisations régionales reconnues par l'UIT dans le cadre des préparations des conférences mondiales des radiocommunications :

- la CITEL (Commission interaméricaine des Télécommunications), qui dépend de l'Organisation

des Etats américains (OEA/OAS) et qui produit aussi des recommandations en matière d'usage du spectre ;

- l'APT (*Asia-Pacific Telecommunity*), qui publie les rapports de son *Wireless Group* (AWG) ;
- la RCC (Communauté régionale des Communications), réunissant des pays de l'ex-URSS ;
- l'ASMG (*Arab Spectrum Management Group*);
- l'UAT/ATU (Union africaine des Télécommunications).

D'autres initiatives de coopération régionale ont également vu le jour à l'instar de l'*ASEAN Spectrum Policy Forum* (ASPF).

## **Le cœur de la gestion des fréquences en Europe : la Conférence européenne des Postes et Télécommunications (CEPT)**

La CEPT, créée en 1959, regroupe les administrations des postes et télécommunications de quarante-huit pays européens, incluant les petits pays européens, comme le Vatican ou Monaco, ainsi que les pays à l'Est de l'Europe, tels la Russie, la Géorgie et l'Azerbaïdjan. De fait, l'Arménie est le seul pays considéré habituellement comme faisant partie de l'Europe et resté en dehors de la CEPT.

La CEPT est constituée en trois comités, dont les présidents sont aussi coprésidents de la CEPT. La gestion des fréquences est traitée au sein du Comité des communications électroniques (ECC), qui regroupe l'expertise européenne, notamment technique, en matière de fréquences. La CEPT et l'ECC ont signé des accords de coopération avec les autres organisations régionales reconnues par l'UIT, avec la Commission européenne, avec les instances de normalisation européennes (ETSI, CENELEC), ainsi qu'avec de nombreuses associations sectorielles ou industrielles.

Bien que l'ECC soit l'instance décisionnelle ultime de la CEPT en matière de gestion des fréquences, les travaux sont en pratique menés dans le cadre de ses nombreux groupes de travail et d'équipes projets. La participation des industriels est libre au sein des équipes projets et se fait à travers la présence d'observateurs dans les réunions de l'ECC et des groupes de travail. De fait, cette participation est massive dans ces travaux avec par exemple plus d'une centaine de représentants de l'industrie dans l'équipe projet traitant des communications mobiles (4G, 5G...).

La CEPT dispose d'une structure permanente avec une douzaine de salariés, basée à Copenhague, l'ECO (*European Communication Office*), qui fournit l'expertise et l'assistance organisationnelle aux travaux de la CEPT, notamment la gestion des sites [www.cept.org](http://www.cept.org) et [www.efis.dk](http://www.efis.dk) (base de données sur l'utilisation des fréquences en Europe), l'organisation des consultations publiques, l'organisation d'ateliers d'échanges ou de formation, le développement d'outils (SEAMCAT), le suivi de l'activité d'autres organisations (ETSI notamment), etc.

## **Le cadre régional européen pour les droits d'utilisation des fréquences**

L'harmonisation européenne du spectre est historiquement fondée sur des décisions et recommandations ECC désignant les bandes de fréquences pour certaines applications et définissant les conditions techniques associées. Cette harmonisation se fait généralement en réponse aux demandes de l'industrie, formulées à travers un processus éprouvé entre l'ETSI et la CEPT, ou parfois directement par une administration. Elle est le résultat de travaux techniques menés par les experts des administrations et de l'industrie, notamment des études de compatibilité, et d'un arbitrage entre les besoins des différents utilisateurs du spectre.

Les administrations de la CEPT, notamment la France, veillent à mettre en œuvre la plus grande partie des décisions de l'ECC. Cependant, dans le cadre du marché unique, l'application volontaire

de cette harmonisation et l'absence de calendrier de mise en œuvre n'étaient pas satisfaisantes et la décision « spectre » (676/2002/EC) du Parlement européen et du Conseil a défini à partir de 2002 la procédure permettant d'aboutir à une harmonisation contraignante pour les États membres de l'Union dans certaines bandes de fréquences, en s'appuyant sur l'expertise de la CEPT et sur un comité du spectre radioélectrique (RSCOM) réunissant les représentants des États membres.

En pratique, la Commission européenne, lorsqu'elle estime nécessaire l'harmonisation d'une bande, donne mandat à la CEPT, après avis du RSCOM, pour développer des conditions techniques harmonisées. La Commission s'appuie sur les résultats de ces travaux pour élaborer des décisions d'exécution, incluant les conditions techniques et une date de mise à disposition, qui ne peuvent être adoptés que si le RSCOM adopte un avis favorable selon les règles de vote du traité de Lisbonne. Ces décisions d'harmonisation s'imposent alors à chaque État membre. Depuis 2002, ce cadre a permis une harmonisation complète de nombreuses bandes de fréquences au sein de l'Union européenne, essentiellement dans le domaine des communications mobiles (bandes attribuées aux opérateurs) et des appareils de faible portée (y compris WiFi et IoT). Les décisions de l'ECC, nécessairement cohérentes compte tenu du poids des pays de l'UE au sein de la CEPT, facilitent une harmonisation plus large.

La CEPT met à disposition ([www.efis.dk](http://www.efis.dk)) des administrations et des industriels toutes les informations sur les tableaux nationaux de répartition des fréquences, sur les autorisations dans chaque pays et sur la documentation pertinente pour chaque bande. Il s'agit d'un autre exemple où la réglementation communautaire intervient pour rendre obligatoire pour chaque État membre la fourniture de cette information.

Par ailleurs, la CEPT reste un forum d'échange d'expériences en matière de gestion des fréquences. Ainsi, elle adopte des recommandations sur les méthodes de contrôle du spectre et elle partage les informations concernant les brouillages constatés dans chaque pays.

## **Le cadre européen pour la mise sur le marché des équipements radioélectriques**

Comme dans pratiquement tous les domaines, la mise sur le marché européen (UE) des équipements radioélectriques suit la « nouvelle approche ». La directive RED (*Radio Equipment Directive*) fixe des exigences essentielles pour la mise sur le marché des produits et les organismes de normalisation – en pratique, l'ETSI dans ce domaine – adoptent des normes harmonisées qui proposent des moyens pour respecter ces exigences. Bien que la directive prévoit la possibilité d'autres moyens pour respecter les exigences essentielles (en faisant appel à des « organismes notifiés »), les industriels du secteur s'appuient quasi exclusivement sur les normes harmonisées de l'ETSI dans leur déclaration de conformité.

Le lien avec les droits d'utilisation du spectre est évident. La directive RED impose que « les équipements radioélectriques sont construits de telle sorte qu'ils utilisent efficacement le spectre radioélectrique et contribuent à son utilisation optimisée afin d'éviter les brouillages préjudiciables ». Les normes harmonisées de l'ETSI doivent donc être cohérentes avec les conditions techniques d'utilisation des fréquences et, plus largement, avec les résultats des études de compatibilité de la CEPT. Cette cohérence est obtenue par le biais de la coopération étroite entre la CEPT et l'ETSI. Le développement des décisions d'harmonisation et des normes harmonisées se fait habituellement en parallèle, avec une mise en cohérence assurée à chaque étape par des échanges entre les groupes pertinents de la CEPT et de l'ETSI.

Il existe aussi une coopération en « aval » entre les États membres en ce qui concerne la surveillance du marché, qui vise à vérifier la conformité des produits avec les exigences essentielles, et donc



les normes harmonisées, en testant des équipements prélevés sur le marché. L'ADCO/RED (*Administrative Cooperation Group*) organise ainsi des campagnes européennes de surveillance du marché lorsqu'une non-conformité importante est suspectée. Ce fut récemment le cas pour les équipements WiFi 5 GHz qui causent encore aujourd'hui de nombreux brouillages aux radars météorologiques.

## **Le pilotage stratégique de la gestion des fréquences en Europe**

Dès 2002, la Commission européenne a créé un groupe d'experts de haut niveau de chaque État membre, le RSPG (*Radio Spectrum Policy Group*), afin de dégager des orientations stratégiques dans le domaine du spectre. Ce groupe développe et adopte, habituellement sur la base du consensus, des avis ou des rapports sur de nombreux sujets :

- développement du cadre réglementaire européen ;
- dividendes numériques ;
- besoins en spectre pour les réseaux mobiles (dont la 5G), pour l'IoT, pour les transports intelligents, pour les auxiliaires de radiodiffusion, pour les services de sécurité, pour les services scientifiques, etc ;
- partage du spectre, technologies cognitives, lien entre les réglementations d'utilisation du spectre et de mise sur le marché ;
- cadre d'autorisation : marché secondaire, utilisation collective du spectre, accès partagé au spectre.

Ces avis ont souvent servi de base aux actions de la Commission européenne en faveur de l'harmonisation européenne, par le truchement des mandats à la CEPT ou de propositions législatives.

La Commission européenne a souhaité introduire en 2012 une dimension programmatique à la gestion des fréquences en faisant adopter une décision du Parlement européen et du Conseil sur le programme pluriannuel sur les politiques dans le domaine du spectre radioélectrique (RSPP). Cette décision définit des objectifs généraux pour la gestion des fréquences et aborde les questions d'autorisation, notamment en fixant des dates butoirs pour la délivrance des autorisations aux opérateurs dans plusieurs bandes harmonisées.

Le RSPP n'a pas été révisé depuis, mais l'adoption en 2019 du nouveau Code européen des communications électroniques a été l'occasion d'intégrer à la réglementation européenne de nouveaux objectifs liés aux autorisations, par exemple pour les autorisations des nouvelles bandes 5G ou le déploiement des petites cellules, ainsi que de nouvelles compétences communautaires en matière de coordination aux frontières ou de revue par les pairs des procédures d'autorisation dans les bandes harmonisées, dont la mise en œuvre s'appuiera dans les deux cas sur le RSPG.

Les débats lors de l'élaboration de ce code ont montré que les États membres ne souhaitent pas significativement changer le curseur des compétences sur les autorisations entre l'Union européenne et les États membres, ceux-ci devant seulement respecter des objectifs généraux et conservant la mainmise sur les procédures d'autorisations et les conditions non techniques (couverture, enchères, etc.). Ainsi, le cas de la bande de fréquences 1980-2010/2170-2200 MHz – qui avait fait l'objet d'une procédure européenne de sélection des opérateurs mobiles par satellite (autorisations détenues aujourd'hui par Inmarsat et Echostar) en 2009 – restera le seul exemple d'une harmonisation dans ce domaine, justifiée par la couverture intrinsèquement européenne des services offerts.

## **La coordination aux frontières en Europe**

La coordination entre les stations radioélectriques des différents pays se fait essentiellement sur une base bilatérale. Néanmoins, la prise de conscience des conséquences en cas de difficulté de coordination aux frontières sur la disponibilité réelle des bandes a conduit à multiplier les initiatives visant à faciliter cette coordination.

Depuis 2003, un accord HCM (*Harmonized Calculation Method*) définit un cadre de coordination entre dix-sept pays continentaux, dont la France, pour le service fixe et le service mobile terrestre entre 29.7 MHz et 43.5 GHz : format d'échange des données, procédures pour obtenir les accords, méthodes communes de calcul, etc.

La CEPT adopte de son côté des recommandations définissant les seuils de coordination aux frontières et proposant des boîtes à outils pour faciliter la coordination, en complément des recommandations de l'UIT en la matière. La coordination entre réseaux 5G dans la bande de fréquences 3 400-3 800 MHz pose ainsi la question de l'intérêt d'une synchronisation entre réseaux aux frontières.

Les chantiers de coordination aux frontières qu'ont constitués les replanifications successives des bandes de la télévision afin de prendre en compte le dividende numérique et la libération des bandes 700 MHz et 800 MHz au profit des opérateurs mobiles ont conduit les administrations, en Europe et ailleurs, à constituer des groupes *ad hoc* établissant les nouveaux plans sur une base multilatérale, à l'instar du WEDDIP (*Western Europe Digital Dividend Implementation Group*).

Par ailleurs, au niveau communautaire, le RSPG avait établi dès 2012 un groupe de « bons offices » pour s'assurer que la coordination aux frontières ne soit pas un obstacle au premier dividende numérique dans la bande 800 MHz et pour traiter le sujet des brouillages causés par l'Italie aux pays voisins dans les bandes de radiodiffusion, à cause d'autorisations octroyées dans le passé au mépris de ses obligations internationales. L'importance de la coordination aux frontières se manifestant à nouveau dans des dossiers aussi stratégiques que la bande des 700 MHz et la 5G, le nouveau Code européen des communications électroniques a institutionnalisé les « bons offices » du RSPG et a apporté une solution juridique pour imposer son résultat dans le cas où une difficulté de coordination ou des brouillages affectent l'utilisation d'une bande harmonisée.

## **Coordonner les intérêts européens au sein de l'UIT-R**

La CEPT étant une organisation régionale reconnue par l'UIT, elle soumet aux Conférences mondiales des radiocommunications (CMR) des propositions européennes communes (ECP) pour répondre à chacun des points à l'ordre du jour sous la forme de modifications du Règlement des radiocommunications (RR). Cette préparation européenne des CMR se fait dans le cadre d'un groupe de travail spécifique de l'ECC, le CPG (*Conference Preparatory Group*). Elle couvre les quatre ans séparant les CMR, en contribuant notamment aux travaux préparatoires au sein de l'UIT-R. L'importance du cadre international du RR pour de nombreux secteurs, notamment le spatial, les transports (y compris aéronautique et maritime), les services scientifiques, la radiodiffusion et les communications mobiles, se traduit par une forte mobilisation de l'industrie et des administrations dans ces travaux. Dans ce domaine, le niveau de coordination des autres régions du monde est comparable à celui de l'Europe.

Les activités de l'UIT-R en dehors des CMR et des travaux préparatoires peuvent parfois aussi faire l'objet de contributions coordonnées de la CEPT, par exemple pour promouvoir les approches réglementaires européennes et les conditions harmonisées d'utilisation de certaines bandes.



Au niveau communautaire, des objectifs politiques communs étaient auparavant définis par le biais de conclusions du Conseil. Depuis la CMR-19, des positions de l'Union européenne sont définies pour certains points à l'ordre du jour, à travers une décision du Conseil, en accord avec les traités européens qui imposent cette procédure dans le cas où l'acquis européen pourrait être affecté par les décisions de la conférence. Cette décision s'impose aux États membres pour la signature des ECP correspondantes et dans le cadre de la négociation pendant les conférences. Néanmoins, ces positions sont formulées sous forme d'objectifs sans être aussi explicites que des propositions de modification du Règlement des radiocommunications.

**Conclusion :**  
**Vingt ans de coopération entre UE, CEPT et ETSI ont permis d'aboutir à une utilisation très largement harmonisée des fréquences en Europe**

Le cadre juridique de l'harmonisation des fréquences – la décision « spectre » de 2002 – est resté inchangé depuis, ce qui est remarquable dans l'environnement réglementaire européen. Aujourd'hui, l'équilibre entre l'harmonisation obligatoire communautaire, l'harmonisation volontaire CEPT et ce qui reste déterminé pleinement au niveau national semble atteint et il s'agit surtout de mettre à niveau cette harmonisation au fur et à mesure de l'évolution des usages du spectre (arrivée de la 5G, nouvelles applications de faible portée, transports terrestres, etc.). L'harmonisation du spectre au sein de l'UE est utilisée comme cadre de référence pour la gestion des fréquences dans les autres pays européens, mais aussi en Afrique ou au Moyen-Orient, voire au-delà.

Les limites de l'harmonisation européenne de l'utilisation des fréquences sont toujours en discussion, avec parfois la demande des États membres d'une plus grande flexibilité pour mieux prendre en compte les spécificités nationales, notamment les demandes réelles du marché. D'un autre côté, l'inconvénient de cette flexibilité apparaît de manière évidente dès qu'il s'agit de répondre en commun aux besoins pour de nouveaux usages du spectre et que les spécificités nationales y font obstacle. Aujourd'hui, les lignes bougent doucement sur d'autres éléments de l'harmonisation : la coordination aux frontières, dont l'importance a été comprise lors du premier dividende numérique, et les procédures d'autorisation, chasse gardée des États membres.

# La gestion nationale

Par Gilles BRÉGANT  
ANFR

Le spectre radioélectrique est devenu essentiel pour assurer le fonctionnement de nombreux services de la collectivité nationale, qu'il s'agisse de défense ou de développement économique. Pourtant, cette ressource reste intrinsèquement vulnérable : quiconque détient un émetteur et un récepteur peut s'insérer inopinément sur une bande de fréquences et perturber dans l'instant tous les dispositifs alentour. En outre, elle s'accommode mal d'usages trop hétérogènes : si les mêmes fréquences sont exploitées par des émetteurs de puissances très différentes, les récepteurs les plus sensibles seront aveuglés par la source la plus forte. Pour parvenir à tirer le meilleur parti du spectre et à densifier son usage, il est donc indispensable de le gérer.

Gérer les fréquences radioélectriques, patrimoine immatériel de l'État, peut sembler une tâche redoutablement virtuelle. Elle présente pourtant de nombreux points communs avec la gestion d'un autre patrimoine plus familier : la ressource foncière. Lorsqu'elle souhaite mettre en valeur un nouvel espace, une commune doit ainsi définir un plan d'occupation des sols, puis viabiliser les lieux. Ensuite, elle délivrera des permis de construire, qui permettront l'édification de bâtiments par des tiers, qu'il s'agisse de particuliers, de services publics, de promoteurs ou d'autres entreprises. Enfin, une fois le nouveau quartier construit, l'administration s'assurera que l'ordre y règne et que les constructions restent toujours conformes aux autorisations. Ce triptyque du gestionnaire foncier (conception, mise en œuvre, contrôle) vaut aussi pour la gestion du spectre, qui est assurée en France par un établissement public administratif, l'Agence nationale des Fréquences (ANFR).

## Concevoir un « plan d'occupation du spectre »

Un plan d'occupation des sols traditionnel doit tenir compte des contraintes du terrain, des diverses servitudes préétablies (voies de circulation préexistantes, par exemple), mais aussi des attentes placées dans le nouveau quartier. De la même manière, le plan d'occupation du spectre dépend de nombreuses contraintes et suppose de tenir compte des besoins des nouveaux services envisagés.

Les contraintes liées à l'exploitation d'une bande de fréquences proviennent, en premier lieu, des accords internationaux applicables. La France, pays membre de l'UIT, s'est ainsi engagée à respecter le Règlement des Radiocommunications (RR), qui limite, dans chaque bande de fréquences, les services qui peuvent y être implantés. Le respect de ces règles<sup>(1)</sup> permet de tirer parti des possibilités qui y sont attachées : elles rendent par exemple possible, sans disposition spécifique, le survol de notre pays par le trafic aérien international ou l'utilisation de terminaux standardisés, donc moins coûteux (télévisions, autoradios, téléphones portables).

Ces règles, toutefois, sont en perpétuelle évolution au sein de l'instance mondiale qu'est l'UIT ou des instances continentales (CEPT, Union européenne). Pour qu'elles conviennent au mieux aux intérêts de notre pays, c'est donc au moment de leur conception qu'il convient d'influer sur les règles. Tous les pays procédant de la même manière, c'est, paradoxalement, à la table des négociations

---

(1) Cet engagement ne vaut que vis-à-vis des autres États : l'usage d'une bande de fréquences peut ainsi s'affranchir du RR à condition que cette singularité ne soit pas observable à nos frontières.

internationales que s'élabore en grande partie l'évolution de l'usage des fréquences nationales. C'est le rôle de l'équipe internationale de l'ANFR, formée de véritables diplomates du spectre qui interagissent en permanence avec leurs homologues pour imaginer les nouveaux articles du RR ou les textes des décisions de la CEPT. C'est ainsi que s'élaborent de véritables « modes d'emploi » consensuels des futurs services envisagés, précisant par exemple les caractéristiques des émetteurs ou l'intensité maximale des rayonnements parasites dans les bandes adjacentes.

Pour s'assurer que les orientations prises soient conformes aux intérêts nationaux, il convient de réunir régulièrement les usagers français du spectre. En premier lieu, ceux-ci sont issus des *affectataires*, principales administrations françaises exploitant des fréquences radioélectriques. Il existe onze affectataires, représentés au conseil d'administration de l'ANFR : le CSA, l'ARCEP, les ministères chargés de la défense, de l'intérieur, de la recherche, des affaires maritimes, de l'outre-mer, les Hauts-Commissaires de la République dans les communautés d'outre-mer, la Direction générale de l'Aviation civile, le Centre national d'Études spatiales et Météo France. Les comités de l'ANFR rassemblent également la plupart des entreprises, publiques ou privées, qui utilisent des fréquences. Parmi celles-ci, les opérateurs de satellites, les opérateurs mobiles, les groupes audiovisuels ou les entreprises de transport aérien, maritime ou ferroviaire sont bien sûr présents de longue date, mais de nouveaux entrants les ont rejoints, qu'il s'agisse d'acteurs du transport routier, en prévision des véhicules autonomes, ou de *start-up* développant des projets de services sans fil. Ces discussions s'inscrivent toujours dans une logique de déploiement à cinq ou dix ans : il existe ainsi une synergie naturelle entre gestion du spectre et R&D industrielle. Lorsque des divergences apparaissent entre projets, des conciliations sont le plus souvent proposées par l'ANFR. Si le désaccord persiste, un arbitrage est pris par le Premier ministre.

La résultante de ces contraintes internationales et des aspirations des acteurs nationaux se trouve périodiquement transcrite dans le tableau national de répartition des bandes de fréquences (TNRBF). Ce texte décrit les services autorisés dans chaque bande de fréquences, sur tous les territoires de la République. Il est approuvé par le Premier ministre et s'impose à tous les affectataires. La France présente la particularité de disposer d'un TNRBF en trois parties, correspondant aux trois « Régions » de l'UIT : la Métropole, la Réunion et Mayotte appartiennent ainsi à la Région 1 (Europe/Moyen-Orient/Afrique), les Antilles et la Guyane s'inscrivent dans la Région 2 (Amériques) tandis que la Polynésie française et la Nouvelle-Calédonie ressortissent à la Région 3 (Asie-Océanie). Notre pays planifie ainsi ses fréquences selon les trois approches spécifiques de ces zones qui sont longtemps restées découplées pour leurs usages terrestres.

Enfin, le plan d'occupation du spectre défini par le TNRBF doit être rendu possible, ce qui suppose un travail de « viabilisation » des bandes identifiées pour les nouveaux services. Le spectre constitue une ressource finie, dont l'usage de plus en plus intensif crée la rareté. Certes, quelques bandes restent encore peu employées, en particulier vers les très hautes ou très basses fréquences ; mais la demande se concentre néanmoins sur des bandes plus aisément exploitables, aujourd'hui toutes occupées par des services préexistants. Il convient donc, au préalable, d'exproprier ces usagers pour permettre à d'autres services de se déployer. Cette opération, appelée « réaménagement de fréquences », suppose en général d'identifier une nouvelle bande d'accueil pour le service déplacé. Mais un réaménagement peut constituer un préjudice pour l'exploitant exproprié, qui doit en effet remplacer tous ses émetteurs et tous ses récepteurs à cette occasion. Pour en limiter les effets, l'ANFR peut prendre temporairement en charge ce surcoût, puis obtenir un remboursement des sommes avancées de la part des nouveaux occupants de la bande de fréquences. Dans de nombreux pays, organiser le financement de l'éviction des services préexistants constitue un obstacle régulièrement renouvelé à la mise en œuvre des possibilités offertes après chaque révision du RR. La France, grâce à ce dispositif institutionnel de préfinancement, évite cet écueil.

## **Mettre en œuvre des autorisations d'émission**

Lorsqu'une bande de fréquences est attribuée à un nouveau service, l'initiative du déploiement revient aux affectataires. Les entités gouvernementales, comme le ministère chargé de la défense ou la DGAC, ne peuvent utiliser ces bandes que pour leurs besoins propres. En revanche, le CSA ou l'Arcep sont deux autorités administratives indépendantes qui peuvent légalement transférer l'usage des fréquences à des tiers. Le CSA conclut ainsi des conventions avec des entreprises de médias, qu'il s'agisse de radios ou de télévisions, tandis que l'Arcep délivre des licences à des entités de tous types, qu'il s'agisse de grandes entreprises, à l'instar des opérateurs mobiles ou de la RATP, de PME ou d'administrations. Chaque affectataire, à l'issue de procédures qui leur sont propres, recueille ainsi de nombreux projets localisés d'émetteurs : relais de télévision, antennes-relais de téléphonie mobile, radars d'observation, réseaux de capteurs de crues, etc. *Mutatis mutandis*, il s'agit d'autant de « permis de construire » qu'il convient alors d'instruire.

Le seul véritable premier permis de construire est celui qui autorisera l'exploitant à construire l'édifice au sommet duquel sera implantée une antenne. Ce permis n'appartient pas en France au domaine de la gestion du spectre. Il s'agit d'une autorisation d'urbanisme, qui sera délivrée par la mairie compétente.

L'ANFR, quant à elle, instruit le permis d'exploiter des fréquences à partir de cet édifice. Chaque projet est ainsi soumis en consultation à tous les affectataires, qui peuvent, pendant quatre semaines, s'opposer à sa réalisation. Si tel est le cas, l'autorisation de l'ANFR est suspendue et une conciliation débute, dont l'objectif est de définir les restrictions qui permettront à cette nouvelle fréquence d'être insérée dans l'environnement radioélectrique préexistant. Lorsque les autorisations sont délivrées, elles sont consignées dans une base nationale, véritable cadastre qui permet d'enregistrer les caractéristiques autorisées, mais aussi d'obtenir le droit d'être protégé d'émetteurs à venir ou d'éventuels brouillages transfrontaliers. Cette base est reflétée, pour les émetteurs civils, sur un site web public : [www.cartoradio.fr](http://www.cartoradio.fr)

Pour éviter les brouillages, des émetteurs voisins doivent avoir des caractéristiques compatibles. Cette mise en cohérence des émetteurs dans une zone donnée est appelé « coordination ». Les émetteurs français font l'objet d'une coordination entre eux sur le territoire national, assurée le plus souvent par l'affectataire au sein de ses bandes de fréquences, et, si nécessaire, par l'ANFR lorsque sont mis en jeu des émetteurs n'appartenant pas aux mêmes affectataires. Cette situation se produit naturellement toujours aux frontières, où les émetteurs français doivent s'insérer dans un environnement contraint par le rayonnement d'émetteurs étrangers. L'ANFR, en lien avec les affectataires, négocie ainsi régulièrement des accords transfrontaliers, en particulier pour les réseaux audiovisuels, qui utilisent des fréquences à longue portée, dont l'influence s'exerce sur plusieurs dizaines de kilomètres de part et d'autre des frontières. L'Europe, continent constitué de nombreux pays développés – donc dotés de réseaux hertziens très denses –, à la superficie parfois modeste au regard des distances de propagation de certaines fréquences, constitue l'un des espaces de coordination les plus complexes au monde.

## **Faire appliquer les règles**

La troisième composante de la gestion du spectre s'exerce *a posteriori*, après le déploiement des émetteurs. Il s'agit de vérifier que les émetteurs en fonction correspondent toujours aux autorisations enregistrées dans les bases. En cas de brouillage préjudiciable, l'objectif est d'enquêter pour mettre fin aux perturbations et proposer des paramètres plus sûrs. Cette fonction est assurée par certains affectataires, qui, à l'instar du CSA, sont dotés d'agents territoriaux équipés d'appareils de mesure qui peuvent intervenir sur les diffusions audiovisuelles problématiques. Il en va de

même pour le ministère chargé de la défense, capable de remédier aux principaux brouillages survenant dans ses zones d'opération, qu'elles soient en France ou à l'étranger. En revanche, cette police du spectre est assurée par l'ANFR pour la plupart des autres affectataires, grâce aux services régionaux de l'établissement. Cette activité suppose un investissement récurrent dans des équipements techniques (analyseurs de spectre, goniomètres, par exemple) et une formation régulière des contrôleurs pour qu'ils soient à même d'appréhender les nouveaux types de brouillage qui surviennent au fil de l'évolution des services. En effet, un brouillage entre deux radios FM est, par exemple, beaucoup plus simple à caractériser qu'une perturbation intermittente d'un radar de météorologie par un réseau communal de vidéosurveillance, distant de quatre-vingts kilomètres, ou qu'une perturbation de l'espace aérien provoquée par des brouilleurs mobiles de GNSS.



Contrôle des fréquences au sommet du G7 à Biarritz.  
©ANFR

L'application des règles permanentes, découlant du cadastre des fréquences enregistré dans les bases de l'ANFR, se complète d'une gestion des grands événements médiatiques ou technologiques, qui supposent de mettre en œuvre, pour un délai limité, de véritables « villes éphémères des fréquences ». Les 24 Heures du Mans, par exemple, reposent sur de nombreux réseaux hertziens fonctionnant dans un espace restreint et dont la permanence de service est critique pour le succès de l'événement. Ils permettent en effet le retour en temps réel vers le PC de chaque écurie des paramètres de tous les véhicules, l'envoi de flux vidéo captés dans les voitures vers les terminaux des tribunes, la diffusion d'une station FM temporaire, les liens de contribution vidéo et audio des différents médias présents, le pilotage de drones, les liaisons de sécurité et d'alerte des organisateurs, les communications des services régaliens mais aussi le renforcement temporaire des capacités des réseaux mobiles pour accueillir les visiteurs. L'ANFR supervise en temps réel ces opérations majeures, dont la plus complexe demeure aujourd'hui le Tour de France, mais qui culmineront bientôt avec les Jeux Olympiques de Paris en 2024.

Enfin, le contrôle des émetteurs n'exclut pas celui des terminaux. La France, pays de l'Union européenne, n'exige plus d'agrément préalable pour la mise sur le marché d'un nouveau terminal radioélectrique, qu'il s'agisse d'un terminal de sauvetage en mer ou d'un téléphone portable. L'accès au marché européen est en effet libre, sous réserve que les constructeurs puissent faire la preuve qu'ils respectent les textes européens. Néanmoins, l'ANFR conserve la faculté de vérifier la conformité des terminaux proposés à la vente en France. Elle exerce régulièrement cette prérogative, notamment pour contrôler le niveau d'émission des téléphones portables, mesuré par leur DAS

(Débit d’Absorption spécifique). Les résultats de ces contrôles font l’objet de communications régulières et sont disponibles en *open data*. Ils sont également partagés avec l’ANSES, agence de référence pour les aspects sanitaires de l’exposition radioélectrique, qui propose au gouvernement des orientations pour garantir la sécurité du public et qu’applique ensuite l’ANFR au quotidien.

## **Préparer l’avenir**

L’explosion des usages sans fil provoque aujourd’hui une densification de l’usage du spectre. Pour y faire face, les technologies employées se complexifient régulièrement, permettant ainsi de transmettre plus d’informations, à largeur de bande équivalente. Cette pression technologique se traduit naturellement par une évolution des méthodes de gestion, pour leur donner plus d’efficacité et pour favoriser la prévention par rapport à la résolution des brouillages, toujours plus coûteuse. Les principales tendances sont les suivantes :

- La *partage du spectre*, qui permet d’attribuer une même bande de fréquences à plusieurs types de services ; cette approche explore désormais des algorithmes qui permettent de moduler l’émission des sources en fonction de l’espace ou du temps pour limiter *a priori* les brouillages ; la gestion du spectre s’infléchit ainsi vers une action en temps réel ;
- La *montée en fréquences*, rendue nécessaire par l’encombrement des fréquences plus basses, mais aussi par des architectures permettant de gérer de manière coordonnée de nombreux relais proches (compensant les faibles portées) et des techniques de récupération des erreurs de transmission créées par les obstacles physiques, jusqu’alors problématiques dans ces gammes ; c’est ainsi que les ondes millimétriques, naguère réservées à l’espace libre (satellites, faisceaux hertziens, radars), accueilleront prochainement des réseaux 5G en milieu urbain dense ;
- La *multiplication des sources*, liée aux deux tendances précédentes, qui vont accroître sensiblement les émetteurs à recenser, en s’accompagnant d’une baisse importante de leur puissance unitaire ; ce phénomène s’observe tant au niveau des communications terrestres (« petites antennes » urbaines pour la 5G, capteurs multiples des villes intelligentes...) que spatiales, où les méga-constellations en orbite basse vont décupler le nombre de satellites actifs ; ces sources plus nombreuses peuvent concourir à rendre les brouillages plus fréquents, plus intermittents, donc plus complexes à résoudre.

La gestion française du spectre s’adapte donc constamment, pour maintenir et consolider l’ordonnancement rigoureux qui est la condition d’existence des services sans fil en France. Cette faculté d’adaptation constitue la clé de voûte de « l’école française de la gestion des fréquences », reconnue à l’international, qui concourt à notre souveraineté et ouvre des opportunités de développement à nos acteurs économiques, qu’ils soient constructeurs de satellites, *start-up* ou opérateurs de réseaux.

# Le contrôle du spectre

Par **Nicolas SPANJAARD-HUBER**

ANFR

Le contrôle des stations, des équipements et des réseaux radioélectriques a pour objectifs :

- de s'assurer de leur conformité à la réglementation ;
- d'instruire et de résoudre les cas de perturbation signalés ;
- de vérifier que l'exposition du public aux champs électromagnétiques reste dans les limites définies par la réglementation et, au-delà, de contenir cette exposition aux valeurs les plus basses possibles.

Cette action de « police des fréquences » est essentielle pour garantir l'accès au spectre pour l'ensemble de ses utilisateurs et ainsi la disponibilité des services et la sécurité des investissements, mais aussi pour la sécurité de tous nos concitoyens. Elle s'articule en France autour de plusieurs actions menées par l'Agence nationale des Fréquences (ANFR) :

- contrôle de conformité des stations et des réseaux radioélectriques ;
- contrôle des stations de sécurité à bord des navires ;
- surveillance du marché des équipements radioélectriques ;
- traitement des cas de brouillage signalés ;
- protection de la réception de la télévision hertzienne ;
- mesures *in situ* du champ électromagnétique.

## **Contrôle de conformité des stations et des réseaux radioélectriques**

L'action de contrôle des installations radioélectriques comprend notamment la vérification du respect des conditions réglementaires qui sont définies, d'une part, dans les autorisations d'utilisation de fréquences pour les stations relevant de l'ARCEP et, d'autre part, dans les conditions d'utilisation spécifiées au moment de l'enregistrement des stations dans les bases de données de l'ANFR et de l'Union internationale des Télécommunications (UIT). Ces contrôles préventifs, ou contrôles de conformité, permettent la cohabitation harmonieuse des utilisateurs de fréquences sur les sites radioélectriques. Ils poursuivent trois objectifs principaux :

- limiter les brouillages en vérifiant la conformité des installations radioélectriques aux autorisations délivrées par l'ANFR ;
- confirmer que les fréquences utilisées sont celles qui font l'objet d'un enregistrement au Fichier national des Fréquences permettant leur protection, ou d'une autorisation d'utilisation des fréquences ;
- s'assurer que toutes les utilisations sont déclarées et garantir au maximum la fiabilité des données de l'ANFR.

Ils sont de trois types :

- les inspections de sites radioélectriques (ISR) ;
- les contrôles « inopinés » de stations ;
- les contrôles de réseaux radioélectriques indépendants.



## Les inspections de sites radioélectriques

Les différentes étapes de ces inspections sont notamment :

- l'envoi d'une convocation à chaque cohabitant avant l'inspection du site ;
- le relevé des coordonnées géographiques, des caractéristiques du pylône, des installations et des utilisateurs ainsi que des fréquences émises et reçues, lors du contrôle ;
- la compilation des éléments du contrôle et, le cas échéant, la mise en évidence des écarts par rapport aux données figurant dans les bases notariales ;
- la notification aux utilisateurs des actions de correction à apporter aux éléments déclarés assortie, le cas échéant, d'une taxe forfaitaire selon la gravité de l'écart constaté.

### Les contrôles dits « inopinés »

Ils n'obéissent pas au formalisme décrit ci-dessus. Ce sont des contrôles allégés sur des sites où la concentration radioélectrique est moindre en comparaison avec l'inspection radioélectrique des points hauts. Ils en suivent cependant les mêmes étapes, hormis l'envoi d'une convocation.

### Le contrôle des réseaux radioélectriques indépendants

Les contrôles portent sur la conformité du réseau vis-à-vis de l'autorisation délivrée par l'Autorité de Régulation des Communications électroniques, des Postes et de la Distribution de la Presse (ARCEP). Ils permettent notamment d'en vérifier les zones d'utilisation et les fréquences utilisées.



Utilisation d'un drone à des fins de vérification de la conformité d'un site radioélectrique : le site d'Aussaguel de télécommunications par satellite. © ANFR

## Contrôle de conformité des stations spatiales

L'ANFR ne possède pas de ressources propres pour le contrôle de conformité des stations spatiales, qu'il s'agisse de satellites géostationnaires ou non. En revanche, grâce à la signature d'un accord entre différentes administrations européennes, elle possède un accès privilégié à la station allemande de Leeheim, proche de Francfort. Elle a ainsi notamment pu exercer une action de contrôle sur des constellations de satellites non géostationnaires en vue de permettre leur coexistence avec la radioastronomie.

Notons aussi que cette station dispose d'un système de localisation des stations terriennes (stations au sol émettant vers l'espace) par mesure des écarts en temps et fréquences des signaux émis de plusieurs répéteurs sur satellite.



## Contrôle des stations de sécurité à bord des navires

Dans le cadre d'une convention avec la Direction des Affaires maritimes, l'ANFR contrôle les équipements radioélectriques à bord des navires. Le contrôle est approfondi (le contrôle va jusqu'à vérifier la qualité de leur alimentation électrique) d'autant que ces équipements participent au SMDSM (Système mondial de Détresse et de Sécurité en Mer) et sont essentiels à la sauvegarde de la vie humaine en mer. L'ANFR formule au besoin des préconisations et en surveille l'exécution. En cas d'inobservance, elle en informe la commission de sécurité compétente et le navire peut se voir privé du renouvellement de son permis de navigation. Notons que l'ANFR a réalisé plus de 90 000 contrôles depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2000 et qu'il existe des exemples où les préconisations de l'ANFR ont été particulièrement bénéfiques : ayant été observées, tous les passagers ont pu être rapidement sauvés lors d'un naufrage, les services de secours ayant pu recevoir l'appel de détresse et le localiser grâce au bon fonctionnement des équipements radioélectriques.

## Surveillance du marché des équipements radioélectriques

Il s'agit du contrôle de conformité des équipements en vente sur le marché français. Une directive européenne prévoit que ces équipements sont déclarés, selon une stricte procédure, conformes à la réglementation européenne par la personne responsable de leur mise sur ce marché. Les contrôles ont donc lieu lorsque les équipements se trouvent sur l'étal des magasins. Ils prennent deux formes :

- le contrôle de la conformité administrative des équipements, à savoir un contrôle visuel de leur marquage et de leur documentation ;
- le contrôle de la conformité technique des équipements. Ceux-ci sont alors prélevés sur leurs lieux de vente, puis testés par un laboratoire désigné par le ministre en charge des communications électroniques, cette désignation imposant *a priori* au laboratoire une accréditation COFRAC ou équivalente. Notons que l'ANFR attache une importance toute particulière dans ce contexte à la vérification des DAS des équipements portés près du corps, notamment des téléphones.

En cas de non-conformité, l'ANFR en exige la correction, voire son retrait volontaire du marché. Cette demande, si elle n'est pas suivie d'effet, peut conduire à des amendes infligées par l'ANFR, à la transmission d'un procès-verbal au procureur et à un retrait du marché, voire du service, prononcé par le ministre en charge des communications électroniques.

## Traitement des cas de brouillage signalés

Bien que l'ANFR prenne toutes les précautions préventives possibles pour permettre une coexistence pacifique de tous les équipements et installations autorisés, des brouillages peuvent survenir et l'ANFR intervient de façon curative sur les perturbations qui lui sont signalées à condition :

- que la perturbation affecte un service de radionavigation ou tout autre service de sécurité, ou présente un caractère répété voire permanent ;
- et qu'elle affecte un système radioélectrique ayant reçu son accord et figurant ainsi dans son fichier national des fréquences. Cependant, l'ANFR interviendra pour des systèmes n'ayant jamais été présentés à ce dernier fichier, mais à forte criticité (stations indispensables à la sécurité physique des personnes, par exemple).

Notons aussi que l'ANFR peut intervenir pour des systèmes radioélectriques ne bénéficiant pas de garantie de protection (cas des télécommandes grand public par exemple), mais ce n'est pas une obligation ; cependant, l'identification de l'équipement à l'origine de la perturbation conduit souvent à la mise en évidence d'un irrespect réglementaire.

L'ANFR intervient par utilisation de moyens fixes, transportables ou mobiles en vue d'identifier et de localiser l'origine du brouillage. Ceux-ci ont des causes très diverses et souvent inintentionnelles :

- source radioélectrique défectueuse voire non conforme (défaut d'ingénierie, brouilleurs, répéteur de téléphonie mobile non autorisé, téléphones sans fil aux normes américaines ou défectueux, WiFi non conforme, préampli d'antenne TV défectueux, répéteur de téléphonie mobile non autorisé, systèmes d'alarme et de vidéosurveillance en défaut...);
- parasites électromagnétiques créés par des équipements électroniques ou des installations électriques (clôtures électriques, panneaux publicitaires, écran de visualisation, systèmes informatiques, systèmes d'éclairage, mise à la terre absente ou défectueuse...);
- effets non linéaires d'émission de fréquences non désirées par des infrastructures radioélectriques en mauvais état (points de rouille sur des pylônes, présence d'antennes inutilisées...).

Après identification et localisation de l'origine du brouillage, l'ANFR notifie une préconisation technique et suit l'exécution des travaux ainsi demandés. Elle procède le plus souvent à l'amiable avec les personnes responsables des brouillages, mais aussi, lorsque nécessaire, par application de moyens juridiques, notamment par transmission d'un procès-verbal au procureur de la République. Le fait de perturber par non-conformité à la réglementation est passible de sanctions pénales allant jusqu'à six mois de prison et 30 000 € d'amende.

## **Protection de la réception de la télévision hertzienne**

Selon la loi de 1986 sur la liberté de communication, l'ANFR et le CSA sont conjointement responsables de la protection de la télévision hertzienne. Dans la pratique, l'ANFR recueille les réclamations des plaignants, les instruit et identifie l'origine des perturbations. Il s'agit de fait d'un cas particulier du brouillage, mais au public très étendu puisqu'il s'agit de tous les téléspectateurs français. Concrètement :

- le téléspectateur perturbé passe par une plateforme de contact (site Internet ou centre d'appels) qui l'informe par recoupements (géographique, fréquentiel et temporel) de dysfonctionnements pré-identifiés. S'il s'agit d'une perturbation provoquée par l'installation d'une station de téléphonie mobile, l'ANFR demande à l'opérateur concerné de diligenter la pose d'un filtre chez le téléspectateur, ce qui met fin à la perturbation dans la très grande majorité des cas ;
- sinon, l'ANFR demande au téléspectateur de lui adresser une demande d'intervention contresignée par un antenniste attestant l'absence de défaut de l'installation de réception elle-même. L'ANFR complète alors l'investigation par contacts avec le téléspectateur, l'antenniste, le multiplex et son diffuseur... Cette recherche aboutit dans la majorité des cas ;
- dans le cas contraire, l'ANFR se rend sur place avec ses moyens techniques et résout le brouillage comme décrit précédemment.

## **Mesures *in situ* du champ électromagnétique**

Tout un chacun devient contrôleur ! En effet, toute personne qui le souhaite peut demander gratuitement une mesure de l'exposition aux ondes électromagnétiques associée à des objets communicants fixes (hormis les lignes électriques notamment à haute tension), par exemple les compteurs communicants, soit dans les locaux d'habitation, soit dans des lieux accessibles au public. Il lui suffit de remplir un formulaire qui doit être impérativement signé par un organisme habilité (collectivités territoriales, associations agréées de protection de l'environnement, fédérations d'associations familiales...), puis de l'adresser à l'Agence nationale des Fréquences, qui instruit la demande et dépêche un laboratoire accrédité indépendant pour effectuer la mesure. Les résultats de mesure sont ensuite rendus publics sur le site internet [www.cartoradio.fr](http://www.cartoradio.fr) où figurent déjà près

de 50 000 résultats. Notons que l'ANFR peut demander une mesure par elle-même (sur des situations détectées à l'occasion d'un contrôle de conformité par exemple) et que toutes les mesures effectuées ont révélé un niveau de champ électromagnétique conforme à la réglementation.

Par ailleurs, le législateur a confié à l'ANFR le recensement annuel des points dits « atypiques ». Ces points sont définis comme les lieux dans lesquels le niveau d'exposition aux champs électromagnétiques dépasse substantiellement celui généralement observé à l'échelle nationale, soit en l'occurrence un niveau global d'exposition supérieur ou égal à 6 V/m, correspondant au niveau de champ pour lequel le protocole de mesure établi par l'ANFR exige un détail des sources d'exposition. Une trentaine de points atypiques sont ainsi identifiés. L'ANFR demande alors aux exploitants de prendre, sous réserve de faisabilité technique, des mesures permettant de réduire le niveau des champs reçus, tout en garantissant la couverture et la qualité des services rendus.



Véhicule technique 4x4 équipé d'un radiogoniomètre à des fins de recherche technique et de localisation d'émetteurs, dans un contexte notamment de résolution de brouillage.  
© ANFR

## **Grands événements**

Il s'agit d'événements médiatiques, notamment politiques ou sportifs. Leur particularité est que beaucoup d'utilisateurs souhaitent un accès au spectre radioélectrique pratiquement au même lieu, au même moment et sur une période bien définie. L'ANFR met alors en place un « service premium » permettant la coordination des fréquences et leur contrôle tant préventif (contrôle de conformité) que curatif (traitement immédiat des brouillages signalés). L'intervention de l'ANFR s'effectue soit dans le cadre d'une demande de l'État, soit dans celui d'une convention avec l'organisateur de l'événement. Elle intervient ainsi régulièrement dans de nombreux événements tels que l'Enduropale du Touquet, le Tournoi international de tennis de Roland-Garros, les 24 heures du Mans, le Grand Prix de Formule 1, le Tour de France cycliste, le défilé du 14 juillet, le Salon international de l'Aéronautique et de l'Espace, les sommets politiques...

## **Outils et moyens du contrôle**

Pour réaliser les contrôles, l'ANFR dispose de sept services de contrôle en huit localisations réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain et de quatre antennes ultramarines (Polynésie française, Nouvelle-Calédonie, Antilles-Guyane et Réunion-Mayotte). Ces services mettent en œuvre d'importants moyens matériels, fixes, transportables et mobiles (véhicules laboratoires), couvrant toutes les bandes de fréquences (HF à EHF) et en constante évolution pour s'adapter aux évolutions rapides des technologies radio et des missions de contrôle : analyseurs de spectre et scanners notamment adaptés pour l'interception et la mesure des émissions et du champ électromagnétique 5G, radiolocalisation par goniomètres ou récepteurs hyperboliques, utilisation de drones...

# Spectrum economics: serving public policies

Par Gérard POGOREL

Télécom Paris (Institut Polytechnique de Paris)

## The rise of economic considerations in spectrum management

Until the 1990' technology and engineering considerations have prevailed in the management of the radio spectrum. In the last decades of the 20<sup>th</sup> century, however, the widespread view was that the promise of breakthroughs in telecommunications technologies were being hindered by the powers of legal monopolies, and that competition had to be introduced into the industry. In mobile communications, spectrum limited availability dictated that competition had to be managed ex-ante and the number of licensed operators had to be predetermined by governments and National Regulatory Authorities (NRAs). To overcome the apparent limitations of administrative procedures in selecting the competing licensees, auctions were adopted following the USA's successful example in 1994. They were considered more transparent, quicker, and removed the need for governments to pick winners.

The way had been paved by the Ronald Coase's seminal 1959 paper<sup>(1)</sup> advocating that spectrum assignment should be based on market and pricing mechanisms, where property rights are assigned with the objective of maximising output from a scarce resource. Its logic helped open the telecommunications industry to competition and brought about a change in business culture and practices. The belief that "market mechanisms" in spectrum management were an optimal means of solving assignment problems and promoting the industry and the economy was widely shared on the eve of the 3<sup>rd</sup> millenium, as illustrated by the 2002 FCC spectrum policy task force report<sup>(2)</sup>, the 2002 UK Martin Cave independent Review of radio spectrum management<sup>(3)</sup>, and the European Commission 2005 Communication "A Market-based approach to spectrum management in the European Union"<sup>(4)</sup>.

The privileged area of economic approaches in spectrum usage has been and still is mobile telephony. It does not mean that economic considerations are absent in other commercial areas of frequency allocations, like broadcasting, satellite or PMSE, but they remain implicit or in the background. As for "free" unlicensed spectrum, it definitely plays a role in wireless connectivity, but smaller than it was considered early in the 21<sup>st</sup> century.

Spectrum auctions, a quintessential economic process, have allowed a competitive entry into the newly de-monopolised mobile communications market. At some point, in mobile, auctions had become synonymous with assignment. Auctions are "exciting"<sup>(5)</sup>, they bring emotion into the otherwise dreary world of wireless technologies. Auction based frequency assignment has delivered the communications revolution we all benefit from today. However, after the truly competitive phase among pioneers, there has come a moment in which auctions have mostly taken place among

(1) COASE R.H. (1959) "The federal communications commission", *Journal of Law and Economics*, vol. 2., pp. 1-40, Oct.

(2) Federal Communications Commission Spectrum Policy Task Force (2002), ET Docket No. 02- 135 November [https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/bpasite/documents/webpage/bpa\\_048826.pdf](https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/bpasite/documents/webpage/bpa_048826.pdf)

(3) CAVE M. (2002), *Review of radio spectrum management, An independent review for the department of trade and industry and HM Treasury*, March [https://web1.see.asso.fr/ICTSR1Newsletter/No004/RS%20Management%20-%202\\_title-42.pdf](https://web1.see.asso.fr/ICTSR1Newsletter/No004/RS%20Management%20-%202_title-42.pdf)

(4) COM (2005), 400, Communication from the Commission European Parliament and the Council, A Market-based approach to spectrum management in the European Union.

(5) <https://telecoms.com/501033/french-watchdog-outlines-mid-band-spectrum-auction-rules/>

a restricted group of usual suspects, which now have no choice but to bid to win, not to waste two decades of investments in their customer base. There is a growing body of evidence that spectrum auctions in their current configuration not only fail to stimulate connectivity investments, but also hinder them. Auctions now mostly maintain entry barriers protecting a strong oligopoly.

## **Studies show spectrum auctions have not delivered the best possible benefits from mobile**

Over the last two decades, spectrum policy has been widely governed by high-level, generic, economic principles. The first one is that auctions are an effective process to select those operators that can use the frequencies most valuably. Evidence suggests that potential shortcomings with this assumption abound in relation to the deployment of communications networks<sup>(6)</sup>.

The second one is that by licensing a public resource, governments have a legal obligation to maximise the price, or, more correctly, to use market mechanisms to determine the amount paid by buyers that balances supply and demand of radio frequencies. This is a bold assumption that for the state to handle public funds optimally, it must behave as a private agent in the management of its assets. The evidence, however, shows that discrepancies arise between misguided public policies in spectrum assignment and the realisation of public objectives in industry and market growth.

The (2017) paper by Kuroda, Toshifumi, Baquero Forero, Maria Del Pilar<sup>(7)</sup>, compares the evolution of market outcomes in 47 countries after the assignment of mobile spectrum by auctions and beauty contests held from 2000 to 2008: “Findings suggest that auctions used to raise public revenues not only transfer profits to the government but also sacrifice consumer surplus.”

A study by PolicyTracker, LS Telcom & VVA (2017) for the European Commission<sup>(8)</sup> finds that “... the grouping with the highest auction prices also had the poorest network availability. This questions the common view that operators who pay high prices for spectrum must invest in their networks to make this money back.” Countries where operators have paid the most for spectrum over the past decade, showed the worst 4G network availability.

Hazlett and Munoz (2012) demonstrated that efficiencies associated with retail services in mobile markets are about 240 times as large as those associated with licence revenues<sup>(9)</sup>.

Finally, a research report, “Impact of Spectrum Prices on Consumers” by GSMA and NERA (2019)<sup>(10)</sup>, “provides strong evidence to directly link spectrum prices with slow network rollouts, reduced network quality and poorer mobile coverage”.

These empirical studies confirm the analytical assumptions by Pogorel & Bohlin (2017) that spectrum auctions aimed at high spectrum fees do not serve to stimulate investments and network deployment<sup>(11)</sup>. Consequently, most governments and regulators re-orient at least partially

(6) The frequent use of the term “market failure” in the telecommunications networks context is questionable. Achieving 100% penetration cannot be the universally expected outcome in all markets. “Limited market penetration” would be more appropriate.

(7) KURODA T. and BAQUERO FORERO M. D. P. (2017), “The effects of spectrum allocation mechanisms on market outcomes: Auctions vs beauty contests”, *Telecommunications Policy*, June, Vol. 41(5-6), pp. 341-354.

(8) European Commission, Study on spectrum assignment in the European Union, 4 October 2017, <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2388b227-a978-11e7-837e-01aa75ed71a1/language-en>

(9) HAZLETT T W and MUÑOZ R E. (2012), *What Really Matters in Spectrum Allocation Design*, p. 102.

(10) GSMA (2019), *The Impact of Spectrum Prices on Consumers*, 11 September, 2019, <https://www.gsma.com/spectrum/resources/effective-spectrum-pricing/>

(11) POGOREL G. and BOHLIN E. (2017), “Spectrum 5.0: Improving assignment procedures to meet economic and social policy goals, A position paper”, Working paper; [https://www.researchgate.net/publication/316524026\\_Spectrum\\_50\\_Improving\\_assignment\\_procedures\\_to\\_meet\\_economic\\_and\\_social\\_policy\\_goals\\_A\\_position\\_paper](https://www.researchgate.net/publication/316524026_Spectrum_50_Improving_assignment_procedures_to_meet_economic_and_social_policy_goals_A_position_paper)

spectrum assignment conditions. Budget deficits however remain a looming consideration that contributes directly to the attractiveness of auctions. While revenue raising is an understandable and valid political choice, it comes with its own costs in terms of deprioritising other broader economic and social perspectives. In spectrum auctions, the means have superseded the aims, and a “successful” auction in the literature has been taken as one achieving high fees rather than positive social returns. It is true social and economic impacts, whatever the efforts recently devoted to analysing them, can be conceptually and practically hard to precisely measure and quantify. Overall there is a growing awareness that there are choices to be made and that spectrum assignment procedures can be effectively designed to deliver on these choices.

The blind faith in a solid relationship between spectrum auctions on one hand and mobile deployment on the other has given way to a wide array of hybrid criteria procedures that have in common the trade-off between frequency fee requirements and the speed of territory and population coverage.

### **Re-thinking spectrum assignment to better align public policy objectives and industry strategies**

Governments having faced “...widespread public dissatisfaction around coverage, particularly outside urban areas”. (Ofcom, 2016<sup>(12)</sup>), are now concerned by uncertainties surrounding mobile business models.

The 2018 example of 4G licences renewal in France<sup>(13)</sup>, extended terms of payment introduced in countries like Spain, Sweden<sup>(14)</sup>, and India, and the possible abolition of fee maximisation in Colombia<sup>(15)</sup>, are indications that something is beginning to give in the field of auctions. Japan eventually endorsing a “comprehensive strategic approach for 5G spectrum” putting aside auctions, shows that policymakers are perhaps willing to look at new, more dynamic approaches to spectrum assignment with a stronger focus on high-level economic objectives.

In setting objectives, it is important to keep in mind that spectrum having no intrinsic value, its value resides exclusively in the contribution its use makes possible for society and the economy. Appropriately designed policies reconcile public objectives and industry strategies. Competition being rightly at the heart of telecommunications industry dynamics, competitive propositions from candidate operators on investment and deployment objectives are central to effective assignment processes. With deployment objectives imbedded in the license, operators know precisely how to define and implement their business model and strategy. The frequency fee paid to the government tends to lose its central status and is considered a normal counterpart of the use of spectrum resources for network deployment.

Contemporary examples of state of the art assignment procedures include the following.

### **Auctions on frequency fees with improved coverage obligations**

Auctions with coverage obligations have been frequent in spectrum assignments in Europe: 25/25 assignments in the 800 MHz band and 12/23 in the 2.6 GHz band (Magi)<sup>(16)</sup>. Coverage

(12) OFCOM (2016), “Letter to telecommunications operator”, quoted in “Mobile World Live”, December 16.

(13) ARCEP, <https://www.arcep.fr/actualites/les-communiqués-de-presse/detail/n/new-deal-mobile-1.html>, 2 August 2018.

(14) PTS (2014), “Swedish Spectrum Strategy”, *The Swedish Post and Telecom Authority* PTS-ER-2014:16 2014-04-15

(15) PolicyTracker, <https://www.policytracker.com/colombia-may-abolish-maximised-spectrum-prices>.

(16) MAGI A. (2017), “Assessment of the socio-economic impact of mobile broadband auctions”, Thesis for the Master’s degree, Politecnico di Torino, March.



obligations are increasingly extensive and accurately defined, as demonstrated by Ofcom in UK<sup>(17)</sup>, BNetzA in Germany<sup>(18)</sup>, and as in the cases of Italy<sup>(19)</sup> and France<sup>(20)</sup>.

NRAs, based on their appraisal of the public interest, have opened auctions with dual objectives: combining 90-95% coverage conditions and a spectrum fee auction<sup>(21)</sup>. The 2018 Danish award came up with an innovative twist in the coverage/investment combination: “Winning bidders will have the option of bidding for extra coverage obligations in exchange for a reduction in their licence price”<sup>(22)</sup>. This scheme opens the possibility for the regulator and the operator to avoid the dilemma between pre-defined, and operator-defined objectives.

## Negotiated frequencies-for-investments

In the ARCEP (2018) “New Deal” example<sup>(23)</sup>, which covers the renewal of French 4G licences, mobile operators are bound to an intensive and accelerated country coverage program. A similar scheme is implemented in Japan in 2019<sup>(24)</sup>. The challenge of this approach is the competition angle: Is it a deal limited to existing licence holders, or are new entrants admitted to the negotiating table? How are they selected? To combine the competition imperatives with the “New Deal”, a 2-stage process could be implemented: Select one or more new entrants through tender, then negotiate their investments.

In the investment centred assignment procedures, frequency fees do not play the central role. The procedure must nevertheless determine what charges should be paid for the use of spectrum as a limited public resource. Japan for instance has a long experience of techno-economic frequency fee determination<sup>(25)</sup>.

Extended licence duration has been advocated by powerful voices from both operators and the European Commission. The argument is that an extended investment horizon can drive more investment<sup>(26)</sup>. Most national governments and many NRAs have resisted this move. There is a need for sufficient duration to correspond to investment cycles and to allow investors to recover their expenses and fully exploit their investments. But, as stated by one NRA<sup>(27)</sup> “... the duration cannot be too long, in order to allow the State, within a reasonable time, to be able to regain possession of the resource where necessary for the purpose of maintaining the efficient use of the scarce resource over time<sup>(28)</sup>”.

(17) OFCOM (2018), *Advice to Government: Further options for improving mobile coverage*, <https://www.ofcom.org.uk/phones-telecoms-and-internet/coverage/advice-government-improving-mobile-coverage>, 14 September 2018.

(18) Bundesnetzagentur (2019), “Mobile broadband – Spectrum for 5G” [https://www.bundesnetzagentur.de/EN/Areas/Telecommunications/Companies/FrequencyManagement/Electronic-CommunicationsServices/ElectronicCommunicationServices\\_node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/EN/Areas/Telecommunications/Companies/FrequencyManagement/Electronic-CommunicationsServices/ElectronicCommunicationServices_node.html)

(19) AGCom (2018), *Delibera n. 231/18/CONS*, p. 76 316.

(20) ARCEP (2019), <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-5g.html>

(21) OFCOM (2018), *ibid*.

(22) Telecompaper (2018), *Danish govt issues final rules for 700 MHz, 900 MHz, and 2 300 MHz auctions*, Monday 25 June.

(23) ARCEP (2018), <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/new-deal-mobile.html>

(24) IDATE-EU 5G Observatory (2019), “Japan assigns 5G spectrum to four operators”, April 16

<https://5gobservatory.eu/japan-assigns-5g-spectrum-to-four-operators/>

(25) Ministry of Industry and Communications, Japan (2019), “Spectrum User Fee”, <https://www.tele.soumu.go.jp/e/fees/index.htm>

(26) JEANJEAN F. and LIANG J. (2018), “Mobile investment per capita tends to increase with license duration”, February 20, Working Paper, [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3184200](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3184200)

(27) AGCom, <https://www.agcom.it/documents/10179/3478659/Allegato+7-8-2018/637af9a9-8a60-4b3e-8ac0-3ce2c-d808ac4?version=1.0>

(28) The debate on licence duration was particularly contested during negotiations on the European Electronic Communications Code (EECC), with the co-legislators finally settling on 20 years (15+5) minimum duration.

The bottom line is, frequency fees, CAPEX and OPEX, license duration, enter into a familiar investment calculus mastered by operators. Two main factors can disrupt the process: a too high reserve price set in the auction, and the auction process itself, which can prove to be wildly unpredictable as happened in 2018 in Italy<sup>(29)</sup>.

## **A range of economic tools for public policies**

Regulation principles across the Atlantic regarding network access, competition monitoring, have diverged now for 20 years. The American experience, for instance incentive auctions of broadcasting spectrum, could certainly provide food for thought. As for China, it has focused on administrative licensing. The general context, the authoritarian political governance and scale makes it impossible to compare wireless developments with the EU, but the country's rapid progress on 5G demands attention. As for Japan, it has stuck for 5G to administrative assignment of spectrum and techno-administrative determination of spectrum fees.

We observe a trend of spectrum assignment procedures to better balance the legitimate imperative of raising revenues for the government with the achievement of broader economic and social objectives. The fixation on auctions on fees as the panacea for competition has been put aside and the focus instead is on assignment processes that underpin the competitive dynamics required to maximise and then realise the full potential of spectrum use to drive economic and social progress. Once policy objectives have been prioritised, governments and regulators now have at their disposal a wide range of spectrum assignment designs to adjust their spectrum assignment procedures to public policy goals.

## **References**

- CAVE M. & WEBB W. (2015), *Spectrum Management*, Cambridge University Press.
- CHADUC M. & POGOREL G. (2008), *The Radio Spectrum: Managing a strategic resource*, ISTE-WILEY, London, UK.
- HAZLETT T.H. (2017), *The Political Spectrum*, Yale University Press.
- LESCOP D. & BUNEL A. (2016), Régulation et gestion du spectre hertzien : organisation et perspectives, pp. 165-183 in BOURREAU M. (ed.), *Régulation des communications électroniques*, Paris, Lavoisier.
- POGOREL G. (2018), *Spectrum 5.0 Re-thinking Spectrum Awards for Optimal 5G Deployment*, Working Paper <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01892202>
- POGOREL G. (2007), "Nine regimes of radio spectrum management: a 4-step decision guide", *Communications & Strategies*, (65): 169-184, April 2007.
- POGOREL G., BOHLIN E. & MASSARO M. (2015), *Socio-Economic Impact of Spectrum Regulation, Competition and Consumer Protection*, ITU Spectrum Management Training Programme, January 2015  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7926934>
- SALANT D. J. (2015), *A Primer on auction design management and strategy*, The MIT Press, Cambridge Ms.

---

(29) CORCOM (2018), <https://www.corrierecomunicazioni.it/telco/aste-frequenze-litalia-fara-scuola-in-europa-ecco-le-posizioni-in-campo/>



STANDEFORD D. (2019), “Spectrum Auctions, the current policy debates”, *A PolicyTracker White Paper*, August.

SIMS M., YUELL T. & WOMERSLEY R. (2016), *Understanding spectrum liberalisation*, CRC Press, London.

UIT (2018), *Aspects économiques de la gestion du spectre*, Genève <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2012-6-2018/fr>

VU K., FORGE S. & BOHLIN E. (2019), “5G Promise and Deployment Strategy: A Note for Policy Makers in Developing Countries”, submitted to Telecommunications Policy.

# La valeur patrimoniale du spectre radioélectrique

Par **Olivier COROLLEUR**

Direction générale des entreprises (DGE)

Quelle est la valeur du spectre radioélectrique ? Cette question intéresse particulièrement l'Etat, le spectre radioélectrique constituant un actif immatériel de son domaine public. Une juste évaluation de la valeur du spectre pourrait ainsi permettre d'éclairer utilement les décisions que l'Etat doit prendre pour assurer sa bonne gestion : fixer les conditions techniques d'utilisation, optimiser les décisions d'allocation, assurer ses missions de police, etc.

L'introduction de mécanismes d'enchères pour l'attribution des droits d'utilisation du spectre a permis ces dernières années de révéler le prix de marché de certains de ces droits. A titre d'exemple, l'attribution aux enchères, en 2015, de la bande 700 MHz (703 – 733 Mhz et 758 – 788 MHz) pour la France métropolitaine a rapporté à l'Etat la somme de 2 798 976 324 euros.

Ce montant ne reflète toutefois que de façon très partielle la valeur de ce spectre pour l'Etat.

L'objectif de cette contribution est d'illustrer, par quelques exemples, les multiples dimensions de la valeur du spectre radioélectrique et les différents travaux sur lesquels repose sa valorisation.

## **La valeur, pour l'Etat, du spectre radioélectrique doit s'apprécier au regard de la diversité de ses usages, présents et à venir**

Les fréquences radioélectriques sont indispensables dans de nombreux domaines :

- les prévisions météorologiques, qui reposent sur les observations des radars, des satellites d'observation de la Terre ;
- la recherche scientifique, *via* notamment la radioastronomie ou en permettant les communications avec les sondes, les balises, les engins spatiaux... ;
- les transports (maritime, aérien, ferroviaire, routier, etc.), notamment pour les communications de sécurité et les services de positionnement par satellite (GPS, Galileo... ) ;
- les télécommunications, notamment pour les services de téléphonie mobile (pour le grand public ou les professionnels).

L'importance du rôle joué par les fréquences radioélectriques peut varier considérablement dans le temps en fonction des domaines considérés ; ainsi, la diffusion par voie hertzienne terrestre fut pendant plusieurs dizaines d'années le moyen principal de diffusion des services de télévision avant d'être concurrencée par d'autres supports (le satellite, le câble puis les réseaux de télécommunications...). Autre exemple, le secteur de l'automobile, qui s'appuie de plus en plus sur l'utilisation de fréquences radioélectriques (pour les communications d'urgence – le système e-call, les radars de recul, le développement de véhicules connectés pouvant échanger des informations avec d'autres véhicules ou avec l'infrastructure routière...).

## **La planification des fréquences**

La planification vise à assurer la cohabitation entre les différents services et technologies qui utilisent le spectre. Elle résulte de travaux menés :

- à l'échelle internationale (qui permettent d'établir notamment le règlement de radiocommunications, traité négocié au sein de l'Union internationale des télécommunications);
- à l'échelle européenne (les mesures techniques d'application prises conformément à la décision « spectre radioélectrique <sup>(1)</sup> », qui visent à harmoniser les conditions d'utilisation du spectre, ou les calendriers d'assignation coordonnés prévus par le Code européen des communications électroniques);
- à l'échelle nationale (le tableau national de répartition des bandes de fréquences, arrêté par le Premier ministre).

Cette planification, dans laquelle l'Etat engage des dépenses considérables à travers la réalisation d'études et la participation d'experts aux négociations nationales et internationales permanentes qui structurent cette activité, vise à satisfaire au mieux les besoins exprimés pour les différents types d'utilisation, tout en préservant une capacité à répondre aux besoins futurs, en évitant de faire peser des contraintes qui limiteraient l'innovation technologique ou l'évolution des usages. Elle doit permettre d'éviter les brouillages préjudiciables, de faciliter la fabrication des équipements radioélectriques ainsi que leur interopérabilité. Elle contribue donc à augmenter la valeur du spectre : ainsi, une portion de spectre harmonisée mondialement pour un certain usage présente un intérêt extraordinaire pour cet usage, car cette harmonisation est la garantie de la disponibilité de terminaux et d'équipements de réseaux interopérables et à des coûts bénéficiant des économies d'échelle du marché mondial. A l'inverse, elle ne présentera qu'un intérêt très marginal pour un autre usage du fait de l'absence de ces avantages.

### **La planification peut nécessiter des arbitrages délicats entre différentes utilisations : l'exemple du premier dividende numérique (2008)**

Parmi les décisions de planification du spectre ayant suscité ces dernières années d'importants débats, l'affectation du premier « dividende numérique » permet d'illustrer la nature des questions posées à l'Etat dans le cadre d'une démarche visant à optimiser la valeur du spectre.

Le terme de « dividende numérique » désigne les fréquences radioélectriques qui ont été libérées dans la bande UHF par la numérisation de la diffusion hertzienne terrestre de la télévision.

Dans le cadre des travaux préparatoires à l'affectation du dividende numérique, plusieurs scénarios d'affectation ont été identifiés :

- l'affectation des fréquences libérées à de nouveaux services audiovisuels (nouvelles chaînes de télévision numérique terrestre, télévision mobile personnelle...);
- l'affectation d'une partie des fréquences libérées à la téléphonie mobile.

Des études ont été menées visant à évaluer le bien-être social associé à chacun de ces scénarios. On peut citer en particulier les études réalisées par les cabinets Analysis Consulting et Hogan & Hartson, pour le compte de l'ARCEP (mai 2008) sur la valorisation du dividende numérique <sup>(2)</sup> et pour la Commission européenne (septembre 2009) sur l'exploitation du dividende numérique à l'échelle européenne.

(1) Décision n°676/2002/CE du Parlement européen et du Conseil du 7 mars 2002 relative à un cadre réglementaire pour la politique en matière de spectre radioélectrique dans la Communauté européenne (décision « spectre radioélectrique »).

(2) Disponible sur le site de l'ARCEP : [https://archives.arcep.fr/uploads/tx\\_gspublication/etude-dividende-numerique-mai2008.pdf](https://archives.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-dividende-numerique-mai2008.pdf)

S'agissant d'activités marchandes, le bien-être social associé à chacun des scénarios d'affectation du dividende numérique a pu être estimé par une analyse micro-économique, en faisant la somme :

- du surplus du producteur : le profit supplémentaire réalisé par les entreprises grâce à l'utilisation du spectre radioélectrique ;
- du surplus du consommateur : la valeur retirée par les consommateurs des services fournis (estimée comme étant la différence entre leur propension à payer ce service et le prix effectivement payé) ;
- des éventuelles externalités.

A la lecture de ces études, il apparaît que, même dans un cas de figure relativement simple (un arbitrage entre deux types de services marchands fournis sur la même zone géographique), l'estimation du bien-être social associé aux différents scénarios peut s'avérer très délicate. Il est en particulier difficile d'estimer le surplus du consommateur ainsi que les éventuelles externalités, dont le rôle peut être pourtant structurant compte tenu de l'effet des technologies numériques sur l'ensemble de l'économie.

Pour prendre un exemple plus récent, qui a fait l'objet de débats lors de la conférence mondiale des radiocommunications en octobre 2019, l'arbitrage rendu sur les conditions techniques de déploiement de la 5G dans la bande 28 GHz aux Etats-Unis a nécessité de mettre en balance les conditions de déploiement de cette technologie avec le risque de détérioration des prévisions météorologiques, ce qui a suscité des inquiétudes au niveau mondial<sup>(3)</sup>.

Pour ces arbitrages délicats, l'Union internationale des Télécommunications fournit le cadre de discussion multilatéral nécessaire pour que le spectre radioélectrique ne subisse pas la tragédie des biens communs.

## **L'attribution des droits d'utilisation**

En fonction des technologies ou services envisagés, l'Etat peut exploiter directement ces fréquences (par exemple : signal horaire à 162 kHz, radars aériens, applications militaires...) ou autoriser des acteurs privés à les utiliser. On distingue alors deux cas de figure :

- soit les fréquences sont utilisables librement (exemple : le Wi-fi, les radars de recul des voitures, les microphones sans fil, etc.) ;
- soit l'utilisation de ces fréquences est soumise à une autorisation, lorsqu'une telle autorisation apparaît nécessaire pour assurer une utilisation efficace du spectre.

Dans ce dernier cas de figure, l'autorisation est associée au paiement à l'Etat d'une redevance domaniale d'occupation du domaine public qui prend en compte les avantages procurés au titulaire de l'autorisation.

Pour certaines utilisations du spectre (c'est le cas tout particulièrement de la téléphonie mobile ou de la télévision hertzienne terrestre), il apparaît nécessaire de limiter le nombre d'autorisations d'utilisation de fréquences, le spectre disponible ne permettant pas de répondre aux besoins de l'ensemble des acteurs intéressés.

Compte tenu de la rareté de la ressource, les droits d'utilisation acquièrent une valeur de marché importante ; l'Etat cherche alors à capter au mieux la valeur créée au bénéfice de l'intérêt général. Il peut imposer des contreparties de différentes natures et répondant à des objectifs de politique publique variés : aménagement du territoire, recettes budgétaires, innovation...

---

(3) Voir notamment la réaction de l'Organisation météorologique mondiale : <https://public.wmo.int/en/media/news/wmo-expresses-concern-about-radio-frequency-decision>

A titre d'illustration, voici les objectifs mis en avant par le gouvernement dans la perspective de l'attribution de la bande 3,5 GHz pour la 5G (extrait du courrier du 2 mai 2019 de Jacqueline Gourault et Agnès Pannier-Runacher au président de l'Autorité de Régulation des Communications électroniques et des Postes<sup>(4)</sup> :

« [...] il revient à votre autorité de proposer au Gouvernement les conditions d'attribution des autorisations d'utilisation des fréquences concernées. Afin que cette proposition s'inscrive au mieux dans la politique de l'Etat en matière d'utilisation du spectre radioélectrique et d'investissement dans le développement sur l'ensemble du territoire des services de communications électroniques mobiles à très haut débit, le Gouvernement entend préciser les objectifs qu'il vous reviendra de poursuivre dans l'élaboration du cahier des charges : le niveau des recettes attendues par l'Etat, l'équilibre concurrentiel, l'innovation et l'émergence de nouveaux services en faveur des "verticales" de l'économie et enfin l'aménagement numérique du territoire. »

On voit, sur cet exemple, que la valeur du spectre radioélectrique pour l'Etat s'apprécie en fonction de la réalisation de l'ensemble des objectifs mentionnés ci-dessus et non du seul montant des redevances qui seront versées en contrepartie de l'attribution des droits d'utilisation.

Le débat sur le poids à accorder aux différents objectifs d'intérêt général poursuivis dans le cadre la procédure d'attribution se confond souvent avec la question du choix de la méthode de sélection des titulaires d'autorisation : tirages au sort, concours de beauté, enchères...

De nombreux auteurs se sont penchés sur ces questions depuis l'article de R. Coase (1959) sur l'attribution des licences de radiodiffusion. Voir par exemple la *Review of the Literature on Market-based Methods of Spectrum Management* (Cave, Minervini et Mfuh, 2008). Ces travaux ont conduit, pour les usages commerciaux du spectre, à une utilisation croissante des mécanismes d'enchères à partir de 1992.

On peut remarquer que l'utilisation des mécanismes d'enchères n'a pas conduit les Etats à abandonner pour autant la poursuite d'autres objectifs d'intérêt général que la seule valorisation financière des droits d'utilisation. Ainsi, dans le domaine de la téléphonie mobile, en parallèle d'un recours accru aux enchères, les obligations de couverture du territoire ont été régulièrement renforcées, au fil des procédures d'attribution du spectre, témoignant de la prise en compte par de nombreux Etats d'un objectif, prioritaire, d'aménagement numérique du territoire.

Mais quelle que soit la méthode d'attribution utilisée, l'Etat est souvent amené, pour la fixation d'un prix de réserve ou de redevances annuelles d'utilisation, à estimer la valeur des autorisations d'utilisation de fréquences qu'il délivre. Il peut s'appuyer pour ce faire sur deux types de méthodes :

### **Le parangonnage**

Cette méthode consiste à s'appuyer sur les prix de marché observés lors d'attributions antérieures pour tenter de prédire au mieux la valeur des fréquences considérées. Compte tenu du nombre limité de prix observés, la pertinence du résultat dépend de la capacité à identifier les attributions comparables et les principaux facteurs dont dépend la valeur du spectre (gamme de fréquences considérée, largeur de bande, population couverte, contexte concurrentiel, etc.).

### **L'estimation de la valeur actualisée nette**

Cette méthode consiste à estimer le surprofit que pourrait retirer le titulaire de l'autorisation de l'exploitation de la bande de fréquences considérée pour la durée de son autorisation. On modélise pour cela le compte d'exploitation d'un opérateur générique (l'ensemble de ses postes de revenus et de coûts) qu'on actualise ensuite à un taux représentant la rentabilité normale de ce type d'investissement.

(4) [https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions\\_services/numerique/CP-lettre-de-cadrage-orientations-5G.pdf](https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/numerique/CP-lettre-de-cadrage-orientations-5G.pdf)

Quelle que soit la méthode considérée, de fortes incertitudes pèsent en général sur les résultats obtenus compte tenu de la sensibilité des résultats aux différents paramètres et de la difficulté à fixer la valeur de ces derniers. On peut donc, comme Alain Bernard en exergue de son article « Le Prix du hertz » (*Journal des Télécommunications*, septembre 1979), se rappeler utilement, à l'occasion de ces calculs, cette citation de Paul Valéry : « Ce qui est simple est toujours faux. Ce qui ne l'est pas est inutilisable<sup>(5)</sup>. »

## **Une attribution de fréquences au bénéfice de l'aménagement numérique du territoire : l'exemple du New Deal mobile (2018)**

Les obligations de couverture fixées dans le cadre des autorisations d'utilisation de fréquences constituent en particulier un levier unique pour l'aménagement numérique du territoire.

L'enjeu de l'amélioration de la couverture des réseaux mobiles dans les zones rurales a émergé rapidement avec le succès des services de téléphonie mobile auprès du grand public. Ainsi, depuis 2003, dans le cadre notamment du programme « zones blanches – centres-bourgs », les pouvoirs publics ont pris en charge l'installation de pylônes en contrepartie de l'installation par les opérateurs mobiles de leurs équipements sur les pylônes ainsi créés. Ce programme a permis la couverture de plus de trois mille centres-bourgs.

Toutefois, en 2017, la couverture des réseaux mobiles en France apparaissait encore en décalage avec les fortes attentes exprimées par les utilisateurs. Selon le *Digital economy and society index* établi par la Commission européenne, la France figurait en 2017 au vingt-quatrième rang des pays européens sur vingt-huit s'agissant de la couverture 4G (avec 69 % des foyers couverts – moyenne des quatre opérateurs – contre 84 % en moyenne au niveau européen).

C'est dans ce contexte que le gouvernement a souhaité confier à l'ARCEP une négociation sur les conditions de renouvellement des autorisations d'utilisation de fréquences des bandes 900 MHz, 1 800 MHz et 2,1 GHz utilisées par les opérateurs de téléphonie mobile, qui arrivaient à échéance entre 2021 et 2024, et sur les moyens à mettre en œuvre pour permettre une amélioration rapide de la couverture mobile du territoire.

Ces travaux ont abouti en janvier 2018 à des engagements des opérateurs, représentant des investissements supplémentaires de 3 à 5 milliards d'euros en valeur actualisée, d'après les estimations du régulateur. La description de ces engagements est disponible sur le site de la DGE<sup>(6)</sup> et un tableau de bord sur l'état de leur mise en œuvre est tenu à jour par l'ARCEP<sup>(7)</sup>.

Ces engagements ont été retranscrits dans les licences actuelles en juillet 2018 afin de les rendre juridiquement opposables. Par ailleurs, l'ARCEP a adopté le 15 novembre 2018 les décisions relatives aux attributions, à compter de 2021, dans les bandes 900 MHz, 1 800 MHz et 2,1 GHz. L'Etat a concédé dans ce cadre une stabilité des redevances (renonçant en particulier à l'organisation d'enchères pour le renouvellement de ces droits) ainsi que des exemptions ciblées sur l'imposition forfaitaire sur les entreprises de réseaux (IFER), qui ont été mises en œuvre par la loi de finances pour 2019.

(5) *Mauvaises pensées et autres* (1942).

(6) Voir le document intitulé « Description des engagements des opérateurs sur la généralisation d'une couverture mobile de qualité pour l'ensemble des Français », disponible sur le site de la DGE : [https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions\\_services/numerique/description-du-dispositif-couverture-mobile-22janvier2018.pdf](https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/numerique/description-du-dispositif-couverture-mobile-22janvier2018.pdf)

(7) <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/new-deal-mobile.html>

## **L'enregistrement des fréquences et le contrôle du spectre**

Les droits d'usage du spectre qui sont acquis par les exploitants de réseaux n'ont de valeur que si les assignations de fréquences aux stations de radiocommunication que ces exploitants déploient sur le territoire national dans le cadre de ces autorisations, c'est à dire l'usage précis qu'ils en font, sont enregistrées et protégées contre les brouillages qui pourraient être occasionnés par des utilisations non autorisées. Il s'agit pour l'Etat de mettre en œuvre une véritable garantie juridique pour les utilisations autorisées. Sans cette garantie, le spectre n'a pas de valeur aux yeux des exploitants.

Il y a donc, au-delà de l'autorisation elle-même, un aspect notarial et un aspect de police du spectre qui sont fondamentaux pour la valorisation du spectre et nécessitent la mobilisation par l'Etat de ressources importantes (développement et maintenance de bases de données informatiques, gestion de procédures de coordination nationale et internationale des assignations pour éviter les brouillages, moyens fixes et mobiles de contrôle du spectre).

### **Conclusion**

Si l'introduction de mécanismes d'enchères pour l'attribution des droits d'utilisation du spectre a permis ces dernières années de révéler les prix de marché de certains de ces droits, ces mécanismes n'épargnent pas pour autant aux Etats des arbitrages délicats pour optimiser la valeur du spectre.

Tout comme d'autres actifs environnementaux, le spectre ne répond en effet pas à un mais à de multiples besoins simultanés. La concurrence d'usages marchands et non marchands, la portée, parfois mondiale, des décisions prises pour sa gestion, la nécessité de prendre en compte au-delà de sa valeur d'usage actuel, sa valeur de préservation (pour prendre en compte les usages futurs ou le souhait d'une partie de la population de limiter au maximum l'exposition aux ondes électromagnétiques) constituent autant de défis pour les instances qui participent à la régulation de ce bien commun.



# Radiofréquences et santé

Par **Olivier MERCKEL**  
ANSES

## Introduction

Le 16 juillet 2018, le Gouvernement français et l’Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse (Arcep) présentaient la feuille de route de la 5G pour la France. La 5G, la cinquième génération de réseaux mobiles, appelée à englober tous les futurs usages connectés, des villes dites « intelligentes » à la santé connectée, en passant par les transports et les usines « du futur », est alors présentée comme « un enjeu stratégique pour l’industrie française, la compétitivité de notre économie, l’innovation et pour des services publics renouvelés <sup>(1)</sup> ». Aux premières générations de téléphonie mobile ont succédé celles des réseaux mobiles, incluant d’autres appareils nomades comme les tablettes numériques, puis les objets connectés. Les promoteurs de la 5G la définissent comme une technologie de rupture, rassemblant toutes les futures connectivités entre objets et réseaux, dans tous les domaines de la vie quotidienne : au travail, dans les loisirs, pour la santé, l’industrie, les transports... Au-delà des problèmes d’interférences potentielles que pourront poser les émissions simultanées de multitudes d’appareils dans des espaces communs, l’avenir tracé par les opérateurs de la 5G promet de modifier l’exposition de l’environnement aux ondes électromagnétiques. Il est donc naturel de s’interroger sur les conséquences éventuelles pour notre environnement, et en particulier pour notre santé, de l’évolution prévisible de ces expositions.

## Radiofréquences et santé : une question ouverte ?

La population générale est exposée depuis longtemps aux ondes électromagnétiques artificielles par le biais d’émetteurs placés à distance (radio, télévision, faisceaux hertziens...), à des niveaux certes plus élevés que ceux des rayonnements provenant de sources naturelles (rayonnement propre de la Terre, du Soleil et des astres), mais d’intensité faible par rapport aux niveaux connus pour engendrer des effets physiologiques à court terme, aujourd’hui bien décrits.

Avec l’entrée de sources de champs électromagnétiques dans des sphères toujours plus réduites autour des personnes (four micro-ondes...), la question de leur impact sur la santé a nécessairement été posée.

Mais c’est bien le téléphone sans fil, puis le téléphone mobile, qui ont vu se rapprocher, jusqu’à se toucher, les émetteurs d’ondes électromagnétiques et le corps. Alors qu’il est possible aujourd’hui d’aller au-delà de la barrière cutanée, puisqu’il existe des sources d’ondes électromagnétiques sous la forme de systèmes implantables, et même de capsules ingérables, cette situation de proximité méritait que l’on y prête attention. Ainsi, dès la commercialisation des premiers terminaux, et avant même que la téléphonie mobile ne s’impose, équipant à présent 95 % de la population française de

---

(1) Communiqué de presse Secrétariat d’Etat auprès du Premier ministre chargé du Numérique, Secrétariat d’Etat auprès du Ministre de l’Economie et des Finances et ARCEP : [https://minefi.hosting.augure.com/Augure\\_Minefi/r/ContenuEnLigne/Download?id=209561F1-FF9A-4F13-AAA9-DF6363488F31&filename=594%20-%20La%20France%20se%20dote%20d%E2%80%99une%20feuille%20de%20route%20pour%20la%205G.pdf](https://minefi.hosting.augure.com/Augure_Minefi/r/ContenuEnLigne/Download?id=209561F1-FF9A-4F13-AAA9-DF6363488F31&filename=594%20-%20La%20France%20se%20dote%20d%E2%80%99une%20feuille%20de%20route%20pour%20la%205G.pdf)

plus de douze ans<sup>(2)</sup>, de nombreuses recherches ont été menées afin d'identifier des effets potentiels sur la santé liés à l'exposition aux ondes émises par les téléphones en fonctionnement.

Pourtant, l'évaluation des risques potentiels que des nouvelles technologies peuvent engendrer pour la santé et la sécurité se heurte bien souvent au calendrier du développement économique associé. Une des premières difficultés rencontrées est la disponibilité des équipements, notamment pour simuler les expositions aux signaux d'une technologie qui n'est parfois pas encore disponible. Dans le cas des différentes technologies de téléphonie mobile, par exemple, il est bien sûr inenvisageable de réaliser des études avant que les matériels nécessaires pour exposer des cellules, des animaux ou des personnes à des sources spécifiques ne soient disponibles pour les chercheurs. La rapidité d'évolution des technologies les rend bien sûr particulièrement difficiles à suivre pour les laboratoires, pour lesquels il est nécessaire d'investir régulièrement dans des matériels qui peuvent rapidement devenir obsolètes.

### Des effets spécifiques des signaux ?

Une des questions posées à la recherche des effets des radiofréquences sur la santé concerne la distinction éventuelle entre d'une part des effets qui seraient liés à l'énergie véhiculée par les rayonnements, indépendamment de la répartition temporelle avec laquelle cette énergie est transmise aux structures biologiques, et d'autre part des effets qui seraient liés précisément à la structure temporelle de l'émission des rayonnements, autrement dit à la modulation dans le temps des signaux. Avec l'évolution successive des technologies, des équipes de recherche se sont naturellement intéressées aux effets par exemple des signaux de type GSM<sup>(3)</sup>, mais aussi UMTS<sup>(4)</sup>, dont les caractéristiques de modulations temporelles sont différentes. Les résultats des études menées par certaines équipes sont souvent disparates : des effets sur le fonctionnement biologique cellulaire peuvent être par exemple retrouvés pour des expositions à des signaux GSM, mais pas en UMTS, et réciproquement (e.g. Tillmann, Ernst *et al.* 2010 ; Danker-Hopfe *et al.*, 2011 ; Zeni *et al.*, 2012 ; Smith-Roe *et al.*, 2019).

Par ailleurs, des études spécifiques ont porté sur l'hypothèse de démodulation des signaux qui pourrait être réalisée par des structures biologiques (e.g. Sheppard *et al.*, 2008 ; Davis *et al.*, 2010 ; Kowalczyk *et al.*, 2010). Ces études n'ont pas mis en évidence de capacité des entités biologiques, à petite ou grande échelle, à démoduler les signaux, et donc à potentiellement réagir à la forme temporelle du signal plutôt qu'à l'énergie véhiculée. A l'exception de l'étude de Carrubba *et al.* (2010), dont les auteurs avancent la possibilité d'émission d'un signal électrique par le cerveau (potentiel évoqué cérébral) lié à l'exposition à un signal basse fréquence 217 Hz (fréquence fondamentale de répétition temporelle des trames GSM).

Une autre hypothèse d'action des champs électromagnétiques pourrait être envisagée, en considérant le rythme des expositions répétées, cette fois à une échelle temporelle plus grande que celle de la modulation des signaux (de l'ordre de la milliseconde), de quelques minutes à quelques heures. C'est une hypothèse avancée notamment par des personnes qui se déclarent électro-hypersensibles. De nombreuses études réalisées sur des animaux ont d'ailleurs établi des plans d'expérience reposant sur des expositions répétées, de durées variables de quelques minutes à plusieurs heures, répétées plusieurs fois par jour. La sollicitation ainsi répétée de l'organisme pourrait être une source de stress supplémentaire. Cependant, là encore, l'hétérogénéité des résultats des études menées, associée à la diversité des protocoles d'exposition, rend difficile leur interprétation.

(2) [https://www.arcep.fr/uploads/tx\\_gspublication/rapport-barometre-num-2019.pdf](https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-barometre-num-2019.pdf)

(3) GSM : *Global System for Mobile Communications*, deuxième génération de téléphonie mobile.

(4) UMTS : *Universal Mobile Telecommunications Systems*, troisième génération de téléphonie mobile.

## Les effets sur la santé

La pénétration des rayonnements radiofréquences dans les structures biologiques s'accompagne d'un transfert d'énergie de l'onde à la matière, pour la part du rayonnement qui n'est pas réfléchi à la surface de la peau. Le mécanisme par lequel l'énergie électromagnétique est convertie en énergie thermique est bien décrit (Foster et Schwan, 1996). La nature des tissus ainsi que leur hétérogénéité détermine comment la chaleur ainsi produite se répartit dans les tissus environnants, par conduction et diffusion (Foster et Glaser, 2007). Cette conversion s'opère *a priori* quelle que soit l'intensité de l'énergie électromagnétique apportée par le rayonnement. Tant que la quantité d'énergie convertie est faible par rapport aux capacités d'adaptation de l'organisme (thermorégulation), aucun effet macroscopique local ou systémique n'est observé. Dans le cas d'une exposition localisée, si la chaleur produite ne peut être évacuée, la température des tissus concernés augmente, c'est l'effet recherché par exemple dans certaines applications thérapeutiques (Dewey *et al.*, 2009). Lorsque l'ensemble de l'organisme est exposé, l'augmentation de l'apport d'énergie peut potentiellement dépasser les capacités de thermorégulation, et donc induire des effets physiologiques liés à une température corporelle excessive. C'est pour prévenir ce type d'effets que les valeurs limites d'exposition actuellement en vigueur<sup>(5)</sup> ont été construites. En effet, avec l'augmentation de la température corporelle, on peut observer, au-delà d'un seuil, des modifications comportementales, caractérisées précisément chez l'animal (D'Andrea *et al.*, 2003).



Opération de mesure dans un « point atypique ».

©ANFR

observations de cette exposition mettent pour l'instant en évidence, hormis dans des zones localisées (les points atypiques – ANFR, 2019), une augmentation relativement limitée du niveau moyen (temporellement et spatialement) d'exposition. Le développement de la 4G et de la 5G pourraient cependant faire augmenter significativement, en relatif, les niveaux d'exposition moyens. Par ailleurs, à moins d'être situé à très grande distance de ces sources, c'est-à-dire dans des lieux mal voire non couverts par la diffusion audiovisuelle et les réseaux mobiles, l'ensemble de la population est exposé, à des degrés divers, à ces champs électromagnétiques. Le gradient d'exposition est par ailleurs relativement faible, ce qui ne facilite pas la mise en place d'études en population dans l'objectif, par exemple, d'évaluer l'incidence de pathologies chez les personnes les plus exposées par rapport aux moins exposées.

Hormis cet effet d'échauffement, l'exposition aux radiofréquences est-elle susceptible de provoquer des effets sur la santé, à plus ou moins long terme ? A court et moyen terme, c'est l'interrogation posée par les personnes qui se déclarent électro-hypersensibles (ANSES, 2018). A long terme, de nombreuses recherches ont été menées depuis plus de vingt ans pour tenter d'identifier des effets sur la santé d'une part, et des mécanismes d'action d'autre part. Il s'agit d'études menées chez l'humain, par des recherches cliniques et épidémiologiques, chez l'animal, sur des cultures cellulaires, et même sur des végétaux.

Si le déploiement des réseaux mobiles, et en particulier l'installation des antennes relais, a modifié rapidement notre environnement électromagnétique, les simulations et

(5) <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPmfgdl.pdf>

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999H0519&from=FR>

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000226401&categorieLien=id>

Le cas du téléphone mobile est en revanche très particulier. C'est en effet l'objet source de champs électromagnétiques, parmi toutes les autres sources présentes dans notre environnement quotidien, qui provoque l'exposition la plus intense, et de loin. L'exposition n'est pas permanente comme dans le cas des antennes-relais, mais elle est beaucoup plus élevée. Un rapport de l'ordre de 100 à 1 000 existe par exemple entre l'exposition au téléphone mobile porté à l'oreille par rapport à l'exposition environnementale, issue des sources lointaines (relais de diffusion audiovisuelle, antennes relais de téléphonie mobile, box Wi-Fi...). Il est donc logique que les effets potentiels de l'exposition aux rayonnements émis par les téléphones mobiles aient fait l'objet d'investigations depuis de nombreuses années. D'autres arguments rendaient nécessaires ces recherches : la proximité entre la source de rayonnements portée à la tête et le cerveau, ainsi que le nombre extrêmement élevé d'utilisateurs, parfois très jeunes, et la rapidité avec laquelle ce développement s'est opéré.

### **Effets cancérogènes**

En 2013, l'Agence nationale de Sécurité sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (Anses) notait, dans son avis relatif aux effets des radiofréquences sur la santé, qu'on ne peut pas exclure le fait que, dans certaines conditions, l'exposition aux radiofréquences puisse favoriser l'oxydation ou induire des cassures de l'ADN, toutefois sans effet pérenne sur la perte d'intégrité de l'ADN. Ces modifications parfois observées semblent être rapidement réparées. Les autres données biologiques ne mettaient pas en évidence de mécanisme accréditant l'hypothèse d'un effet de cancérogénèse. Depuis, des études publiées simulant une exposition sur le long terme, réalisées chez l'animal, ont été beaucoup commentées. Falcioni *et al.* (2018) ont rapporté avoir observé des tumeurs cardiaques chez des rats, consécutives à l'exposition à des radiofréquences. Et fin 2018, le *National Toxicology Program* américain publiait les rapports finaux de l'étude de très grande envergure conduite à Chicago sur la cancérogénicité de l'exposition aux radiofréquences sur des rats et souris (NTPa et b, 2018). Les auteurs concluaient qu'il existe un niveau de preuve « ambigu » que l'apparition notamment de tumeurs cérébrales chez les rats (gliomes) d'une part et un niveau de preuve « limité » que l'apparition de tumeurs cardiaques (schwannomes malins) d'autre part soient liées à l'exposition aux radiofréquences (signal 3G). Il faut noter que, dans l'étude du NTP, les tumeurs ont été observées pour des niveaux d'exposition élevés (DAS du corps entier au moins de 6 W/kg), qui ne correspondent pas à une situation réaliste pour l'Homme.

L'interprétation des résultats hétérogènes obtenus pour l'ensemble des études *in vitro* et *in vivo* réalisées depuis de nombreuses années est donc délicate. Toutes les instances d'expertise nationales et internationales s'accordent cependant à l'heure actuelle pour écarter la preuve d'un effet de l'exposition aux champs électromagnétiques des radiofréquences sur la cancérogenèse chez l'animal.

Par ailleurs, de nombreuses recherches épidémiologiques ont étudié les liens entre l'usage du téléphone mobile et le risque associé de tumeur cérébrale. Le téléphone mobile est en effet la source de champ électromagnétique qui représente l'exposition (à la fois en intensité, en durée, et en nombre d'individus concernés) de loin la plus élevée. L'usage premier du téléphone mobile l'ayant placé au contact de la tête, il était logique que la recherche s'intéressât aux tumeurs cérébrales. Le Centre international de Recherche sur le Cancer (Circ), en 2010, a conclu, en intégrant notamment les résultats de l'étude internationale *Interphone* (Cardis *et al.*, 2011), au lien possible entre exposition aux radiofréquences et augmentation du risque de gliome. En 2013, dans son évaluation des risques sanitaires liés aux radiofréquences, l'ANSES citait également, en matière de cancérogénicité, un effet possible pour les utilisateurs « intensifs » de téléphones mobiles, c'est-à-dire ceux ayant cumulé plus de 1 640 heures d'exposition (correspondant à la part de la population dans laquelle un excès de risque est retrouvé dans l'étude *Interphone*). Une augmentation du risque de types rares de tumeurs gliales (moins de 20 % d'augmentation de l'incidence) ne peut

ainsi être exclue, pour le sous-groupe des utilisateurs très intensifs par exemple, pour des durées d'induction supérieures à quinze ans (aucune donnée n'étant disponible au-delà).

### **Effets sur le système nerveux central**

Parmi les différentes hypothèses d'effets biologiques liés à l'exposition aux radiofréquences, la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique (BHE), qui protège le cerveau et participe à l'efficacité de son métabolisme, ou encore la modification du débit sanguin cérébral, ont alimenté des controverses scientifiques nourries initialement par des publications mentionnant par exemple une altération de la BHE, au début des années 2000, à laquelle ont succédé de nombreux travaux de recherche pendant une décennie. A l'issue de ces travaux, aucun effet neurotoxique d'une exposition aux radiofréquences sur la barrière hémato-encéphalique n'a été observé de façon évidente.

Du fait de la proximité des téléphones mobiles avec la tête, et tout particulièrement pour les enfants, l'impact éventuel des radiofréquences sur le fonctionnement cérébral, son activité électrique, mais également les fonctions cognitives ou le sommeil a été exploré, de façon plus ou moins complète. Par fonction cognitive, on entend en particulier l'attention, la mémoire ainsi que les fonctions liées au langage, aux gestes ou encore à la coordination.

En étudiant par exemple des paramètres d'enregistrements encéphalographiques chez l'humain, des modifications peuvent être retrouvées sous exposition aux radiofréquences (Croft *et al.*, 2010). Quelques études chez l'animal laissent par ailleurs penser que l'exposition aux radiofréquences pourrait modifier les performances cognitives et la mémoire, voire de façon *a priori* étonnante, les améliorer (Kumlin *et al.*, 2007 ; Arendash *et al.*, 2010). De nombreuses études dans ce domaine ont également été réalisées chez l'humain, et en particulier chez les enfants. Les conditions expérimentales, les tests réalisés et les populations divergent grandement, il est donc difficile de tirer de toutes ces expérimentations des conclusions définitives. Cependant, quelques expériences méritent l'attention : des études rapportent des modifications de paramètres d'encéphalogrammes, lors d'une exposition en aveugle aux radiofréquences, pour les ondes émises par le cerveau correspondant à l'attention, la mémoire, ainsi qu'aux émotions et sensations (Krause *et al.*, 2006 ; Loughran *et al.*, 2013). Concernant l'étude du sommeil sous exposition aux radiofréquences, si les études réalisées ne mettent pas en évidence de modifications de la durée ou de la qualité du sommeil, là encore, certaines soulignent des modifications de paramètres d'enregistrements encéphalographiques. On peut également rapprocher ces observations de celles obtenues dans le domaine des basses fréquences, pour lesquelles on retrouve une interférence possible avec l'activité électrique cérébrale (par exemple Carrubba *et al.*, 2010).

A ce jour, cependant, aucune incidence pathologique de ces observations n'a été mise en évidence.

### **Autres effets sur la santé**

La recherche des effets des radiofréquences sur la santé est caractérisée par un foisonnement d'hypothèses, de sources d'expositions, de protocoles, de mécanismes biologiques et d'effets étudiés. Sans détailler l'intégralité des effets biologiques et sanitaires investigués, en complément de ceux déjà évoqués ci-dessus, on peut citer les principaux domaines qui ont fait l'objet de recherches : les maladies neurologiques, les fonctions auditives, les rythmes circadiens, le système immunitaire, le système endocrinien, la reproduction et le développement, le système cardiovasculaire, ou encore le bien-être... En fonction des intérêts propres des chercheurs mobilisés, mais aussi des possibilités de publication, ces thèmes ont été plus ou moins couverts par la recherche. Dans tous les cas, les données produites sont très hétérogènes, il est ainsi impossible, d'après les instances d'expertise nationales et internationales, de conclure à l'existence ou non de ces effets sur la santé.

## Conclusion

Alors que les opérateurs de téléphonie mobile préparent le prochain déploiement de la 5G, la 4G continue, elle, à se développer. L'observatoire de la téléphonie mobile de l'Agence nationale des Fréquences (ANFR) <sup>(6)</sup> rapporte qu'en novembre 2019, les demandes d'autorisation pour installer des antennes 4G étaient toujours en progression. A cette date, le nombre de sites d'émission 4G (environ 211 000) n'était plus très éloigné du nombre de sites 2G et 3G réunis (environ 234 000). Comme l'indique le Baromètre du numérique publié régulièrement par l'Arcep <sup>(7)</sup>, l'usage du *smartphone* progresse, de même que l'accès à Internet par ce biais plutôt que par un ordinateur, y compris à domicile. Les usages vidéo croissent également, et en particulier les abonnements aux plateformes de vidéo à la demande. Les conditions sont donc réunies pour que le trafic de données mobiles progresse encore, ce qui va avoir pour conséquence d'une part d'augmenter l'exposition environnementale, qui pourrait l'être fortement en relatif, mais rester à des niveaux assez faibles en valeur absolue, à l'exception des lieux plus exposés (points atypiques) qui pourraient se multiplier, et d'autre part de modifier voire d'accroître l'exposition personnelle *via* le téléphone mobile. La consommation énergétique accrue et les conséquences environnementales que ces évolutions engendrent devraient être intégrées à des réflexions portant sur les développements d'infrastructures de réseaux de communication. De même que l'augmentation du niveau d'exposition de la population. La présence renforcée des réseaux de télécommunications, qui accompagne des volontés d'aménagement du territoire et de connectivité, rentre par ailleurs nécessairement en conflit avec les demandes de protection exprimées par les personnes électrohypersensibles, dont la souffrance attribuée à l'exposition aux ondes doit être prise en compte. L'attention portée à la recherche d'effets éventuels de l'exposition aux radiofréquences a donc tout son sens. Cependant, la difficulté à faire émerger des conclusions des multiples recherches aux objectifs dispersés, ainsi que l'hétérogénéité de la qualité des protocoles utilisés, pourraient militer en faveur de programmes de recherche ciblés, idéalement partagés au niveau international, afin de concentrer les moyens financiers et humains sur les hypothèses les plus préoccupantes. Plus de vingt ans de recherches dans le domaine des effets des radiofréquences, en particulier des communications mobiles, sur la santé, devraient permettre de dégager des priorités d'action. Si les derniers résultats controversés en matière de cancérogenèse en font un candidat évident, les effets sur le fonctionnement cérébral, par la proximité de la tête avec les téléphones et les résultats déjà obtenus dans ce domaine, devraient également faire partie des objectifs prioritaires.

La 5G va apporter des modifications importantes dans l'exposition des personnes, avec d'une part une montée en fréquence (3,5 GHz dans un premier temps, puis autour de 26 GHz ensuite en Europe), et d'autre part, pour les communications mobiles, une nouvelle répartition spatio-temporelle des expositions, avec des antennes actives dont le faisceau sera dirigé vers les utilisateurs. Ces modifications des conditions d'exposition devraient être prises en compte dès la conception des protocoles et systèmes, afin d'anticiper les conséquences de la modification de notre environnement, et ne pas sous-estimer les questionnements qui peuvent en résulter. L'exemple du déploiement du compteur communicant Linky, qui suscite de nombreuses interrogations, voire des craintes quant aux effets possibles sur la santé des communications CPL <sup>(8)</sup> associées, montre qu'il semble hasardeux d'écarter les citoyens de l'information et de la réflexion qui devraient accompagner des choix d'infrastructures, dont l'installation a nécessairement des répercussions sur l'environnement, et donc potentiellement sur notre santé, à plus ou moins long terme. Ces

---

(6) <https://www.anfr.fr/gestion-des-frequences-sites/observatoire/actualites/actualite/actualites/observatoire-anfr-pres-de-49-500-sites-4g-autorises-par-lanfr-en-france-au-1er-decembre-2019/>

(7) <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/numerique/le-barometre-du-numerique.html>

(8) CPL : courant porteur en ligne.



développements devraient s'accompagner des moyens nécessaires pour en évaluer, de manière indépendante, les conséquences potentielles sur l'environnement et la santé.

Enfin, au-delà des effets potentiels sur la santé strictement liés à l'exposition aux champs électromagnétiques, les effets sur la santé au sens large, y compris psycho-sociale, de la transformation de nos modes de vie par les outils numériques, doivent également être évalués et pris en compte.

## **Bibliographie**

ANFR (2019), « Recensement des points atypiques », Edition du 20 mars 2019.

ANSES (2018), « Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques ».

ARENDASH G. W. & SANCHEZ-RAMOS J. *et al.* (2010), "Electromagnetic field treatment protects against and reverses cognitive impairment in Alzheimer's disease mice", *Journal of Alzheimer's Disease*, 19(1), pp. 191-210.

CARDIS E. & ARMSTRONG B. K. *et al.* (2011), "Risk of brain tumours in relation to estimated RF dose from mobile phones: Results from five interphone countries", *Occupational and Environmental Medicine*, 68(9), pp. 631-640.

CARRUBBA S., FRILOT II C., CHESSON JR A. L. & MARINO A. A. (2010), "Mobile-phone pulse triggers evoked potentials", *Neuroscience Letters*, 469(1), pp. 164-168.

CROFT R. J. & LEUNG S. *et al.* (2010), "Effects of 2G and 3G mobile phones on human alpha rhythms: Resting EEG in adolescents, young adults, and the elderly", *Bioelectromagnetics*, 31(6), pp. 434-444.

D'ANDREA J. A. *et al.* (2003), "Behavioral and cognitive effects of microwave exposure", *Bioelectromagnetics*, Suppl. 6:S, pp. 39-62.

DANKER-HOPFE H. & DORN H. *et al.* (2011), "Effects of electromagnetic fields emitted by mobile phones (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on the macrostructure of sleep", *Journal of Sleep Research*, 20 (1 PART I), pp. 73-81.

DAVIS C. C. & BALZANO Q. (2010), "The brain is not a radio receiver for wireless phone signals: Human tissue does not demodulate a modulated radiofrequency carrier", *Comptes rendus Physique*, 11 (9-10), pp. 585-591.

DEWEY W. C. *et al.* (2009), "Hyperthermia classic commentary: Arrhenius relationships from the molecule and cell to the clinic", *International Journal of Hyperthermia*, 25, pp. 21-24.

FALCIONI L. *et al.* (2018), "Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz GSM base station Environmental emission", *Environmental Research*, 165, pp. 496-503.

FOSTER K. R. & SCHWAN H. P. (1996), "Dielectric properties of tissues", *Handbook of biological effects of electromagnetic fields*, CRC Press, pp. 25-102.

FOSTER K. R. & GLASER R. (2007), "Thermal mechanisms of interaction of radiofrequency energy with biological systems with relevance to exposure guidelines", *Health Physics*, 92(6), pp. 609-620.



- KOWALCZUK C. *et al.* (2010), “Absence of nonlinear responses in cells and tissues”, *Bioelectromagnetics*, 31(7), pp. 556-565.
- KRAUSE C. M. *et al.* (2006), “Mobile phone effects on children’s event-related oscillatory EEG during an auditory memory task”, *International Journal of Radiation Biology*, 82, pp. 443-450.
- KUMLIN T. & IIVONEN H. *et al.* (2007), “Mobile phone radiation and the developing brain: Behavioral and morphological effects in juvenile rats”, *Radiation Research*, 168(4), pp. 471-479.
- LOUGHRAN S. P. *et al.* (2013), “No increased sensitivity in brain activity of adolescents exposed to mobile phone-like emissions”, *Clinical Neurophysiology*, 124, pp. 1303-1308.
- NTP (2018a), “NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in hsd:sprague dawley sd rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900 mhz) and modulations (gsm and cdma) used by cell phones”.
- NTPb (2018b), “NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in B6C3F1/N mice exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (1,900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones”.
- SHEPPARD A. R. *et al.* (2008), “Quantitative evaluations of mechanisms of radiofrequency interactions with biological molecules and processes”, *Health Physics*, 95(4), pp. 365-396.
- SMITH-ROE S. L. *et al.* (2019), “Evaluation of the genotoxicity of cell phone radiofrequency radiation in male and female rats and mice following subchronic exposure”, *Environmental and Molecular Mutagenesis*, Oct 21. doi: 10.1002/em.22343. [Epub ahead of print].
- TILLMANN T. & ERNST H. *et al.* (2010), “Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure in an ethylnitrosourea mouse model”, *International Journal of Radiation Biology*, 86(7), pp. 529-541.
- ZENI O. & SANNINO A. *et al.* (2012), “Induction of an adaptive response in human blood lymphocytes exposed to radiofrequency fields: influence of the universal mobile telecommunication system (UMTS) signal and the specific absorption rate”, *Mutation Research*, 747(1), pp. 29-35.

# Les fréquences de l’IoT : un nouveau paradigme pour les ingénieurs radio

Par **Benoît PONSARD**  
SIGFOX

L’ère des communications radio a commencé en 1895 avec les premières expérimentations de Marconi. Plus d’une centaine d’années après, le secteur des radiocommunications est dominé par les solutions cellulaires et leurs milliards de téléphones mobiles. D’abord conçus pour les communications *human-to-human* (H2H), les systèmes cellulaires ont ensuite servi les communications *human-to-machine* (H2M) puis le *machine-to-machine* (M2M). L’Internet des Objets (IoT en anglais) est apparu ensuite et a étendu le concept de connectivité à tout objet avec, bien sûr, une préférence pour la connexion par radio.

De nombreuses définitions existent pour l’IoT (Madakam 2015) ; elles sont essentiellement centrées sur la problématique du réseau qui doit acheminer les données produites par les objets connectés. Nous préférons donner ici une définition de l’IoT centrée sur les objets eux-mêmes, car ce sont eux qui apportent la plus forte contrainte dans le système global. Ainsi, « l’IoT, c’est la possibilité de connecter à Internet des objets que l’on ne considère pas, de près ou de loin, comme des ordinateurs ». Un champ de céréales, un détecteur de fumée, un compteur d’eau, un conteneur maritime entrent dans cette définition de l’Internet des Objets.

Une première conséquence de cette définition est l’absence de source native d’énergie électrique dans la quasi-totalité des objets connectés. L’ajout de piles ou de batteries est incontournable dans l’IoT et constitue une contrainte importante pour les communications radio. Les autres caractéristiques des communications de l’IoT sont les suivantes :

- messages applicatifs de taille très limitée : quelques octets suffisent pour coder une alarme de dysfonctionnement, une position GPS ou un index de comptage ;
- envois peu fréquents : les cas d’usage de l’IoT vont de moins d’un à une bonne centaine de messages par jour, mais on constate que la grande majorité émet un peu moins de dix messages sur une journée ;
- forte asymétrie des flux : la majorité des objets émettent beaucoup plus de messages applicatifs vers le réseau qu’ils n’en reçoivent du réseau ;
- forte densité d’objets connectés : les zones urbaines peuvent voir des densités de 50 k objets connectés au km<sup>2</sup>, voire 1 M. Ces valeurs dépassent largement les densités que l’on observe en téléphonie cellulaire et nécessitent une grande adaptabilité en taille (en anglais : *scalability*) des solutions IoT ;
- longueur et prédictibilité de la durée des piles : pour les objets connectés, la durée de vie sur piles se compte souvent en années (voir plus de douze ans pour les compteurs d’eau) et non en jours comme pour les mobiles que l’on peut recharger dès que nécessaire. De plus, la prédictibilité et l’invariance de la durée des piles, quelles que soient les conditions radio, sont favorables à la gestion de grands parcs d’objets connectés.

Ces caractéristiques de communication sont très différentes des usages du cellulaire où, depuis presque trente ans, on recherche plus de débits par téléphone et plus de capacité par station de base. Les technologies cellulaires tentent, génération après génération, de tirer le meilleur parti des bandes de fréquences mises à leur disposition par les régulateurs, en organisant très strictement

l'usage temporel et fréquentiel du spectre par les mobiles connectés à une station de base. Cette approche, très consommatrice d'information de signalisation, ne peut pas convenir à l'IoT où l'on cherche, avant toute chose, à réduire le besoin énergétique des communications. C'est pourquoi les choix techniques de la radio IoT sont différents à la fois pour le spectre et pour les protocoles de communication.

C'est pour capturer cette nouvelle problématique que la société Machina Research (Machina, 2013) a forgé, dès 2013, la notion de *Low Power Wide Area Network* (LPWAN). Les LPWANs résolvent une apparente contradiction : des longues portées, pour couvrir de grands territoires avec un petit nombre de stations de base, tout en ayant de faibles puissances d'émission dans les objets connectés pour être compatibles avec une utilisation sur piles.

## Éléments de choix pour les fréquences de l'IoT

La conception d'une solution de connectivité pour l'IoT doit répondre à trois choix : le cadre réglementaire, les longueurs d'onde optimales et la quantité de spectre nécessaire pour rendre le service attendu.

Le premier choix concerne le cadre réglementaire des fréquences utilisées. Les bandes licenciées offrent un environnement radioélectrique globalement favorable car prévisible : les interférences sont de nature connue puisque venant de systèmes à la technologie connue. L'inconvénient de ces bandes est le coût de leur licence d'exploitation qui peut mettre en péril le modèle économique de l'IoT, où les coûts unitaires de connectivité doivent être significativement plus bas que ceux des systèmes antérieurs (*i.e.* M2M).

L'autre approche consiste à utiliser les bandes à autorisation générale (bandes dites « sans licence »). Les contraintes de partage du spectre, rappelées dans le tableau ci-dessous, sont définies par le régulateur et généralement harmonisées par zone géographique. Elles sont toujours simples à mettre en œuvre et ne reposent que sur une décision locale à chaque objet qui veut émettre un message : elles ne nécessitent pas de coordination entre les objets. Le respect de ces contraintes donne un accès libre aux bandes de fréquence correspondantes mais cela crée, en revanche, un environnement d'interférence totalement imprévisible.

| Zone géographique | Bande spectrale | Puissance max | Technique de partage du spectre                  |
|-------------------|-----------------|---------------|--|
| Europe            | 862-876 MHz     | 25 ou 500 mW  | taux d'émission limité à 1% ou 10% de temps      |
| Amériques         | 902-928 MHz     | 1W            | saut de fréquence toutes les 400ms               |
| Japon             | 920-923 MHz     | 20 ou 250mW   | détection d'occupation du spectre avant émission |

Contraintes de partage du spectre libre en sub-gigahertz.

Le deuxième choix concerne la longueur d'onde des fréquences pour l'IoT. Les fréquences UHF (300 MHz à 3 000 MHz) sont privilégiées avec un intérêt particulier pour la bande sub-gigahertz (800-1 000 MHz) qui présente un bon compromis entre la taille de l'antenne, les pertes de propagation et les performances des technologies radio intégrées sur silicium (*chipset radio*).

On notera que la bande sans licence à 2,4 GHz (bande du WiFi) n'est pas favorable aux systèmes LPWAN, car les pertes de propagation y sont trop importantes. Cette bande est en revanche

largement utilisée pour les évolutions de basse consommation des technologies actuelles (par exemple WiFi HaLow® et Bluetooth® Low Energy). On parle alors plutôt d'IoT de proximité.

Le troisième élément de choix concerne la quantité de spectre nécessaire au service de connectivité IoT. Alors que l'IoT de proximité peut profiter de la forte atténuation à 2,4 GHz pour faire de la réutilisation spatiale des fréquences, les réseaux LPWAN ne peuvent s'appuyer sur ce phénomène pour limiter leur besoin spectral car ils cherchent des distances de communication de plusieurs kilomètres, même en environnements urbains denses. La solution vient du profil de communication des objets connectés sur les réseaux LPWAN : des petits messages applicatifs peu fréquents, même émis par un très grand nombre d'objets connectés, se satisfont de quelques centaines de kilohertz de bande radio (ETSI, 2017).

## Les systèmes actuels

### Cellulaire

Avant de voir émerger le concept de connectivité généralisée à tous les objets, les technologies cellulaires ont été très tôt utilisées pour connecter des machines (approche M2M). Les premières solutions M2M ont utilisé le mode circuit, mais sans grand succès. C'est l'arrivée du GPRS au tournant des années 2000 qui a permis l'émergence de solutions vraiment M2M. Cette technologie cellulaire, simple d'emploi, utilise des canaux standards de 200 kHz de large dans les bandes licenciées 2G. Elle est largement disponible dans les réseaux de deuxième génération ou plus, mais son bilan de liaison maximum sans antenne (*i.e.* 144dB) laisse de nombreux trous de couverture, difficiles à contourner pour des machines à connecter dont le lieu d'installation n'est pas modifiable.

Le NB-IoT et le LTE-M sont les réponses récentes du 3GPP au problème des trous de couverture du M2M. Leur bilan de liaison accru améliore la couverture du service, même dans les endroits difficiles (environnement urbain dense, intérieur des bâtiments). Le LTE-M s'insère dans les plans de fréquences du LTE mais demande à l'objet de gérer une bande de 1,4 MHz pour établir ses communications, même en faible quantité. Le NB-IoT utilise des canaux dédiés de 200 kHz. Ces canaux peuvent être pris soit dans le spectre 4G (*in-band*), soit dans les bandes de garde du LTE (*guard band*), soit dans des bandes 2G (*stand alone*).

### LPWAN

Pour les bandes sans licence, la connectivité radio de l'IoT est conditionnée par une contrainte forte : la limitation de la puissance émise des bandes sans licence qui, en Europe et selon la bande de fréquence, est de 25 ou 500 mW. Pour obtenir une grande distance de communication et limiter les trous de couverture radio, il faut mettre en œuvre des modulations innovantes en émission et un traitement de signal performant en réception, afin d'avoir un grand bilan de liaison malgré une faible puissance autorisée en émission.

La société Semtech a opté pour la technologie LoRa (pour *Long Range*) inventée par la société française Cycleo. Le signal émis est étalé en CSS (*Chirp Spread Spectrum*) dans un canal radio de 125 kHz. En réception, un circuit intégré spécialisé détecte le signal par corrélation, éliminant ainsi les bruits et perturbateurs aléatoires, présents dans le canal. Un réseau LPWAN CSS utilise plusieurs canaux en fonction de la densité de messages à acheminer.

Contrairement à l'étalement de spectre, la technologie 3D-UNB de Sigfox utilise une modulation par sous-porteuse aléatoire à bande ultra-étroite. Cette technique, qui peut s'apparenter à de l'OFDM « non orthogonal », concentre l'énergie émise sur un message dans une seule sous-porteuse (on parle alors de « quasi-tone ») dont la fréquence centrale est aléatoire. Côté réception, une grande dynamique et une grande linéarité permettent d'extraire chaque signal reçu par filtrage

adaptatif. Chaque quasi-tone occupant un espace spectral de quelques centaines de hertz, un très grand nombre de quasi-tons peuvent être émis simultanément et reçus avec une faible probabilité de collision dans une bande spectrale de quelques centaines de kilohertz. À titre d'exemple, le service de connectivité de toute l'Europe est assuré par le réseau Sigfox avec 2x200 kHz de bande spectrale dans les fréquences sans licence 868-870 MHz.

De plus, la technologie 3D-UNB s'appuie sur une approche totalement innovante de l'usage du spectre inventée, elle aussi, par Sigfox. Appelée "pervasive listening", cette technologie consiste à mettre le réseau des stations de base au service des objets : toutes les stations de base écoutent ensemble la même bande spectrale de 200 kHz. Ainsi, un objet voulant émettre un message n'a pas besoin de s'inscrire auprès d'une station pour que ses messages soient traités par celle-ci. Il lui suffit d'émettre sa trame de données directement (on pourrait dire sans crier gare) ; elle sera reçue par une station et, la plupart du temps, par plusieurs stations. Cette réception multiple, volontairement recherchée lors du déploiement des stations de base, apporte une diversité spatiale favorable à la qualité de service. Le "pervasive listening" est une nouvelle façon d'utiliser le spectre radio, bien adaptée aux problématiques de l'IoT évoquées plus haut. L'objet peut être très simple puisqu'il accède à la ressource radio de sa propre initiative. Toute la complexité de gestion de l'accès aléatoire et des interférences dues aux collisions est repoussée dans les stations de base et le cœur de réseau de Sigfox.



Stations de base du réseau Sigfox.  
©SIGFOX

## L'IoT par satellite

Les communications par satellite sont perçues comme potentiellement disponibles sur tout le globe. L'IoT par satellite suit cette même logique, en particulier pour les cas d'usage de la logistique inter- ou trans-continentale et le suivi d'objets en zones isolées. En comparaison des autres systèmes de communication par satellite, l'IoT présente une contrainte technique forte : la faible énergie disponible donc la faible puissance pour émettre des objets vers le ou les satellites. Par exemple, une puissance de 25 mW permet d'être reçu par un satellite en orbite basse (LEO : *Low Earth Orbit*), mais pas par un satellite géostationnaire. Dans l'état actuel des techniques, un service de connectivité IoT par satellite nécessitera donc une constellation de satellites LEO.

Pour les liaisons montantes (des objets vers la constellation), on a la possibilité de prendre des fréquences radio dédiées aux communications vers les satellites ou des fréquences sans licence. La réutilisation de fréquences sans licence permet d'obtenir une continuité de service du point de vue des objets, car ceux-ci émettent leurs données de la même façon, qu'ils soient en vue de stations de base terrestres, ou seulement en vue de la constellation de satellites. Pour les liaisons descendantes, les fréquences doivent réglementairement être prises dans les bandes harmonisées pour satellites. La partie du spectre UHF en dessous de 1 GHz offre, là aussi, un compromis intéressant. Le vrai point dur de l'IoT par satellite est sa capacité à gérer un grand flux de messages lors du passage des satellites au-dessus des zones denses.

## **Et pour l'avenir ?**

Pour la très grande majorité des usages liés à l'IoT, les fréquences UHF proches du gigahertz sont intéressantes pour toutes les technologies de connectivité envisagées actuellement, qu'elles soient cellulaires, LPWAN ou satellitaires. Elles présentent l'avantage d'un bon compromis entre les pertes de propagation, la dimension des antennes et les possibilités des techniques intégrées sur silicium. Leur principale limite vient de l'absence d'harmonisation mondiale qui oblige à développer des designs radio pour chaque réglementation. Même avec un très vaste déploiement, l'IoT ne représente qu'une faible quantité de données à transporter par unité de surface. Il n'est donc pas impensable d'envisager, à terme, un spectre harmonisé mondialement pour la connectivité IoT car quelques centaines de kilohertz suffisent pour délivrer un service global. Le *challenge* le plus important sera de simplifier l'accès au spectre pour des objets qui doivent être peu complexes. C'est là un nouveau défi pour les fréquences de l'IoT.

## **Bibliographie**

MADAKAMS., RAMASWAMY R. & TRIPATHI S. (2015), "Internet of Things (IoT): A Literature Review", *Journal of Computer and Communications*, 3, 164-173, <http://dx.doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>

Machina Research (2013), "Revolution, evolution or distraction? View on emerging low power wide area wireless technologies in M2M", webinar, 3<sup>rd</sup> June 2013, <https://machinaresearch.com/news/webinar-revolution-evolution-or-distraction-machina-researchs-view-on-emerging-low-power-wide-area-wireless-technologies-in-m2m>, consulted on March 2019

ETSI (2017), "System Reference document (SRdoc); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics for Ultra Narrow Band (UNB) SRDs operating in the UHF spectrum below 1 GHz", ETSI TR 103 435 v1.1.1, February 2017.

# 5G Connectivity

By **Roberto VIOLA**

European Commission, Director General, DG CONNECT

## **5G Connectivity enables the digital transformation**

Our society is undergoing a rapid and profound transformation: a digital transformation that will change our way of life forever. Yet the success of this revolution is far from guaranteed. If this transformation is to succeed - and I believe it must succeed - it will be due to a combination of the right political, strategic and economic choices.

A society built on citizens' ability to connect to anything from anywhere in order to manage their daily lives is only possible if connectivity is reliable and ubiquitous. Without first-class communication networks, there will be no Digital Single Market <sup>(1)</sup>.

5G technology is not only enabling much faster access rates (about 10 times more than 4G), it is also designed and expected to provide mission-critical services for vertical sectors, such as the mobility, energy and health sectors, leading to the digital transformation of our economy and society. This importance of very high capacity networks and 5G in particular was highlighted in the 5G Action Plan <sup>(2)</sup> that the Commission adopted in September 2016, as part of a comprehensive connectivity package setting out the European ambitions for a Gigabit Society.

Today, the data traffic on mobile networks grows at least at a rate of 50% per year. Novel applications like Virtual Reality will require more capacity, more speed and faster response time from communication networks. High Performance Computing systems will further generate huge data volumes.

5G will be a key enabler for the Internet of Things by providing a platform to connect a massive number of sensors, devices and actuators with stringent energy and transmission constraints. Furthermore, mission-critical services requiring very high reliability, global coverage and/or very low latency, which are up to now handled by specific networks, typically public safety, will become natively supported by the 5G infrastructure.

The European Commission initiated visionary EU-funded research activities already in 2012, which led to the setup of the European 5G Public Private Partnership (5G PPP). The 5G PPP has been implemented under the European Horizon 2020 programme with about € 700 Million of public support over the 2014-2020 period. The private sector contribution is matching that amount by a factor of at least five <sup>(3)</sup>. As a result, European 5G technology and technological actors are among the leaders. This is by the way something that is also well reflected by the EU contributions to standards in the 3GPP. Altogether, the 5G PPP represents the largest 5G R&D initiative in the world.

Thus, 5G networks are considered by the European Commission as a strategic asset. They support the digital transformation of the industry, the public sector and society as a whole.

---

(1) VIOLA R., *5G in Italy White Book*, Introduction.

(2) European Commission, "5G for Europe: An Action Plan", COM(2016)588.

(3) BARANI B. & STUCKMANN P., "Leading-edge 5G Research and Innovation: An undivided commitment of Europe", *5G in Italy White Book*.



## **No 5G services without spectrum**

An important policy objective of the Commission is pursuing its 5G spectrum roadmap for the Union. This roadmap has taken on board the view of the Member States, expressed through three targeted opinions (in 2016, 2018 and 2019) by the Radio Spectrum Policy Group (RSPG) and serves the Gigabit connectivity targets of the Union.

The Commission has delivered on the harmonised availability of the three pioneer bands (700 MHz, 3.6 GHz, and 26 GHz) with the adoption of technical harmonisation decisions. The Ultra High-Frequency (UHF) Decision of the Parliament and the Council marked a milestone in repurposing the 700 MHz band by mid-2020 for mobile use with ambitious coverage objectives, while safeguarding sufficient spectrum for evolving terrestrial broadcasting until 2030. In addition, with the adoption of the European Electronic Communications Code, Member States are bound by a common deadline (end-2020) for allowing use of the 3.6 GHz band and at least 1 GHz of spectrum in the 26 GHz band.

Spectrum which provides both good coverage and capacity can be found in the 3.6 GHz band, which has become the primary 5G band in Europe. Its effective authorisation in large contiguous blocks for public operators, while also enabling the variety of vertical applications (different business models are possible) is a key factor for Europe's 5G leadership. For the new 26 GHz band, a spectrum sharing approach has been adopted to ensure the 5G coexistence with satellite services in order to deliver a politically balanced solution on both 5G connectivity and monitoring climate change.

The Commission is committed to making all existing bands below 6 GHz "5G-ready" by end 2021 as well as harmonising more mm-wave spectrum (most likely 40.5-43.5 GHz and 66-71 GHz) after WRC-19. With 5G, we are de facto moving from the previous spectrum target of 1 200 MHz for wireless broadband to a more ambitious spectrum target, which could be as much as ten times higher.

5G is expected to drive convergence of different access technologies and service requirements into a common network infrastructure. In this context of the anticipated "system of systems", the Commission also works towards providing more spectrum for radio LANs (e.g. in the 6 GHz range) as well as ensuring efficient use and expanding dedicated spectrum bands for sectorial use such as the 5.9 GHz band for road and rail intelligent transport systems. Vertical sectors may need dedicated spectrum e.g. in specific mission-critical use cases, which are not adequately addressed by public networks. Connected and automated mobility is a clear 5G priority. Its ultimate success in terms of innovation and deployment fostering EU leadership depends on our success in leveraging a wider ecosystem that not only means safety for cars and trains but also for pedestrians and bikes. Clearly, we support efficient spectrum use, technology neutrality and a future-proof solution that encompasses safety for all people that have access to our roads.

## **Unlocking investment with the European Electronic Communications Code**

The Code must be implemented by Member States by December 2020. It provides a framework for enhanced coordination on 5G infrastructure deployment and spectrum management. It also ensures the timely assignment of any EU-harmonised band and long licence durations for public operators (a minimum 20 years' period), network densification and infrastructure sharing. In order to make 5G deployment a pan-European success, it is paramount to set the authorisation conditions for using 5G spectrum so as to promote ambitious infrastructure rollout and innovative

services in the single market. The Peer Review Forum established by the Code gives a strengthened role to the RSPG, the high-level group of Member States advising the Commission. It should become a viable EU-level platform for constructive assessment and best practice development on authorisations and spectrum awards, in order to help deliver on single market objectives and investment in infrastructure. This platform should ensure a coordinated approach to 5G spectrum management to enable the big variety of 5G use cases and stakeholders. To this end, embedding the pro-investment spectrum principles of the Code is key – in authorisation rules, sharing conditions, licence durations or facilitating spectrum leasing.

In order to make 5G deployment a success, it is essential to set the conditions ensuring timely access to the appropriate spectrum and allowing for the necessary investment in high-capacity networks. The Code therefore promotes a more flexible and dynamic access to spectrum, through trading and leasing, but also sharing solutions, notably with regard to the spectrum licensing.

The design of auctions and conditions attached to licences (in particular for the 5G pioneer bands) will determine competition and Europe's innovation potential for many years to come. It is essential that policy makers and regulators make future-proof decisions to favour economic growth and societal welfare. This is about promoting investment in 5G infrastructure and services, for mobile broadband but also for digitalising various industry sectors. I would caution against auction designs that risk to extract excessive capital from the market, as they are likely to undermine investment capacity in network deployment.

## **The European 5G Observatory: Monitoring 5G in Europe**

In October 2019, the 5G Observatory released its latest report showing that the European operators are head-to-head with other leading regions in the world preparing for the commercial launch of 5G this year. European mobile operators have been working for two years with equipment manufacturers and vertical sectors on various trials in order to validate 5G's capabilities. At the end of September 2019, it was clear that they are heavily involved in 5G testing with 165 trials reported at that time (up from 138 in Q4/2018) in EU-28 countries.

During 2019, many European mobile operators were preparing the commercial phase as the first 5G smartphones and other devices became available in the second or third quarter. Commercial services are available in a number of cities in Europe. Deployments are on-going with first 5G base stations deployed in many European cities. Many European Member States enjoy 5G services (Austria, Finland, Estonia, Germany, Ireland, Italy, Spain, Romania). In several countries, there are more than one 5G service provider: TIM and Vodafone in Italy, T-Mobile and Vodafone in Germany; the latest announced commercial service launches were in Romania (Orange - November 2019), Germany (T-Mobile Germany - September 2019) and Ireland (Vodafone - August 2019). Further launches are expected soon.

However, the current availability of spectrum for 5G in all bands, low, mid and high, is still a challenge in Europe. Whereas the 700 MHz band has already been harmonised at EU level, there are also a legal obligations to assign upper bands in all Member States by end of 2020. The Observatory shows some recent progress, although, most of the work is still to be done. The Commission will insist on the 2020 deadline and consider derogations only in very exceptional cases and if fully justified. I hope the situation will look even better at the end of 2020.

Industry has made clear that Europe cannot expect to lead in 5G deployment if significant improvements are not introduced in spectrum management to ensure that investments on a wide scale – starting in cities and along transport routes – can generate an adequate return. We need indeed strong leadership from industry, the main driver leading to an EU competitive advantage.

From its side, the Commission is contributing by funding trials, of EUR 300 million in the last phase of the 5G-PPP. The Commission attributes high importance to the automotive and transport sectors in the deployment of 5G in Europe. The Commission is encouraging cooperation between Member States and among stakeholders on cross-border initiatives for the establishment of large scale testing and early deployment of 5G corridors.

## **Concluding remarks**

To make 5G a reality we have to address enhanced security and trust, interoperable platforms across verticals and above all spectrum availability. Spectrum is a key resource to make widespread and universally accessible 5G services a reality – both enhanced broadband for citizens and businesses, and the Internet of Things. The Union’s 5G pioneer bands should be harnessed for use by operators and other stakeholders as soon as possible. The European Electronic Communications Code and the UHF Decision are setting out a clear roadmap for Member States to ensure this happens by the end of 2020. There is a sense of urgency to succeed in achieving this objective in a coordinated way. Harmonised spectrum availability is a major factor to ensure Europe’s 5G leadership.

We may not compromise 5G deployment and services take-up to the benefit of industry, society and the environment by the short-sighted objective of maximising auction revenues. While health matters remain a national competence, we need to engage with all relevant authorities to ensure that all decisions regarding radio exposure limits that go beyond the European and international precautionary levels are made in full knowledge of the evidence and of the likely consequences.

Looking into the next Commission term and beyond, we have to address important horizontal topics of efficient and sustainable spectrum management. On the one hand, this is about establishing a favourable mind set to spectrum sharing, both by regulators and industrial players. On the other hand, sustainability is measured by the green footprint of wireless networks themselves and also their contribution to the green transformation of other economic sectors. These topics should underlie a longer-term European spectrum strategy with the relevant EU-level bodies such as the Radio Spectrum Policy Group becoming the leading actors. We may also think of revamping our Spectrum Policy Programme<sup>(4)</sup> at the EU level to match recent developments.

---

(4) Pursuant to Article 4(4) of the Code.

# Plateformes à haute altitude et constellations de satellites

## Introduction

Les plateformes à haute altitude et les constellations de satellites partagent l'ambition d'offrir une infrastructure pour l'accès fixe ou mobile large bande dans les zones où les réseaux mobiles terrestres ne sont pas rentables économiquement, ambition qui concerne plus du tiers des habitants de la planète. Dans le cas des plateformes à haute altitude, le déploiement peut se faire rapidement, au coup par coup, selon les besoins de chaque pays. Pour les constellations, une fois tous les satellites lancés, l'infrastructure est disponible sur l'ensemble de la planète.

Il y a une vingtaine d'années, les progrès de la technologie permettant d'envisager la réalisation de tels systèmes à court terme, les conférences mondiales de l'UIT (CMR) furent saisies de demandes en spectre considérables pour permettre cette réalisation. Satisfaire ces demandes représentait dans les deux cas un casse-tête technico-réglementaire pour autoriser sans risque de brouillage l'accès de ces systèmes au spectre attribué à d'autres systèmes terrestres ou par satellite. Au prix de difficiles négociations, la CMR-97 résolut ce casse-tête et les CMR suivantes complétèrent ses décisions par la mise à disposition de spectre additionnel.

La crise du début des années 2000 vint à bout des projets de l'époque, mais aujourd'hui, les progrès récents de la technologie et les décisions prises par l'UIT il y a plus de vingt ans font que le déploiement de ces systèmes est désormais une réalité. C'est un des rares exemples où la réglementation mondiale a précédé la technologie.

## Plateformes à haute altitude

Par **Christine MENGELLE**

Thales Alenia Space

Initialement utilisées à des fins scientifiques pour la météorologie ou la surveillance de l'environnement, les plateformes à haute altitude ont suscité un intérêt croissant depuis la fin des années 1990, comme complément de connectivité radio des réseaux terrestres et à satellites. Les principaux avantages du positionnement de ces plateformes dans la stratosphère sont de permettre une large zone de couverture, tout en étant situées au-dessus du trafic aérien commercial et des forts courants de vents (courants-jets).

Depuis trois décennies, les progrès technologiques et une meilleure connaissance de l'environnement stratosphérique ont permis d'améliorer la viabilité de projets de plateformes à haute altitude. En parallèle, depuis 1997, l'environnement réglementaire a favorablement évolué avec l'identification par l'Union internationale des Télécommunications (UIT) de bandes de fréquences dédiées permettant le déploiement de ces nouveaux types de service.

## Atouts des stations à haute altitude

Les plateformes à haute altitude présentent des avantages opérationnels indéniables, liés notamment à la taille de leur zone de couverture (plus large que des réseaux terrestres classiques) associée à

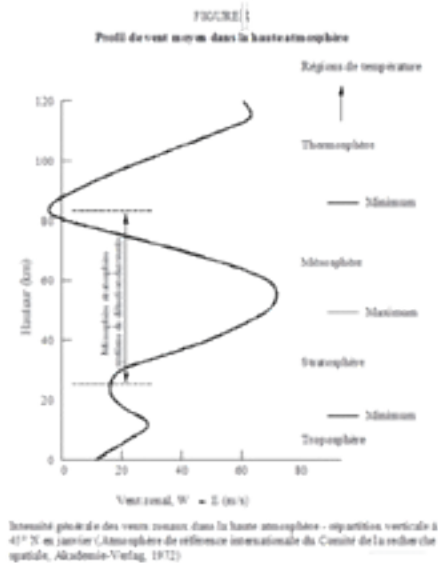
une très faible latence (comparée à celle des satellites). A ce titre, elles sont donc particulièrement intéressantes pour assurer des opérations de surveillance pour des applications civiles et de défense, ou de télécommunication pour des applications de connexité large bande ou mobiles terrestre.

Ces stations présentent également l'avantage d'être déployables très facilement avec une infrastructure de réseau et une maintenance au sol minimales, dans des zones isolées géographiquement (montagneuses, désertiques...) ou suite à un sinistre (tremblement de terre, cyclone...).

En outre, elles peuvent facilement être ramenées au sol pour assurer leur maintenance ou leur évolution, cette dernière pouvant consister à remplacer la charge utile pour embarquer des technologies plus avancées, ou à changer de mission.

Ce type de plateforme offre donc une excellente complémentarité avec les solutions terrestres et à satellites en termes de connexité radio.

## Contraintes techniques et technologiques



Ce concept de plateformes opérant dans un environnement stratosphérique implique des défis technologiques importants liés à des domaines aussi divers que l'avionique, l'efficacité des panneaux solaires, le stockage de l'énergie, les matériaux composites et les antennes. Ces défis, qui ont longtemps été un frein à leur développement depuis les premiers projets des années 1990, sont en passe d'être relevés avec les projets qui ont vu le jour ces dernières années.

L'opération de ces plateformes impose d'autres contraintes techniques telles que le maintien d'une position quasi stationnaire au-dessus de la zone desservie au sol. A cet égard, le choix de l'altitude opérationnelle (typiquement autour de 20 km) présente l'avantage de se situer au-dessus des courants-jets (situés entre 10 et 15 km), dans des zones où les vents sont beaucoup moins forts. Les plateformes peuvent ainsi planer ou se mouvoir selon un modèle prévisible, au-dessus de l'altitude maximale de l'espace aérien contrôlé.

Deux grands types de plateformes ont ainsi vu le jour pour répondre à ces contraintes : celles de type ballons dirigeables (ou *LTA* : *Lighter Than Air*) et celles de type drones (ou *HTA* : *Heavier Than Air*). Ces choix sont souvent historiques de la part des constructeurs, et répondent à des contraintes avioniques et à des exigences de maintenabilité en vol différentes.

## Les plateformes à haute altitude à l'UIT

L'exploitation de plateformes depuis la stratosphère implique également des contraintes réglementaires liées à l'émission de fréquences radio à 20 km d'altitude, ceci afin de garantir un environnement radioélectrique viable pour ces plateformes ainsi que pour les autres utilisateurs du spectre.

Dès 1997, la Conférence mondiale des Radiocommunications (CMR-97) décide de définir un nouveau type de station dans le Règlement des Radiocommunications (RR) pour décrire ces stations à haute altitude ou HAPS (*High Altitude Platform Station*) : « Une station installée sur un objet placé à une altitude comprise entre 20 et 50 km et en un point spécifié, nominal, fixe par rapport à la Terre » (No. 1.66A du RR). Pour la première fois, la CMR-97 décide également d'identifier des bandes de fréquences pour lesquelles l'opération des HAPS est désormais autorisée au niveau mondial : 47.2-47.5 GHz et 47.9-48.2 GHz.

Toutefois, il s'avère que dans certaines zones du globe (notamment tropicales), cette gamme de fréquences est fortement contrainte par les affaiblissements dus à la pluie, rendant son utilisation par les HAPS très difficile d'un point de vue technique. Pour répondre à cette difficulté, la CMR-2000 identifie des nouvelles bandes de fréquences pour les HAPS à 28 GHz (27.9-28.2 GHz, sens HAPS-Terre) et à 31 GHz (31-31.3 GHz, sens Terre-HAPS) dans 23 pays majoritairement situés en Asie, mais sur une base de non-protection, non-brouillage vis-à-vis des autres services utilisant ces bandes.

Devant l'essor des réseaux mobiles, la CMR-2000 décide également d'autoriser l'utilisation des HAPS comme stations de base de réseaux de télécommunications mobiles internationales (IMT) dans les bandes de fréquence comprises entre 1.9 GHz et 2.1 GHz. Cette décision est complétée à la CMR-12 par une identification de fréquences pour les HAPS de 2 x 80 MHz dans la bande 6 GHz, limitée à des « liaisons passerelles » (*Gateways*), pour la connexion entre stations de base des réseaux mobiles. Cette identification est limitée à cinq pays, là encore sur une base de non-protection, non-brouillage.

Compte tenu des difficultés de partage du spectre posées par les HAPS, la CMR-12 a également décidé de limiter leur exploitation aux bandes de fréquences expressément identifiées dans l'article 5 du RR (No. 4.23).

## Les futurs usages des HAPS

Depuis quelques années, des avancées technologiques majeures ont permis de démontrer la viabilité des HAPS. Ceci s'est concrétisé par l'émergence de nombreux projets dès le début des années 2010, portés notamment par Thales Alenia Space, Airbus ou Lockheed Martin.



Figure 2 : Exemple de HAPS HTA en cours de développement  
©Thales Alenia Space

Lors de la CMR-15, à l'initiative de Facebook, un nouveau point d'ordre du jour pour la CMR-19 a été proposé portant sur l'identification de fréquences HAPS pour faciliter l'accès aux applications large-bande à l'échelle mondiale. Après quatre années d'études de partage détaillées menées à l'UIT, la CMR-19 a identifié les bandes de fréquences 31-31,3 GHz (sens HAPS-Terre) et 38-39,5 GHz pour une utilisation mondiale par les HAPS, ainsi que les bandes 21,4-22 GHz et 24,25-27,5 GHz en Région 2 (continent américain).

Par ailleurs, la CMR-19 a chargé la CMR-23 d'étudier la possibilité, pour une station HAPS, d'utiliser les mêmes bandes de fréquences que les stations de base IMT au sol pour étendre la connectivité large bande mobile aux communautés mal desservies et aux zones isolées, en dessous de la bande de fréquences 2.7 GHz.

## Conclusion

Les progrès technologiques dans les domaines des matériaux composites, de l'avionique, des cellules solaires, des batteries et des moteurs électriques permettent désormais d'envisager le déploiement à court terme de projets de stations à haute altitude.

Les récentes décisions de la CMR-19, qui a d'une part identifié des bandes harmonisées aux niveaux mondial et régional pour les HAPS pour des applications de connectivité large-bande, et d'autre part décidé d'étudier l'utilisation de stations placées sur des plateformes à haute altitude en tant que stations de base IMT, contribuent d'une façon majeure à la mise en place d'un cadre réglementaire propice indispensable au développement de ces plateformes.

# Constellations de satellites

Par **François RANCY**

Dès les premières années de l'ère spatiale, les satellites géostationnaires (GSO) se sont imposés pour la fourniture de services commerciaux de télécommunications spatiales. La raison en est simple : l'orbite des satellites géostationnaires, située dans le plan de l'équateur à l'altitude de 36 000 km, est la seule qui permette à un satellite de rester fixe par rapport à la Terre. La station terrienne qui l'utilise n'a donc besoin que d'une seule antenne pointée dans une direction fixe de l'espace alors que dans le cas d'un système à satellites non géostationnaires (NGSO), il lui faut plusieurs antennes qui doivent en permanence changer de direction de pointage pour assurer un suivi sans coupure. De plus, un système de trois satellites GSO permet d'assurer une couverture quasi totale de la planète, à l'exception notable des zones polaires (typiquement au-delà de 60° de latitude, où ces satellites ne sont plus visibles), alors qu'un système à satellites NGSO nécessite, pour assurer une couverture mondiale permanente, un minimum d'une douzaine de satellites, ces satellites passant la plupart de leur temps à couvrir des zones non habitées. Ces raisons expliquent la domination quasi exclusive de l'orbite des satellites géostationnaires sur toutes les autres orbites depuis près de soixante ans pour les liaisons commerciales fixes ou de radiodiffusion.

Ainsi, le **No. 22.2**<sup>(1)</sup> du Règlement des Radiocommunications (RR) précisait, depuis le début de l'ère spatiale, que « les systèmes à satellites non géostationnaires ne doivent pas causer de brouillages inacceptables aux réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite et du service de radiodiffusion par satellite fonctionnant conformément aux dispositions du présent Règlement et ne doivent pas demander à bénéficier d'une protection vis-à-vis de ces réseaux ».

---

(1) Pour éviter toute complication inutile, cet article retient la numérotation des dispositions du RR en vigueur depuis la CMR-97. Avant cette conférence, qui remania entièrement le RR, ces dispositions existaient généralement, mais avec un numéro différent.

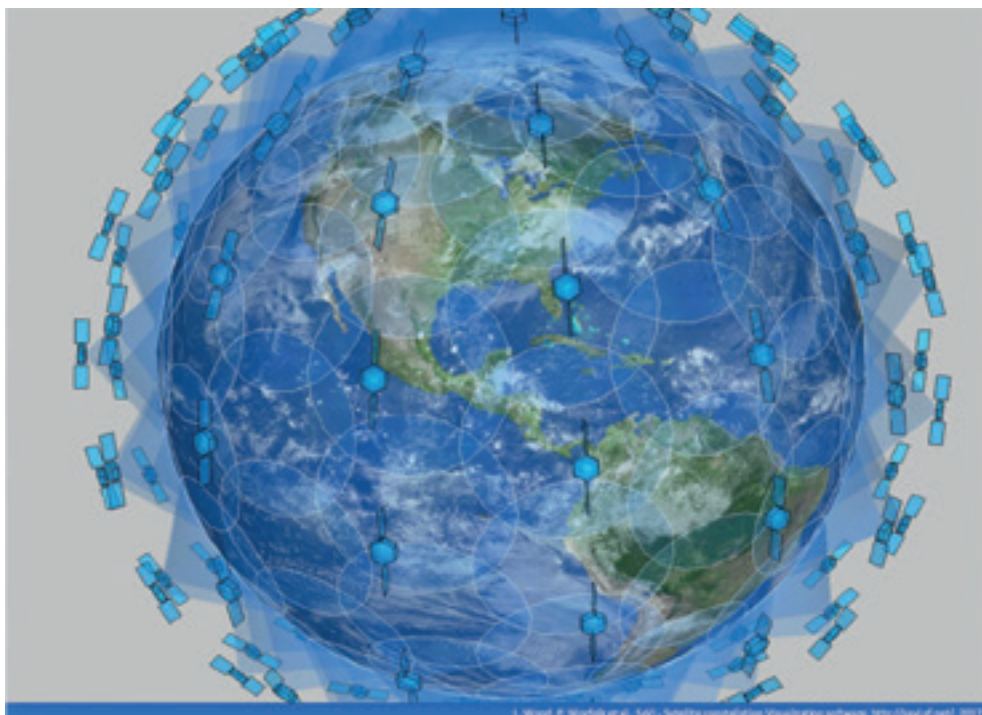


La Résolution 506 allait encore plus loin en interdisant tout autre satellite que géostationnaire dans les bandes attribuées au service de radiodiffusion par satellite, excluant ainsi l'utilisation des systèmes NGSO du service fixe par satellite dans les bandes partagées entre les deux services.

On comprend que ces deux dispositions signaient la mort réglementaire des systèmes commerciaux NGSO, à l'exception notable des satellites utilisés pour le service mobile, et dont les stations terriennes peu directives pouvaient s'accommoder de satellites NGSO. Ainsi, depuis le début des années 1960, le système NGSO russe MOLNIYA assurait la desserte des zones polaires, la plupart des communications mobiles passant par les satellites GSO d'INMARSAT.

Au début des années 1990, apparurent les premiers projets de constellations de satellites NGSO, Orbcom (35 satellites), Iridium (66), Globalstar (48) et ICO (12), qui misaient sur les économies d'échelle qu'un réseau à satellites NGSO couvrant d'emblée toute la planète permettrait d'obtenir pour offrir l'équivalent d'un service mobile cellulaire avec téléphones portables, alors à l'aube de son développement.

A la CAMR-92, les premières constellations firent valoir avec succès leurs demandes d'accès au spectre en obtenant l'attribution au service mobile par satellite, à titre primaire, de **183 MHz** de spectre supplémentaire en dessous de 2.7 GHz, soumise à la procédure de coordination du **No. 9.11A du RR**, basée sur le **principe du premier arrivé-premier servi** entre systèmes GSO, systèmes NGSO, et services de Terre, autrement dit la voie royale pour l'accès au spectre et la reconnaissance et la protection internationales. De plus, les 2x34 MHz attribués depuis le début de l'ère spatiale au service mobile par satellite et utilisés par INMARSAT à 1.5/1.6 GHz étaient également ouverts aux systèmes NGSO sur la même base.



SaVi – Satellite constellation Visualization software, <http://savi.sf.net/>, 2017.

©L. Wood, P. Worfolk et al.

Cette première victoire en appelait une nouvelle : à la CMR-95, des attributions de fréquences supplémentaires furent décidées dans les bandes du service fixe par satellite, pour les liaisons de connexion nécessaires entre satellites NGSO du service mobile par satellite et stations fixes nodales. Compte tenu des difficultés de partage entre systèmes GSO et NGSO, l'application du **No. 9.11A** nécessitait de retenir des bandes peu utilisées à l'époque par les systèmes GSO, et que, de ce fait, ces derniers auraient peu de chances de pouvoir utiliser dans le futur. Le choix de la CMR-95 se porta donc sur les bandes à 5 091-5 250 MHz, 6 700-7 075 MHz, 19,3-19.6 GHz et 29.1-29.4 GHz (au total **1.134 GHz** de spectre partagé avec les services de Terre), également soumises aux dispositions du **No. 9.11A**, et le **No. 22.2** fut donc aboli dans ces bandes.

C'est aussi à la CMR-95 que, de cette question des liaisons de connexion relativement limitée dans ses conséquences et qui avait été bien étudiée lors de la préparation de la conférence, on passa à une bataille épique qui devait s'étendre sur trois CMR, autour de la question des constellations NGSO du service fixe par satellite.

Dans les derniers mois précédant la CMR-15, les promoteurs du système Teledesic (MM. Bill Gates et Craig McCaw, avec l'appui du gouvernement des États-Unis au plus haut niveau) entreprirent de convaincre les Etats membres de l'UIT que les décisions attendues de la CMR-95 sur les liaisons de connexion NGSO pour les systèmes mobiles par satellite auraient pour conséquence d'empêcher le déploiement de ce système, constitué de 840 satellites NGSO et qui devait offrir l'accès immédiat à Internet à tous les pays de la planète quasiment gratuitement.

Personne dans la communauté relativement restreinte de la gestion des fréquences ne semblait alors prendre au sérieux ce projet jugé extravagant par ses dimensions, son prix (10 à 20 milliards de dollars) et son défi ouvert à la technologie de l'époque, d'autant que cette question, n'étant pas à l'ordre du jour de la CMR-95, ne pouvait faire l'objet d'études dans le cadre de sa préparation. La surprise fut donc de taille lorsque, au premier jour de la conférence, un levé de pancartes montra que l'écrasante majorité des Etats membres avait bien compris le message des deux milliardaires et que les jeux étaient faits.

La CMR-95 décida donc de suivre la proposition des Etats-Unis, en ouvrant **1 GHz** de fréquences à 18.8-19.3 GHz et 28.6-29.1 GHz aux systèmes NGSO du service fixe par satellite, également selon la procédure du **No. 9.11A** et en y abolissant le **No. 22.2**. La CEPT, qui s'était opposée avec vigueur à cette décision tout au long de la Conférence pour défendre les intérêts de ses systèmes GSO, subit un revers cuisant, n'obtenant que de rediscuter les 20 % inférieurs de ces deux bandes à la CMR-97 et apparaissant comme opposée au progrès inéluctable de la technologie.

Les études conduites en préparation de la CMR-97 montrèrent que le système Teledesic, qui avait pris date peu après la fin de la CMR-95, et donc avant la plupart des systèmes GSO intéressés par cette bande, était incapable de partager ses fréquences avec d'autres systèmes, GSO ou NGSO, et que, premier arrivé, Teledesic serait donc le seul servi. La décision de la CMR-95 revenait ainsi à donner à ce système 1 GHz de spectre avec le monopole mondial pour la fourniture de services Internet par des systèmes NGSO, les autres bandes du service fixe par satellite restant soumises aux dispositions léonines du **No. 22.2**.

La seule stratégie possible face à une telle situation était d'ouvrir aux systèmes NGSO l'ensemble du spectre attribué aux services fixe et de radiodiffusion par satellite sans toucher aux principes inscrits dans le **No. 22.2**, mais en quantifiant cette disposition par des limites claires sur le rayonnement maximum que peut créer une constellation NGSO pour que le brouillage causé à tout système GSO soit « acceptable ». Pour être crédibles, ces limites devaient être « dures », c'est-à-dire contraignantes et donner lieu à une vérification officielle de conformité par le Bureau des radiocommunications de l'UIT (BR), invalidant les droits d'utilisation du spectre d'un système NGSO en cas de dépassement.

Pour avoir des chances de succès, cette stratégie nécessitait aussi un projet concurrent de Teledesic, qui puisse rendre crédible l'idée de réaliser un système NGSO sur cette base. La société Alcatel Espace (devenue depuis Thales Alenia Space) releva alors ce défi en proposant le système Skybridge. Avec l'appui du gouvernement français, elle réussit en quelques mois à convaincre les 48 Etats membres de la CEPT que la meilleure façon de protéger leurs systèmes GSO était de promouvoir l'adoption du concept de limites dures. C'est ainsi que la CEPT se métamorphosa en championne du progrès et de la concurrence.

Au sein des groupes chargés de la préparation de la CMR-97, l'opposition générale des communautés GSO et de radiodiffusion fit que la conférence commença sans qu'aucune discussion préparatoire n'ait pu avoir lieu. La veille de la conférence, le porte-parole de la FCC expliquait à la presse : « Nous sommes inaltérablement opposés à l'adoption de limites. » Ce n'est qu'à la fin de la première semaine qu'il fut décidé que la proposition de la CEPT serait examinée.

Après trois semaines de négociations acharnées, la CEPT finit par rallier à ses arguments la grande majorité des Etats membres et la CMR-97 adopta ces limites<sup>(2)</sup> dans plus de 7 GHz de spectre, comprenant l'essentiel des bandes attribuées aux services fixe et de radiodiffusion par satellite, et limita la restriction de la Résolution 506 aux seuls systèmes de radiodiffusion par satellite. Ces limites n'étaient cependant que provisoires et restaient à réexaminer par la CMR-2000. Après deux ans d'études approfondies qui finirent par vaincre toutes les oppositions, la CMR-2000 modifia ces limites, le plus souvent en les relâchant, et y ajouta des limites opérationnelles plus sévères dont la conformité devait être vérifiable dans les conditions d'exploitation, et des dispositions particulières pour la protection des très grandes stations terriennes des systèmes GSO. Il ne restait plus qu'à développer le logiciel de validation à utiliser par le BR pour vérifier la conformité aux limites des systèmes NGSO proposés.

La CMR-03 compléta le tableau en ouvrant 1,3 GHz de spectre supplémentaire aux systèmes NGSO à 6 et 4 GHz, l'article 22 couvrant désormais l'essentiel des bandes utilisées commercialement par le service fixe par satellite.

Au début des années 2000, la bulle des valeurs technologiques eut cependant raison de la plupart des systèmes NGSO en projet pour le service fixe par satellite. Les droits acquis par Teledesic expirèrent, laissant ainsi la porte se refermer sur la possibilité d'un système NGSO dans la bande correspondante (du fait de leur occupation désormais réelle par les systèmes GSO) et confirmant que la solution réglementaire de coordination qui avait été adoptée par la CMR-95 n'était pas adaptée sur le long terme.

Depuis 2015, les progrès des technologies de lanceurs et de satellites ont renouvelé l'intérêt pour les constellations NGSO du service fixe par satellite, toujours pour la fourniture d'Internet dans les zones non couvertes par les réseaux fixes ou mobiles, qui représentent encore la plus grande partie de la surface terrestre (sans compter les océans). C'est ainsi que des constellations de plusieurs centaines de satellites NGSO sont actuellement en cours de déploiement :

---

(2) Plus précisément, il s'agit des limites de puissance surfacique équivalente (epfd) de l'Article 22 du RR, rayonnée de façon cumulative a) par l'ensemble des satellites de la constellation et devant être vérifiées en tout point de la Terre, dans un jeu d'antennes de référence de station terrienne de système GSO pointées vers n'importe quel point de l'orbite GSO, et pour des pourcentages de temps donnés (epfd<sub>↓</sub>), et b) par l'ensemble des stations terriennes de la constellation NGSO en tout point de l'orbite GSO (epfd<sub>↑</sub>), et c) par l'ensemble des satellites de la constellation NGSO en tout point de l'orbite GSO (epfd<sub>is</sub>). Le calcul nécessaire pour vérifier la conformité d'un système NGSO à ces limites impose de modéliser l'ensemble de la constellation NGSO et de la « faire tourner ». Pour que ce calcul soit faisable, on suppose que chaque satellite de la constellation rayonne en permanence au maximum de sa capacité, ce qui rend le résultat plus protecteur pour les systèmes GSO.

- OneWeb, 648 satellites construits par OneWeb et Airbus et lancés par Ariane, Soyouz et Virgin Galactic ;
- Starlink, 1 600 satellites construits par SpaceX et lancés par son Falcon 9.

Ce déploiement, rendu possible par des dispositions du RR adoptées vingt ans plus tôt, est un des rares exemples où la réglementation mondiale ait précédé la technologie. Le logiciel de validation du BR, dont le développement avait été mis en sommeil après 2003, a été achevé en 2018 et la plupart des systèmes NGSO proposés ont été jugés conformes aux limites.

Pour assurer le futur des constellations NGSO, la CMR-19 a complété la réglementation par les décisions suivantes :

- Précision sur le délai réglementaire de mise en service après la demande initiale d'accès au spectre pour conserver ses droits sur le spectre : 10 % des satellites de la constellation devront être déployés dans un délai de deux ans après la septième année et 50 % dans les cinq ans, et 100 % dans les sept ans.
- Ouverture de 9 GHz de spectre aux systèmes NGSO dans les bandes à 40 et 50 GHz, dans des conditions similaires à celles décidées par les CMR-97 et 2000, les limites dures applicables dans l'Article 22 contenant des niveaux contraignants de dégradation des performances de systèmes GSO de référence.

# L'utilisation des fréquences radioélectriques pour l'observation de la Terre

Par **Dominique MARBOUTY**

Météo et climat, société française de la météorologie et du climat

La toute récente Conférence mondiale des Radiocommunications (CMR-WRC-19) qui s'est tenue à Charm el-Cheikh en novembre 2019 s'est conclue par un événement tout à fait inhabituel. Si l'identification de nouvelles bandes de fréquence pour la 5G était attendue, le fait que le secrétaire général de l'Organisation météorologique mondiale (OMM-WMO) ait jugé nécessaire d'adresser à son homologue de l'Union internationale des Télécommunications (UIT-ITU) un message très négatif, diffusé lors de la séance plénière de la CMR-19, et soutenu par un nombre important de délégations dont la France, l'était beaucoup moins. Ce message note en particulier, au sujet des conditions accompagnant l'identification pour la 5G de la bande 24.25-27.5 GHz, voisine de la bande 23,6-24 GHz allouée à l'observation de la Terre :

« Cette décision de la CMR-19 a le potentiel de dégrader significativement la précision des données collectées dans cette bande de fréquence, mettant ainsi en danger les opérations de systèmes de satellites d'observation de la Terre, essentiels aux activités de prévision et d'alerte des services météorologiques nationaux. Ces effets potentiels pourraient être ressentis dans de multiples domaines impactés, en particulier l'aviation, la marine marchande, l'agriculture et les annonces d'événements extrêmes, ainsi que notre capacité commune de surveiller l'évolution du climat à l'avenir. »

Nous nous proposons ici d'expliquer ce qui a pu conduire à cette démarche tout à fait inhabituelle et de voir comment elle peut mettre en péril le système d'observation de la Terre. Pour cela nous examinerons comment fonctionne et surtout comment est utilisé ce système d'observation, comment sont assurées l'attribution et la protection des fréquences qui lui sont nécessaires, quels sont les cas antérieurs de conflit concernant des fréquences allouées à l'observation de la Terre. Cet examen sera largement basé sur les systèmes d'observation météorologique qui, du fait de leur ancienneté et de leur caractère opérationnel, ont largement structuré le système d'observation de la Terre.

## L'observation de la Terre

L'observation de la Terre couvre un domaine très large incluant l'atmosphère à tous les niveaux (troposphère, stratosphère, etc.), les océans, les surfaces continentales (couverture végétale, géologie, cours d'eau, constructions, etc.), la cryosphère (calottes polaires, glaciers), la biodiversité. Les premiers relevés systématiques concernant principalement vents et nuages remontent à l'Antiquité ; ils se sont intensifiés à partir du XVII<sup>e</sup> siècle avec le développement d'instruments permettant les mesures (thermomètres, baromètres) et l'émergence de la notion de mesures en réseau. C'est dans la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle que cette notion de réseau se généralise et conduit à l'organisation de la première réunion d'un congrès météorologique international en 1873 à Vienne, qui évoluera ensuite jusqu'à l'Organisation météorologique mondiale (OMM) actuelle. Les mesures au sol sont progressivement complétées par quelques mesures en altitude (cerf-volant, ballons, avions) et c'est en 1959 qu'est lancé le premier satellite météorologique Vanguard-2. Si cette tentative est un échec, dès 1960, Tiros-1 entame une longue série d'observations spatiales qui ont réellement permis le développement de l'observation de la Terre dans toutes ses composantes.

## Le rôle de l'observation de la Terre pour la prévision numérique du temps

La prévision météorologique a fortement progressé au cours des cinquante dernières années. Cela est dû à la conjonction de deux facteurs principaux : le développement des systèmes d'observation spatiaux et le développement de la prévision numérique, c'est-à-dire la capacité de modéliser l'atmosphère et de faire les calculs sur ordinateur. La réussite de la prévision numérique est elle-même la conséquence du développement d'une part des modèles, aussi bien dans leur composante prévision que dans la composante assimilation des données d'observation, d'autre part de la puissance de calcul des ordinateurs, passée de 100 000 additions par seconde sur le premier ordinateur utilisé pour la prévision numérique (l'ENIAC au début des années 1950) à des valeurs chiffrées aujourd'hui en petaflops ( $10^{15}$  opérations par seconde).

Cette progression est mise en évidence sur la figure 1 ci-dessous, qui montre l'évolution d'un score classique de prévision, du début des années 1980 à nos jours, pour plusieurs échéances, distinguant pour chaque échéance les scores pour les hémisphères Nord et Sud. On constate que la qualité des prévisions a progressé de trois à quatre jours sur la période : ainsi le score à sept jours en fin de période est supérieur au score à trois jours au début sur l'hémisphère Sud. Mais le point important est la forte progression sur l'hémisphère Sud par rapport à l'hémisphère Nord : la différence en début de période est due à la faible densité du réseau d'observation classique (sol et radiosondes) sur l'hémisphère Sud, qui est progressivement compensée par le développement de l'observation spatiale, surtout à partir de la mise en œuvre de la méthode d'assimilation variationnelle en 1996-1997.

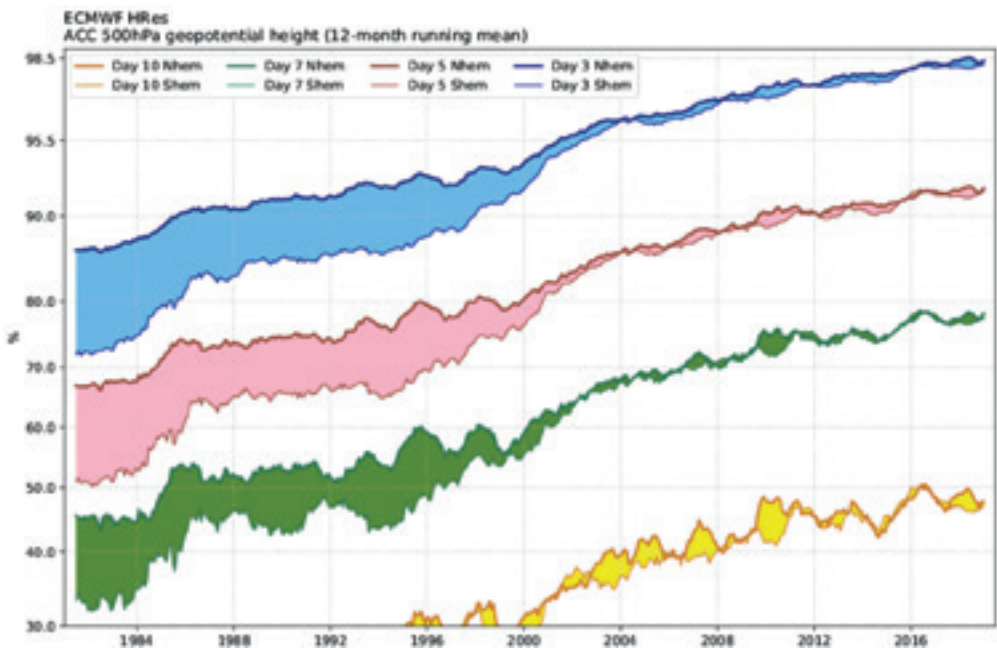


Figure 1 : Evolution de la qualité des prévisions du Centre européen pour les Prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT-ECMWF) entre 1981 et 2019. Le score utilisé est la corrélation d'anomalie au niveau 500 hPa : un score parfait atteint 100 %, on considère que la valeur minimale pour des prévisions utilisables est 60 %. L'évolution est représentée pour quatre échéances différentes : prévisions à trois jours (en bleu), à cinq jours (en rouge), à sept jours (en vert) et à dix jours (en jaune). Pour chaque échéance, le trait supérieur, en gras, correspond au score de l'hémisphère Nord, et le trait inférieur, normal, au score de l'hémisphère Sud. (©ECMWF).

Le graphe ci-après qui montre simplement l'évolution du nombre de satellites utilisés depuis 1996 permet de se faire une idée de l'importance prise par l'observation spatiale pour la prévision numérique. Aujourd'hui, une centaine de satellites sont utilisés opérationnellement ou en test, et



les données satellitaires représentent plus de 70 % des données assimilées. Cette évolution a été renforcée par le fait que les modèles de prévision numérique du temps, qui étaient des modèles d'atmosphère il y a vingt-cinq ans, sont devenus des modèles du système Terre intégrant des composantes océan, glace, chimie atmosphérique, interfaces sol (végétation) et océans (vagues). Ils font donc appel à toute la panoplie des systèmes d'observation de la Terre. Ces systèmes utilisent tous des ondes électromagnétiques et appartiennent à deux grandes familles, les systèmes passifs et les systèmes actifs.

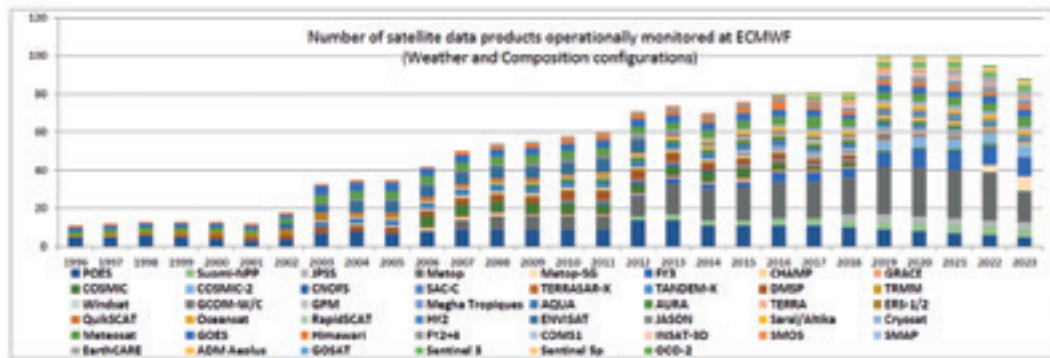


Figure 2 : Evolution du nombre et des types d'observations satellitaires utilisées par le Centre européen pour les Prévisions météorologiques à moyen terme entre 1996 et 2019, et projections jusqu'à 2023 (©ECMWF).

### Les systèmes d'observation passifs

Les systèmes passifs mesurent les émissions naturelles en provenance de la surface de la Terre. De fait, ils mesurent la résultante de ces émissions vue du dessus de l'atmosphère, donc après la traversée de toutes les couches depuis le sol. De tels instruments ont été développés dans le domaine des radiofréquences : ils font des mesures dans des bandes de fréquence étroites qui correspondent aux fréquences d'absorption d'éléments présents dans l'atmosphère. Ils doivent donc mesurer des signaux extrêmement faibles puisque l'émission naturelle de la Terre est faible et on mesure ce qui en reste après la traversée de l'atmosphère. Les bandes de fréquence sont déterminées par la structure moléculaire des éléments à caractériser et constituent des ressources naturelles irremplaçables, car fixées par les lois de la physique. Deux exemples importants sont la forte bande d'absorption de l'oxygène entre 50 et 60 GHz qui permet de collecter des informations sur le profil de température, non affectées par les nuages et la vapeur d'eau, et le pic d'absorption de la vapeur d'eau à 24 GHz qui permet d'évaluer la colonne de vapeur d'eau tout en étant peu sensible à l'eau liquide.

Si le principe de ces mesures est simple, leur mise en œuvre est extrêmement complexe pour les raisons suivantes :

- les signaux à mesurer étant très faibles, ils sont facilement noyés par la moindre émission parasite dans la bande concernée. De plus, la méthode de mesure ne permet pas de distinguer l'émission naturelle des émissions parasites ;
- les mesures sont une résultante de l'effet cumulé de toutes les couches de l'atmosphère depuis le sol. L'objectif est de reconstituer des champs 3D des paramètres de l'atmosphère tels que température, teneur en eau ou en vapeur d'eau. Cela nécessite de disposer simultanément de nombreux canaux permettant de retrouver les contributions des différents éléments. La perte d'un canal est préjudiciable à l'ensemble des mesures.



Le traitement des mesures radiométriques dans le domaine des micro-ondes a fait des progrès considérables depuis une vingtaine d'années. Ces mesures fournissent des informations jour et nuit, même au travers des nuages, sur tout le globe terrestre. Elles constituent aujourd'hui la première source d'information pour la prévision numérique du temps.

Il existe d'autres systèmes d'observation passifs, en particulier des sondeurs dans l'infrarouge qui constituent une autre source importante d'information. Et bien entendu les imageurs, disponibles principalement dans les domaines de la lumière visible et infrarouge, appartiennent également à cette catégorie.

### **Les systèmes d'observation actifs**

Les systèmes actifs sont en fait des radars qui émettent une onde en direction de la cible et mesurent ce qui en revient après réflexion ou diffusion. Il y a de nombreux instruments développés et testés pour fournir de nouvelles observations de la Terre en utilisant tous les domaines de fréquences possibles. Un exemple est la mission Aeolus lancée en 2018 qui fournit des vents en altitude en mesurant le déplacement des particules et des molécules de l'atmosphère par l'effet Doppler sur une émission lidar.

Les principaux types de systèmes actifs dans le domaine des radiofréquences sont :

- les radars à synthèse d'ouverture (connus sous leur acronyme anglais SAR), qui fournissent une image topographique de la surface de la Terre. Un bon exemple est la série Sentinel-1 du programme Copernicus de l'Union européenne ;
- les altimètres, qui mesurent la hauteur de la surface des océans à la verticale du satellite. La mission franco-américaine Topex-Poséidon a permis la première cartographie précise à quelques centimètres de la surface des océans ;
- les diffusiomètres (ou scatteromètres), qui permettent de mesurer les vagues et par là les vents à la surface des océans, et donnent des informations sur les couverts végétaux ;
- les radars de précipitations, qui permettent de mesurer l'intensité des pluies à la surface de la Terre ;
- les radars profileurs de nuage, qui renseignent sur les couches nuageuses.

Les fréquences utilisées pour ces mesures actives sont choisies en fonction de physique de la mesure et donc de la nature de la cible, du mécanisme de renvoi de l'onde par cette cible et de leur capacité à traverser les couches entre l'émetteur et la cible. Elles sont également des ressources importantes qui doivent être réservées pour cet usage et protégées des parasites.

### **La gestion des fréquences pour l'observation de la Terre**

De nombreuses fréquences sont donc indispensables pour l'observation de la Terre depuis l'espace, que cela soit de façon passive ou active. A ces besoins pour la réalisation des mesures, il convient d'ajouter les bandes de fréquence permettant de transmettre ces observations au sol. Des besoins similaires existent pour les appareils installés au sol, qui incluent là aussi des systèmes d'observation actifs : radars d'observation des précipitations (pluie, neige), profileurs de vent, télémètres nuages, mesures de visibilité, etc., ainsi que des besoins de transmission des données, en particulier les radiosondages (mesures de pression, température, humidité et vent par ballons ascendants).

La gestion et la protection des fréquences correspondantes sont principalement assurées dans le cadre de l'Union internationale des Télécommunications (UIT) et les décisions sont prises lors des Conférences mondiales des Radiocommunications (CMR). Les principales bandes de fréquence pour les mesures passives sont réservées strictement à cet usage. Les bandes utilisées pour les

mesures actives et les transmissions sont gérées selon les procédures habituelles de l'UIT (Rancy, 2019). Pour les observations spatiales, le manuel EESS (*Earth Exploration-Satellite Service*) de l'UIT décrit les systèmes d'observation et de transmissions, ainsi que la gestion des fréquences correspondantes.

L'attribution et la protection des fréquences pour l'observation de la Terre dans le cadre de l'UIT bénéficient de certains atouts mais ont aussi des faiblesses inquiétantes. Un atout important est le fait que le spatial et la météorologie sont fortement organisés à l'échelle mondiale. On peut ainsi noter que l'UIT et l'OMM sont toutes les deux installées à Genève à quelques centaines de mètres l'une de l'autre, et ont l'habitude de travailler ensemble comme le montre la réalisation en commun d'un manuel sur l'utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie (OMM-UIT, 2017). Un autre atout a été que les besoins en fréquence ont été exprimés depuis longtemps et satisfaits à une époque où la concurrence pour ces fréquences était beaucoup moins exacerbée qu'aujourd'hui.



Recherche de la cause d'un brouillage de radar météo.

©ANFR

Du côté des faiblesses, la principale est que les décisions importantes ou conflictuelles sont prises par la Conférence mondiale des Télécommunications où les représentants des Etats sont des spécialistes des fréquences, pour lesquels une fréquence sert à transmettre, pas à mesurer. On peut d'ailleurs noter que le slogan de l'UIT est « Engagé à connecter le monde », et non « Engagé à connecter et observer le monde ». Une autre faiblesse est que les appétits de nouvelles fréquences émanent de domaines en développement à fort impact économique, donc fortement soutenus par les Etats. On a ainsi vu se développer récemment plusieurs tentatives à l'encontre des fréquences attribuées à l'observation de la Terre, et plus particulièrement la bande d'absorption de la vapeur d'eau 23,6-24 GHz.

## Les atteintes à la bande d'absorption de la vapeur d'eau

Une première tentative d'utilisation de la bande de la vapeur d'eau à 24 GHz a été engagée au début des années 2000 par l'industrie automobile qui, forte d'un lobby extrêmement puissant, souhaitait utiliser une bande large de 5 GHz couvrant la fréquence « vapeur d'eau » pour les radars de détection installés pour assister le stationnement des véhicules. Après des discussions très difficiles et un travail énorme mené par les organisations scientifiques (ESA, Eumetsat, Eumetnet...), la question a été traitée en 2005 par la Commission européenne qui a donné à l'industrie automobile une autorisation d'utilisation de cette bande limitée dans le temps (2013) et en nombre de véhicules équipés (7 %), en indiquant que l'équipement des véhicules avec ces radars devrait progressivement basculer vers une fréquence de 79 GHz. Ces conditions ont effectivement été surveillées et respectées. Aujourd'hui la bascule vers la bande 79 GHz a été opérée et il ne reste plus que 0,1 % des véhicules équipés en radar 24 GHz, ce qui ne pose plus aucun problème.

Dans le cas, mentionné en début d'article, de la décision de la CMR-2019, le problème est un peu différent. Tout d'abord, l'identification à la 5G ne concerne pas la bande elle-même mais une bande voisine, très proche, 24.25-27.5 GHz. Le débat ne portait donc pas sur l'utilisation de cette bande par la 5G, mais sur le niveau de protection de la bande vapeur d'eau contre les « bavures » provenant de cette bande voisine. Pour éviter tout problème, les spécialistes des agences spatiales opérant les instruments effectuant les mesures de vapeur d'eau et l'OMM réclamaient une protection de l'ordre de -50 dBW/200 MHz<sup>(1)</sup> pour garantir le fonctionnement de leurs instruments. Avant la CMR, l'Europe s'était accordé un niveau de -42 dBW qui pouvait être pris comme un compromis acceptable, mais le niveau décidé par la CMR est de -33 dBW pendant huit ans puis -39 dBW au-delà. On est donc très loin du niveau demandé par la communauté de l'observation de la Terre, ce qui a provoqué la réaction de l'OMM. Le risque est effectivement très grand de voir une détérioration des mesures, et donc, de la qualité des prévisions numériques du temps. Plusieurs agences ont annoncé un risque de retour de plusieurs décennies en arrière, en particulier si la 5G est déployée rapidement pendant les huit premières années, ce qui paraît l'orientation actuelle.

Cette décision est malheureusement caractéristique de ce que l'on constate plus généralement dans le domaine environnemental, avec la très grande difficulté des diverses gouvernances nationales et mondiale à arbitrer en faveur de la protection des ressources naturelles lorsque cela entre en conflit avec une possibilité de croissance économique. Pourtant, les coûts pour notre société d'une détérioration de nos capacités à nous protéger de phénomènes extrêmes pourraient s'avérer bien plus coûteux que les surcoûts ou les délais qu'aurait générés pour la 5G un niveau de protection correct de la bande d'absorption de la vapeur d'eau.

*Je remercie chaleureusement Stephen English (ECMWF) et Philippe Tristant (expert radiofréquences) pour les nombreux éléments qu'ils m'ont communiqués pour la préparation de cet article.*

## Références

RANCY F. (2019), « Normalisation et fréquences », *Annales des Mines, Enjeux numériques*, n°5, mars, pp. 61-67. En téléchargement sur : <http://www.annales.org/enjeux-numeriques/2019/en-2019-05/2019-03-11.pdf>

OMM-UIT (2017), *Manuel Utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie: surveillance et prévisions concernant le climat, le temps et l'eau*, 124 p.

UIT (2011), *Handbook. Earth Exploration-Satellite Service*.

(1) Ce chiffre indique le niveau de puissance maximum de la pollution radioélectrique autorisé et s'exprime en decibel watts (dBW). La pollution est d'autant plus forte que la valeur numérique est faible. Ainsi, une pollution de -30 dBW est dix fois plus nocive qu'une pollution de -40 dBW et cent fois plus nocive que -50 dBW.

# Les besoins actuels et futurs en fréquences pour les armées : un défi stratégique pour la France

Par le **Général de brigade Jérôme BORDELLÈS**

Officier général chargé des fréquences du ministère des Armées

et le **Capitaine de frégate Mickaël ULVOA**

Bureau de la gouvernance des fréquences de la Direction générale du Numérique et des Systèmes d'Information et de Communication – Ministère des Armées

A l'instar d'un monde en perpétuelle innovation, faisant face à des menaces s'appuyant elles aussi sur les technologies les plus récentes, les armées françaises se modernisent par l'acquisition d'équipements toujours plus performants dotés d'avancées technologiques innovantes, qui nécessitent des concepts d'emploi toujours plus intégrateurs. Préparer le futur se conjugue plus que jamais au présent, avec une difficulté de taille : concilier l'acquisition de matériels pour vingt ou trente ans, avec des technologies très évolutives sur une échelle de deux ou trois ans...

Cette modernisation a pour objectif majeur de mettre en œuvre le concept de combat collaboratif, concept qui assure à celui qui le domine la capacité de manœuvrer de façon coordonnée, en partageant non seulement l'information, mais aussi les objectifs. Son architecture repose sur une connectivité accrue, s'appuyant sur une large utilisation du spectre fréquentiel, permettant finalement un partage de situation tactique en temps réel et donc offrant une boucle décisionnelle raccourcie.

L'armée de Terre, la Marine nationale et l'armée de l'Air ont chacune désormais exprimé le besoin de nouvelles capacités militaires, aptes à agir en véritables systèmes de systèmes capables de partager en inter milieux et en synergie avec nos alliés.

Dès lors, l'emploi optimisé du spectre fréquentiel, qui porte l'essentiel des capacités liées aux systèmes d'information et de communication, mais aussi des capteurs d'information, est la solution pour disposer d'une connectivité accrue. Il permet de fournir une représentation de la situation militaire en temps réel et de disposer de moyens de détection toujours plus performants, afin de raccourcir la boucle de décision, mais induisant *a contrario* une dépendance accrue et nécessitant par conséquent une résilience encore plus grande.

## **Des fréquences pour une connectivité accrue...**

Dans les scénarios d'emploi actuels, les équipements militaires et même les systèmes d'armes employés de manière isolée deviennent de plus en plus rares.

Au contraire, ils doivent mettre en œuvre le modèle de combat collaboratif, s'appuyant sur des plateformes coopérant entre elles par l'intermédiaire d'une connectivité renforcée, qui permettent de parvenir à un système global dont la performance dépasse la simple somme de leurs uniques performances.

Ainsi, l'un des programmes d'armement majeurs de l'armée de Terre, dénommé SCORPION, a pour objet de moderniser les capacités de combat médianes des unités de niveau régimentaire en rénovant ou en développant certains matériels, et surtout en améliorant également les échanges de commandement grâce à un nouveau système d'information.

SCORPION vise à renouveler, depuis fin 2018, les capacités du combat de contact valorisé par l'information, autrement désigné par « infovalorisé », en s'interconnectant aux équipements principaux déjà existants mais modernisés (comme le char Leclerc) et aux deux nouvelles plateformes : le *Véhicule Blindé Multi Rôle* (VBMR) GRIFFON et l'*Engin blindé de Reconnaissance et de Combat* (EBRC) JAGUAR.



Le VBMR GRIFFON  
P. Segrette ©DICOD.

Ainsi, pour protéger les populations et neutraliser l'ennemi, il faut pouvoir déployer des forces mobiles et agiles, aux capacités d'observation et d'action performantes, lorsqu'il s'agit de manœuvrer dans des zones étendues ou, au contraire, dans des terrains très compartimentés voire urbains. En mettant les forces en réseau, SCORPION permet de garantir ce maillage et le partage de l'information nécessaires pour maîtriser la situation. Il apporte aussi la capacité de frapper à l'endroit et au moment voulus, avec l'intensité adaptée, l'effecteur étant celui produisant l'effet attendu, mais n'étant pas forcément celui qui capte l'information.

Ce combat infovalorisé est fondé sur le Système d'Information du Combat SCORPION (SICS), couplé à la radio de nouvelle génération CONTACT, qui succède au poste radio à évacuation de fréquences PR4G, et à la station sol satellitaire SYRACUSE IV. Cette dernière permettra de mettre à disposition des forces des capacités de communication par satellite améliorées en matière de débit, de disponibilité et de résistance aux menaces.

Le programme d'armement CONTACT offrira aux forces des radios logicielles tirant parti des bandes VHF et UHF, de manière transparente pour l'utilisateur et qui seront donc plus capacitives que la génération actuelle. Partageant un cœur radio commun, les radios tactiques terrestres, aéronautiques et navales de CONTACT offriront un débit accru, plus de sécurité et une plus grande interopérabilité. Contrairement aux réseaux cellulaires et *Private Mobile Radiocommunications*



(PMR), la radio CONTACT n'utilise pas d'infrastructure de communication figée, puisque chaque poste radio est capable de relayer automatiquement l'information au sein d'un réseau résilient et auto-adaptatif.

Couplé au système d'information SICS, le nouveau poste radio CONTACT permettra d'accélérer l'échange de données tactiques, de suivre des forces armées amies (*blue force tracking*) et d'améliorer les capacités de commandement de toutes les unités. Les réseaux de la Marine devront nécessairement être interconnectés au SICS.

Enfin, étant déjà interopérable avec les protocoles radio standardisés et fondé sur une architecture radio ouverte, CONTACT permettra également d'améliorer de façon décisive les déploiements interalliés, notamment grâce au futur standard européen *European Secured Software defined Radio* (ESSOR). Dans le cadre de cette architecture de référence ESSOR, compatible avec le standard américain *Software Communication Architecture* (SCA), une forme d'onde à haut débit de coalition a été développée pour devenir un nouveau standard. Les radios logicielles et formes d'onde développées sur ces bases permettront de répondre aux nouveaux besoins à très forte plus-value opérationnelle exprimés par les forces armées en matière de numérisation du champ de bataille, de montée en puissance des applications de type *Computerized Command, Control, Communications and Intelligence* (C4I), de besoin d'échange d'images et de vidéos...



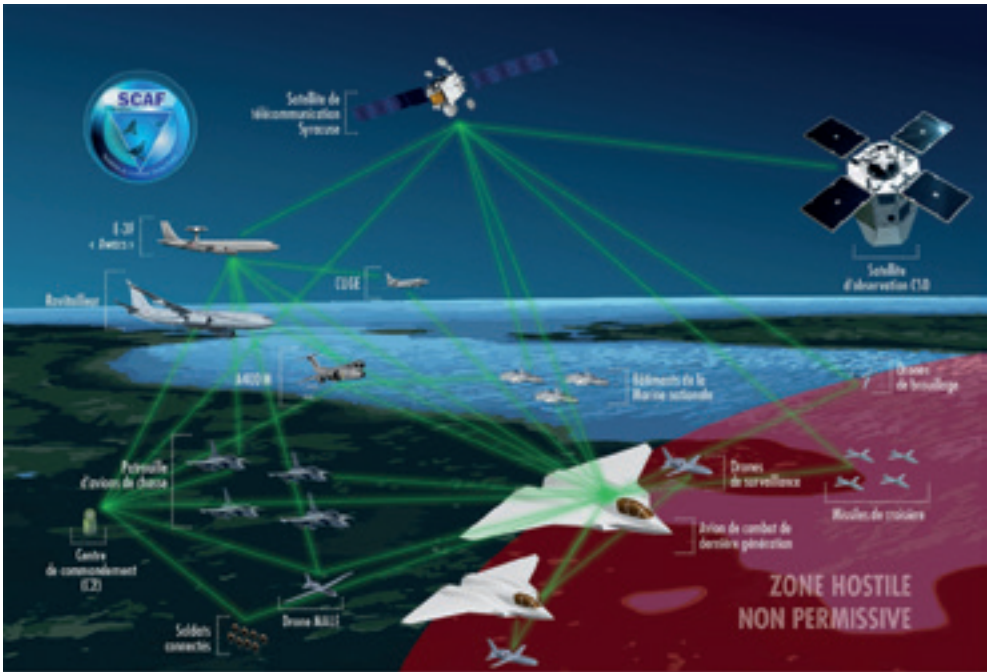
L'EBRC JAGUAR  
A. Thomas-Trophime ©DICOD.

Les armées utiliseront aussi le programme de communications satellitaires *Système de radiocommunication utilisant un satellite de quatrième génération* (Syracuse IV), dont la Direction générale de l'Armement (DGA) a notifié en 2019 le contrat de conception et réalisation du segment sol, pour une livraison des premières stations en 2021.

Les communications longue distance sécurisées et résistantes au brouillage sont un maillon essentiel pour l'autonomie d'appréciation, de planification et de commandement des forces armées, entre la métropole et les théâtres d'opération, ou au sein des théâtres.

Le système Syracuse IV regroupe le segment spatial (satellites géostationnaires) et des moyens sol destinés aux utilisateurs (terminaux) et à l'opérateur des réseaux militaires (stations de raccordement aux réseaux terrestres, centres de gestion).

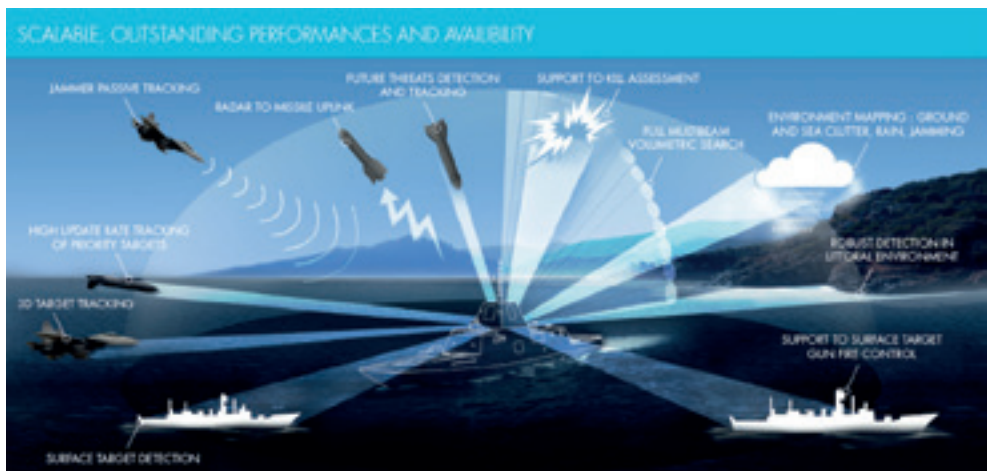
Conçus pour faire face aux menaces de type cyber, brouillage, interception et impulsion électromagnétiques, reconfigurables en vol, ils permettent une augmentation du débit disponible en bandes X et Ka. Ce programme permettra de mettre à disposition des forces des capacités de communication améliorées en matière de débit, de disponibilité et de résistance aux menaces.



Le concept d'emploi du SCAF  
©SIRPA Air.

L'armée de l'Air, confrontée aux mêmes besoins de connectivité permanente, a aussi lancé une initiative pour la capacité à les employer collaborativement avec plus d'efficacité que nos adversaires potentiels : l'opération de cohérence CONNECT@AERO. Son but :

- adapter le système de combat aérien aux menaces 2025-35 et préparer le Système de Combat aérien du Futur (SCAF) de 2040 ;
- proposer une démarche capacitaire cohérente et incrémentale.



Le combat collaboratif aéronaval  
©Thalès.



Pour la Marine, la fulgurance du combat aéronaval futur exige également une connectivité renouvelée des forces. Miroir des démarches SCORPION et CONNECT@AERO des milieux terrestre et aérien, la feuille de route AXON@V pose les bases d'une vision de long terme pour une connectivité aéronavale ambitieuse.

Cette trajectoire prend en compte la contestation grandissante des espaces et les menaces émergentes qui induisent une réduction des délais de réaction. Pour ce faire, le combat collaboratif exigera du très haut débit et une faible latence. Aussi faudra-t-il explorer le potentiel des constellations de satellites *Medium Earth Orbit/Low Earth Orbit* (MEO/LEO), ou encore, pour les services requérant une garantie de résilience moindre au combat, les plateformes stratosphériques (*High Altitude Platform Stations*, HAPS). Pour des débits plus faibles, la HF large bande apportera un service de *Command and control* (C2) résilient.

L'objectif est clairement de gommer les discontinuités terre-mer et la différence de connectivité entre grands bâtiments ultra-connectés et petits bateaux disposant aujourd'hui de capacités moindres.

### **... qui permettent de fournir une représentation de la situation en temps réel...**

Dans les combats de basse comme de haute intensité, la maîtrise des espaces (y compris numérique) est un facteur-clé pour conserver liberté d'action et initiative, et donc l'ascendant sur l'adversaire.

Nous avons vu précédemment que le SICS offre une capacité de combat collaboratif en partageant de façon quasi instantanée, *via* les fréquences HF/VHF/UHF et X/Ka en *satellites de communication* (SATCOM), les données recueillies par l'ensemble des plateformes SCORPION.

Cependant, le soldat du futur s'appuiera aussi sur des robots pour la reconnaissance et la défense de son périmètre (tirs de roquettes...). Dans cette optique, le ministère des Armées a déjà expérimenté un système roulant motorisé destiné à effectuer différents types de déplacements en mobilité autonome, c'est-à-dire sans supervision d'un opérateur. Pour cela, le système met en œuvre un certain nombre de capteurs et de moyens lui permettant d'assurer ces fonctionnalités, avec des besoins spectraux tels que du contrôle/commande ou du radar véhicule en bande S et en bande W.



Le FELIN  
J.-J. Chatard ©DICOD.

Bénéficiant également de la convergence des technologies militaires et civiles, la logistique soutenant le soldat s'appuiera sur une représentation temps réel des parcs, des stocks et des consommations (munitions, tenues...), grâce aux capteurs RFID (*Radio frequency identification*).

Au même titre que tous les satellites d'observation, un nouveau moyen utilisant largement le spectre fréquentiel est aussi devenu essentiel pour cette représentation de situation en temps réel : le drone. Il a l'avantage d'accomplir des missions dans des environnements difficiles, lorsque la suprématie aérienne n'est pas assurée, ou en cas de menace nucléaire, bactériologique ou chimique.

Les éléments qui caractérisent les drones sont notamment leur mission, leur autonomie, leur altitude de vol, leur rayon d'action. Les différentes missions des drones militaires français comportent la surveillance, la reconnaissance, le relais de communication, le désignateur de cible et demain l'appui feu.

Pour pouvoir s'insérer dans la circulation aérienne civile, le système doit respecter la réglementation de l'Aviation civile, qui est fondée sur les règles de la Circulation aérienne générale fixées par l'Organisation de l'Aviation civile internationale au niveau international.

Les drones utilisent des fréquences pour le télé-pilotage mais pas uniquement. Pour leur fonctionnement, les systèmes de drones nécessitent différents types de liaisons :

- celles liées à la navigation de l'aéronef, qui comprennent non seulement des liaisons nécessaires pour le télé-pilotage mais également un système d'altimétrie, un transpondeur et, potentiellement, un système d'aide à l'atterrissage et au décollage automatique, une radio pour communiquer avec le contrôle aérien et, prochainement, un système d'anticollision ;
- celles relatives à la charge utile : utilisation de radar, de capteurs de détection, de système de relais de communication...

L'accès au spectre des fréquences pour l'utilisation des drones est donc primordial et toutes les bandes peuvent être concernées.



Le SDT Patroller  
P. de Poulpiquet ©DICOD.

Indépendamment des contraintes techniques, il est indispensable de garantir la fiabilité des liaisons entre le centre de contrôle et le drone dans le cadre de la sécurité des vols. L'aspect spectral est donc extrêmement prégnant, car il faut pouvoir garantir un débit suffisant, la disponibilité de la liaison, quelles que soient la portée et la résistance aux interférences.

Des études pour un futur système Moyenne Altitude et Longue Endurance (MALE) européen s'appuyant sur les bandes Ka et/ou Ku ont été menées en coopération avec l'Allemagne, l'Italie et l'Espagne.

Les plateformes mobiles, nécessaires pour une représentation en temps réel de la situation tactique, sont de plus en plus petites : le projet porté par l'Agence de l'Innovation de la Défense (AID) vise à mettre au point une antenne SATCOM de 3 à 5 cm d'épaisseur, « agile, intelligente, reconfigurable électroniquement », sans être trop coûteuse. Ainsi, en recouvrant un mur de « métasurfaces », il est possible de « bloquer les ondes qui s'y réfléchissent, de les concentrer ou de les orienter dans une direction précise pour adapter leur comportement à une situation donnée ». La solution proposée consiste à contrôler un champ électromagnétique dans une petite cavité chaotique semi-ouverte. Les travaux en cours visent plus précisément à revêtir une ou plusieurs parties de la surface interne de la cavité par une méta-surface pilotée électroniquement. « Le but est de contrôler les conditions aux limites dans la cavité et de distribuer les champs dans l'ouverture de la cavité, de manière à assurer un dépointage directif vers le satellite », explique l'agence.



La maquette SCAF au Salon du Bourget 2019

J.-L. Brunet ©Armée de l'Air.

Le SCAF, quant à lui, s'appuiera sur les gammes de fréquences HF/VHF/UHF et SATCOM (Ka et/ou Ku) ; en particulier, la liaison de données inter-plateformes dite *intraflight* furtive du *Next Generation Weapon System* (NGWS) reposera probablement sur une forme d'onde en bande haute.

Ce partage de situation en temps réel nécessite également des capteurs performants.

### **... et des moyens de détection toujours plus performants...**

Les armées s'inscrivent aussi dans une logique de modernisation continue de nos capteurs ; par exemple, la défense aérienne devrait intégrer une nouvelle génération de drones, mais aussi les nouveaux radars issus de la famille Ground Fire en bande S, tout en continuant à mettre en œuvre un large panel de radars en bandes L, C, X et Ku.

La famille Ground Fire, entièrement numérique, offre des performances inédites dans le cadre de missions de surveillance et de défense aérienne, y compris anti-missile balistique, avec une capacité à conduire les missiles de la famille Aster dans des environnements hostiles (encombrement, pluie,

brouillage, etc.). Très compacts et déployables en moins de quinze minutes, les Ground Fire seront extrêmement mobiles et aérotransportables. Ils seront constitués d'une antenne mobile montée sur un camion et auront une capacité à opérer sur n'importe quel terrain.

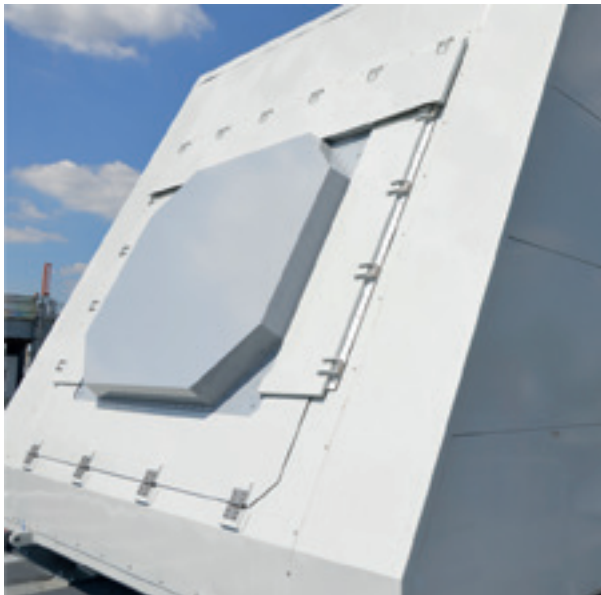
La famille du Ground Fire est identique à celle du Sea Fire, la version navale, toujours en bande S, qui équipera les Frégates de Défense et d'Intervention (FDI).

Sea Fire pourra aussi gérer la conduite de tirs de missiles si une menace se présente sur mer ou dans les airs. Ce radar n'a rien à voir avec les systèmes rotatifs trônant sur les navires de guerre de la Marine nationale. Le Sea Fire est un élément fixe installé dans le mât du navire. Sur chacun des quatre panneaux, des capteurs analysent l'environnement en 3D pour détecter tout ce qui flotte, vole ou roule.

Le Sea Fire est également conçu pour détecter et cibler les avions hyper véloces.

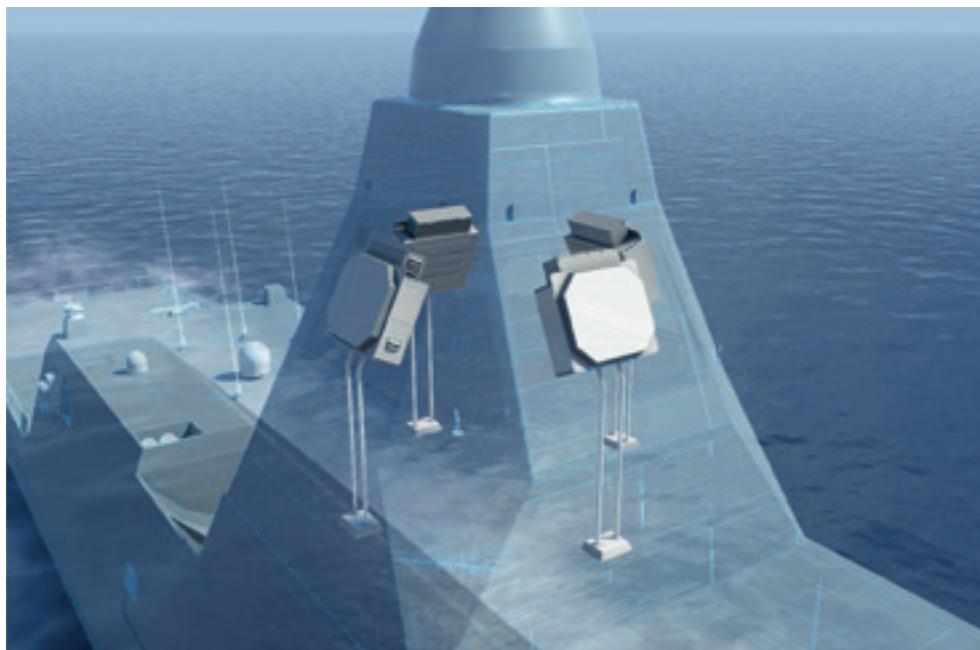
Mais surtout, ce radar est conçu pour s'adapter au fur et à mesure de l'évolution technologique des équipements militaires. C'est un « radar logiciel » dont les capacités peuvent être mises à jour sans modification du matériel.

Dans le cadre de la sauvegarde maritime et de l'action de l'Etat en mer (narcotrafic ou trafic d'êtres humains...), le projet d'armement AVSIMAR prévoit aussi des Systèmes de Drone Aérien pour la Marine (SDAM) ou tactiques, mais aussi des drones embarqués *Vertical Take-off and Landing Aircraft* (VTOL) légers sur Patrouilleurs Outre-Mer et VTOL légers/ lourds sur Patrouilleurs océaniques.



Le panneau du radar Sea Fire 500  
©Thalès.

Ainsi, fort de cette capacité de détection qui fait l'objet d'efforts sensibles en matière de recherche et développement, le cycle des processus qui permettent aux chefs de décider et agir (autrement appelé boucle de décision) sera d'autant plus réduit.



Un visuel de l'installation SF500 sur frégate  
©Thalès.

### **... afin de raccourcir la boucle de décision, sous réserve d'une résilience encore plus grande**

« Les nouveaux véhicules Griffon sont capables de collecter toutes les données de leur environnement et de les transformer en information de combat, dotés d'outils d'aide à la décision face aux menaces. Ils sont à la pointe du combat collaboratif », a précisé Mme Florence Parly lors de la cérémonie de livraison des premiers exemplaires sur le site de Nexter à Satory le 4 juillet 2019.

Face à la furtivité et à la montée en gamme des adversaires dans le domaine aérien, les axes principaux de raccourcissement de cette boucle décisionnelle sont :

- la détection collaborative (affinement de la *Common Operational Picture*) par répartition et orientation coordonnées des capteurs passifs, radars, optroniques ;
- l'engagement collaboratif : guidage missile par répartition et orientation coordonnées des capteurs et des effecteurs ;
- le combat collaboratif défensif et de survie (manœuvres, brouillage, leurrage, tirs).

Cette boucle décisionnelle optimisée exige :

- le décloisonnement de l'usage des capteurs et effecteurs ;
- un réseau local autonome, discret et robuste ;
- la supervision locale, en temps réel, des moyens (*Interaction Homme Système* adaptée) ;
- un haut niveau d'interopérabilité.

Le C2 centralisé et distribué permettra le partage de l'idée de manœuvre (efforts) et l'accélération de la capacité de frappe. La bulle de combat haute intensité bénéficiera de l'apport de la radio très haut débit / antennes directives et du relais drone. La bande harmonisée OTAN 225-400 MHz, très utilisée par les communications UHF et des applications aéronautiques, maritimes et satellitaires, notamment pour le contrôle de l'espace aérien, y joue un rôle majeur.





Le concept Connect@aero

Coll. Faury et Ledoux ©Bureau des plans de l'armée de l'Air.

Dans des espaces de plus en plus contestés, où se développent des menaces telles que les missiles hypervéloces, la Marine développe elle aussi une stratégie polymorphe de réduction de la boucle décisionnelle pour conserver la liberté d'action et l'initiative des forces navales à la mer. Cela suppose une rupture technologique dans la performance des senseurs, l'extension des capacités de la chaîne d'engagement missile et le *Combat collaboratif naval* (CCN) pour réduire les délais de réaction « détection, classification, engagement ».

On distingue ainsi trois temporalités différentes dans la connectivité navale ; des technologies complémentaires pourront apporter les services attendus en termes de débit / latence / résilience :

- celle du temps immédiat pour le combat collaboratif face à la menace hyper-véloc (latence très faible – très haut débit – grande résilience) :
  - Bulle *Line Of Sight* (LOS) très haut débit, antennes directives – incrément naval des programmes radios relatifs aux hautes fréquences, relais drone / avion / HAPS ;
- celle du temps réel ou semi-réel pour la conduite des opérations : C2 de la bulle aéro-maritime :
  - SATCOM avec haut débit, satellite MEO/LEO avec capacité de transmission optique vers satellite géostationnaire (GEO) ;
- celle du temps différé et du temps long :
  - Capacité SATCOM GEO plus classique avec du haut débit, mais avec une latence plus importante.

Il ne faut pas oublier pour autant la HF, qui est un formidable moyen de résilience au profit du SATCOM au même titre que la diversification du bouquet satellite : MEO ou LEO. A ce titre, la nouvelle technologie HF XL donnera accès à de la large bande sur IP (messagerie instantanée ou *chat*), malgré la saturation du spectre de fréquences, en utilisant simultanément plusieurs canaux HF disjoints, permettant ainsi d'assurer une forte disponibilité de la transmission haut débit.

La boucle décisionnelle verra donc sa durée réduite, grâce à une harmonisation des systèmes de communication, des normes d'échanges et des formes d'ondes nécessaires. Enfin, le développement d'une maîtrise dynamique et adaptative du spectre électromagnétique contribuera aussi à cette évolution.

Pourtant, le ministère des Armées, qui est l'un des affectataires à qui le Tableau national de Répartition des Bandes de Fréquences (TNRBF) attribue le plus d'usages primaires ou prioritaires de fréquences, voit ses attributions sans cesse diminuer sous les pressions des nouvelles technologies (téléphonie mobile, par exemple) et des intérêts non régaliens. L'enjeu pour les armées est de disposer du spectre en quantité et en qualité strictement suffisantes pour maintenir une cohérence entre les moyens opérationnels dévolus aux armées et les missions qui lui sont confiées.

Dans ce contexte de grande dépendance aux fréquences, les brouilleurs constituent forcément une menace tangible et permanente. L'utilisation d'un brouilleur est une action volontaire visant à neutraliser dans un secteur les systèmes utilisant des fréquences. Ainsi, un drone qui disposerait d'une connectivité 3G/4G et wifi est vulnérable sur un théâtre d'opération au titre de ces deux types de connectivité.

Pour faire face à cette menace, les armées utilisent des systèmes résilients aux brouillages (qui recourent par exemple au saut de fréquences). Par ailleurs, une évaluation de la résistance au brouillage de chaque système pendant son développement est réalisée. Enfin, les armées s'entraînent désormais sous environnement électromagnétique contesté.

Toutefois, les brouilleurs peuvent contribuer également à la protection des forces, comme c'est le cas contre les engins explosifs improvisés ou *Improvised Explosive Devices* (IED).

Une procédure de coordination existe aussi sur le territoire national, permettant l'emploi opérationnel des brouilleurs pour les besoins de la défense, notamment dans la lutte contre les drones malveillants.

En synthèse, le ministère des Armées entame clairement désormais une manœuvre délicate : disposer de systèmes d'armes futures qui soient à la fois collaboratifs, agiles et résilients, les rendant toujours plus dépendants des fréquences, malgré un spectre fréquentiel de plus en plus contraint ! Pour faire face à des besoins en largeur de bande toujours croissants, le ministère des Armées devra miser sur l'innovation pour la gestion du spectre et sur l'amélioration des performances des systèmes radios (plus efficaces spectralement).

Il est ainsi patent que la clé de la réussite réside dans la capacité du régulateur national (l'Agence nationale des Fréquences) à satisfaire au mieux le besoin en fréquences exprimé par le ministère des Armées, le spectre apparaissant ainsi comme un bien certes immatériel, mais ô combien stratégique.



# La couche physique : un élément-clé des réseaux sans fil

Par **Philippe CIBLAT** et **Alain SIBILLE**

Télécom Paris, Institut Polytechnique de Paris

## Introduction

Le succès des réseaux sans fil depuis les années 1990 repose largement sur la technologie numérique et sur le concept de réseau cellulaire, qui permet une utilisation efficace de la ressource spectrale tenant compte des lois fondamentales de l'électromagnétisme. Cette utilisation a énormément progressé depuis quarante ans, grâce à la mise à disposition de plus en plus de spectre, en relation avec une grande diversification des usages.

Le présent article se concentre sur la « couche physique » du « modèle OSI » [ROLI2016], modèle sur lequel l'architecture des réseaux est fondée depuis les années 1970. La couche physique s'intéresse à la transmission et à l'émission des signaux issus du monde physique dans le milieu de propagation au travers d'une antenne, ainsi qu'à l'opération inverse en réception. Les caractéristiques de la couche physique sont en effet déterminantes pour la performance des réseaux sans fil, conditionnant la couverture des territoires comme la capacité à assurer un service donné.

## Les fondamentaux des communications radio

Les bases de la théorie des communications ont été posées en 1949 par Claude Shannon dans *The Mathematical Theory of Communication* [SHAN1949]. Cet ouvrage contient en particulier la formule reliant la capacité  $C$  (en bits/s) au rapport entre la puissance reçue  $P_r$  et la puissance de bruit  $P_{\text{bruit}}$  (où  $P_{\text{bruit}} = B \cdot N_0$  dans le cas du bruit thermique fondamental de densité spectrale de puissance  $N_0$ ), pour une largeur de bande de fréquences  $B$  donnée :

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_r}{P_{\text{bruit}}} \right)$$

Sauf en ultra large bande, cette formule fait apparaître **une quasi-proportionnalité entre la capacité et la largeur de bande**, ce qui explique pourquoi, depuis plusieurs décennies, la tendance générale est de dégager du spectre disponible pour les réseaux sans fil. La deuxième observation essentielle est que la capacité ne varie que de façon logarithmique avec  $P_r$ , ce qui veut dire qu'il est vain d'augmenter énormément la puissance transmise  $P_t$  (donc aussi la puissance reçue), mais aussi, en sens inverse, qu'une diminution importante de la puissance ne veut pas dire une diminution énorme de la capacité. C'est lorsqu'on est « en bord de cellule » que la capacité s'effondre et la qualité de la liaison également.

On arrive maintenant à l'équation des télécommunications, reliant  $P_r$  à  $P_t$ , pour une fréquence  $F$ , une distance  $D$  et des antennes de « gain »  $G_r$  et  $G_t$ ,  $c$  étant la vitesse de la lumière.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r \cdot G_t \cdot \left( \frac{c}{4\pi DF} \right)^2$$

On remarque que  $P_r$  varie en  $1/D^2$ , ce qui n'est pas une décroissance très rapide compte tenu de la lente variation de la capacité avec  $P_r$ .

Ces deux formules pointent vers les problématiques-clés des communications sans fil.

Tout d'abord il faut noter que  $C$  n'est pas un débit, mais le **débit maximal possible pour une communication sans erreur**. Il faut donc approcher au mieux « l'efficacité spectrale » réelle (en bits/s/Hz) de sa valeur théorique maximale  $C/B$ , de façon à exploiter au mieux cette ressource naturelle rare. Cela passe par la manipulation des signaux binaires et leur émission dans l'air, puis l'opération inverse. Or, compte tenu du bruit, mais aussi des interférences d'origines diverses qui s'y ajoutent, les signaux binaires naturellement reçus sont entachés d'erreurs occasionnelles. Plutôt que d'augmenter sans fin la puissance, **il est bien préférable d'utiliser des « codes correcteurs »** qui savent détecter et traiter ces erreurs. Ce qu'on appelle « codage canal » fait ainsi partie des grands domaines de recherches en communications, depuis Shannon [SHAN1949]. Il est aussi nécessaire de bien répartir les bits à transmettre sur les diverses fréquences à l'intérieur de la bande  $B$ , ce qui fait l'objet de la **modulation, ou encore du choix de la forme d'onde**.



Mesures 5G réalisées à Mérignac.

©ANFR

progrès réalisés dans les années 2000, se trouvent les systèmes multi-antennaires (« MIMO »), qui justement permettent d'effectuer ce pointage de façon très bien contrôlée électroniquement. C'est une des raisons de l'avènement du millimétrique pour la 5G.

Par ailleurs, entre l'antenne d'émission et celle de réception se situe le « milieu de propagation ». En espace libre c'est le vide, ou l'air en pratique, mais dans le contexte des réseaux sans fil il y a de nombreuses obstructions, à commencer par le sol mais aussi les bâtiments (en extérieur), et en intérieur tout ce que ce dernier peut contenir. La ligne droite n'est donc souvent pas possible

Une autre remarque très importante est que  $P_r$  **diminue avec la fréquence comme  $1/F^2$** . Cette variation est, pour le coup, très importante, elle signifie que lorsque l'on passe de 900 MHz (GSM) à 28 GHz (fréquence du domaine « millimétrique » prévue pour la 5G), la réduction est de presque 1 000 ! L'explication physique est très simple : plus on monte en fréquence, plus une antenne est petite (inversement proportionnelle à la fréquence), sa « surface de captation » varie donc comme  $1/F^2$ . **Cette réduction peut être contrebalancée en rendant l'antenne directive**, c'est-à-dire en la faisant « écouter » dans une direction particulière plutôt que dans toutes les directions. Il en résulte un gain de réception  $G_r$  qui augmente comme l'inverse de l'angle solide d'écoute. Par exemple, si le secteur angulaire spécifié est  $10^\circ$  en azimut et  $6^\circ$  en élévation, on récupère un peu plus que ce facteur 1 000. De plus, la même approche peut être appliquée en émission pour récupérer du gain  $G_p$ , au prix dans les deux cas d'une nécessité de pointer les antennes dans les bonnes directions. En fait, parmi les

pour les ondes transmises, et la communication doit souvent tirer bénéfice des réflexions (murs, mobilier...) ou de la diffraction (par les bords des obstructions). Cette dernière se produit plus facilement à basse qu'à haute fréquence, domaine pour lequel l'absorption est également souvent plus forte. Il en résulte que **dans le domaine millimétrique, les obstacles ont un impact beaucoup plus gênant qu'en dessous de 6 GHz** par exemple, ce qui tend à réduire fortement la portée de la liaison radio.

Enfin, une dernière problématique importante est celle de la temporalité. En effet lorsque l'émetteur ou le récepteur se déplace, ou lorsque l'environnement de propagation fluctue fortement, on est dans le cas d'un système variant dans le temps dont le traitement doit être bien pris en compte dans la conception de la couche physique. C'est notamment plus difficile lorsque ces variations sont très rapides (exemple : TGV) ou aux fréquences élevées, ce qu'on qualifie de « Doppler » introduisant alors un mélange entre signaux qu'il faut impérativement combattre.

## Les grandes évolutions de la couche physique depuis vingt ans

Bien que développé dans les années 1980 et largement utilisé dans les réseaux locaux type WIFI, l'**OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)** n'est utilisé dans les réseaux cellulaires que depuis la 4G. Cette technique de modulation, aujourd'hui dominante, permet de gérer facilement l'interférence entre symboles numériques créée par les rebonds du signal sur les obstacles. Elle est aussi couplée à l'accès pour de multiples utilisateurs. Jusqu'à présent, cet accès multiple a été fondé sur le principe d'orthogonalité permettant d'éviter ainsi les collisions internes à une cellule. Devant son efficacité, cette technique, avec quelques modifications mineures, est de nouveau présente dans la 5G.

Comme déjà évoqué, le MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) est une grande innovation des deux dernières décennies avec le double objectif de renforcer la fiabilité des liens par la multiplication des canaux de propagation (pourvu que les antennes soient suffisamment espacées, typiquement la longueur d'onde, ce qui est facile à réaliser au-delà du GHz) et d'augmenter fortement le débit puisque de nouveau plusieurs voies de communication sont alors utilisables en parallèle pour transmettre des données différentes. Un compromis, bien étudié dans la littérature, existe pour consacrer les voies supplémentaires soit à la fiabilité soit à l'augmentation du débit. Pour le mettre en œuvre, il convient de concevoir des codes spatio-temporels qui lient les données efficacement entre les antennes. On peut citer le code d'Alamouti, ou encore le code d'Or qui est une invention française. **Cette approche conduit naturellement au « MIMO massif »** lorsque le nombre d'antennes dépasse plusieurs dizaines. Elle permet d'augmenter fortement l'efficacité spectrale et donc de servir beaucoup plus d'utilisateurs. On peut aussi en profiter pour dédier certaines antennes à faire de la formation de voie (*beamforming*) pour focaliser l'énergie vers un utilisateur particulier. Ceci permet de procéder à de la réutilisation spectrale dans l'espace.

L'OFDMA (OFDM couplé à un accès multiple orthogonal) permet d'éviter l'interférence intracellulaire. En revanche, afin d'utiliser au mieux les ressources, les cellules utilisent depuis la 3G les mêmes fréquences et donc interfèrent entre elles, surtout à leur frontière. Par conséquent, les utilisateurs en bord de cellule peuvent subir de fortes dégradations de leur transmission. Pour y remédier, **une idée est de faire collaborer les stations de base**. C'est une grande innovation, notamment parce qu'elle dépasse l'organisation OSI classique. En effet, les couches supérieures du réseau doivent alors être mises à contribution pour que les couches physiques des deux stations de base puissent se mettre d'accord. Les techniques à utiliser sont assez différentes suivant le niveau de coopération autorisé et le type de données échangées. Si les stations de base partagent les flux de données, on aboutit au paradigme de « MIMO virtuel », pour lequel les antennes ne sont plus colocalisées. Ceci met à rude épreuve le réseau de cœur, puisque les données d'un

utilisateur doivent arriver à plusieurs stations de base simultanément. Si celles-ci ne partagent que des informations sur les canaux de propagation (ce qui est encore compliqué lorsque les deux sens de communication n'utilisent pas les mêmes fréquences), alors seulement un accord sur les puissances ou les sous-bandes utilisées est possible, aboutissant à un moindre bénéfice de cette technique. Ces solutions, déjà considérées pour la 4G mais en pratique peu utilisées, restent pertinentes pour la 5G, avec une facilitation grâce au mode TDD (*Time Division Duplex*, qui permet d'utiliser la même fréquence dans les deux sens).

Enfin, en ce qui concerne les codes correcteur d'erreur, mentionnés plus haut, les grandes avancées théoriques des années 1990 (« turbo-codes », autre invention française, codes LDPC pour *Low Density Parity Check*) en ont vu l'application dans les années 2000 dans tous les systèmes pratiques. Ceci a permis de se rapprocher très fortement de la limite fondamentale des communications point-à-point, donnée par la formule de Shannon [SHAN1949].

## Les développements futurs en émergence

Tout d'abord, il convient de mentionner que **les systèmes de communication doivent répondre à de plus en plus d'applications ayant des qualités de service différentes** (soit ultra-haut débit, soit très faible latence, soit très économe en énergie...). Bref, chaque système ou norme doit être polyvalent et donc on verra de plus en plus, au sein d'une même norme, des gammes d'outils techniques et de fréquences très variées.

Particulièrement, en termes de bande de fréquence, il est clair que les bandes millimétriques (de 6 GHz à 60 GHz) seront prochainement mises à contribution. **Ces fréquences très élevées demandent de revoir de nombreux principes et études antérieures** car les conditions de propagation sont différentes, les récepteurs devant notamment s'appuyer sur des technologies hybrides analogique-numérique, plus réalistes que le tout-numérique à des fréquences aussi élevées.

Comme nous l'avons énoncé dans la section précédente, la coordination entre points d'accès et même entre utilisateurs doit être renforcée, notamment car les systèmes sont de plus en plus hétérogènes, avec différentes échelles de cellules (pico-, nano-, petites, micro-, macro-...), voire des communications appareil-à-appareil (*device-to-device*) ne passant pas par les stations de base, bien qu'avec leur accord.

Nous nous proposons maintenant d'exposer, de manière non exhaustive, certains problèmes et solutions que le réseau rencontre de manière croissante, étant donné les nouvelles qualités de service exigées par certaines applications :

- L'accès multiple pour des systèmes avec de plus en plus d'utilisateurs pour une même cellule, quelle que soit la taille de celle-ci, oblige à revisiter les techniques non orthogonales abandonnées en raison de leur relative inefficacité à l'époque de la 3G due à une complexité ingérable à l'époque. Ce retour en grâce sous l'appellation NOMA (*Non Orthogonal Multiple Access*) est rempli de promesses **grâce aux avancées technologiques et algorithmiques récentes qui ont permis la gestion de l'interférence inter-cellules** et qui vont donc permettre une gestion de l'interférence intra-cellules plus efficace.
- Pour de nombreuses applications industrielles (robotique, véhicule autonome...) ou financières (commerce à haute fréquence), la latence déterminant le temps nécessaire pour recevoir une information est cruciale. Ceci implique d'utiliser des « paquets » de bits courts. Or il est connu que ces paquets n'ont pas le comportement annoncé par la théorie de Shannon [SHAN1949], puisqu'une hypothèse fondamentale repose sur des paquets suffisamment longs. Par conséquent, de nombreux résultats ou optimisations de systèmes obtenus à partir des

formules de Shannon sont à revisiter complètement. De plus, dans le cadre de la faible latence, les « en-têtes » de « signalisation » de ces paquets, qui ne portent pas les informations des utilisateurs mais sont nécessaires, consomment une ressource qui n'est plus négligeable. **Cela soulève le problème de la conception d'une signalisation à faible coût.** Enfin, les **besoins de synchronisation sont fortement augmentés.**

- Pour les flux vidéo, notamment ceux venant des sites de partage, de fournisseurs de produits vidéo ou de la télévision en différé, le trafic a augmenté de manière exponentielle et les mêmes informations sont véhiculées très souvent, ce qui induit un engorgement inefficace du réseau. Pour y remédier, **il faut décentraliser le stockage de ces données** pour qu'elles soient au plus près de l'utilisateur, par exemple au sein des stations de base ou d'autres utilisateurs. Une solution très étudiée consiste à identifier le statut des données tout au long de la transmission et du stockage. Un premier problème est de déterminer les fichiers à stocker et où et à quelle vitesse les rafraîchir, sachant que ces vidéos ont des popularités variant dans le temps et aussi des pertinences diminuant avec le temps. Un second problème est l'encodage intelligent des données, qui intervient plutôt dans le contexte de fichiers sauvegardés dans des serveurs distants décentralisés. En découpant intelligemment les fichiers et en les mettant aux endroits propices, **de nouvelles techniques de codage permettent de diminuer fortement les exigences sur le réseau.** Néanmoins, ces concepts sont récents et ils nécessitent encore de nombreux développements dans des configurations diverses, ainsi qu'un passage à la pratique avec des codes et des modulations réalistes.

## Conclusion

Le développement des réseaux sans fil n'est pas terminé, on commence ainsi à parler de réseaux 6G. Sachant qu'une génération dure environ dix ans, au moment où la génération N commence son déploiement, il faut penser à la génération N+1. Or, la couche physique reste centrale pour tous les réseaux sans fil, et même si les avancées des années 1990, avec l'atteinte de la « limite de Shannon » dans certaines conditions, voient progressivement leur mise en œuvre, la diversité des applications contemporaines rend les choses nettement plus complexes. Cela se retrouve dans l'hétérogénéité des réseaux, des besoins en qualité de service et dans les modes d'accès et l'optimisation du fonctionnement de ceux-ci. La « loi d'Edholm » [CHER2004], prévoyant une croissance exponentielle des débits très proche de la fameuse loi de Moore, s'appuie comme celle-ci sur de nombreuses innovations depuis plusieurs décennies, dont la concrétisation nécessite environ une décennie au moins pour passer du laboratoire à l'application commerciale. Cet article espère avoir montré la vivacité technologique, en partie relative à la couche physique, qui permet d'assurer cette croissance.

## Références

[ROLI2016] ROLIN P., TOUTAIN L., TEXIER G., PAUL O. & CHAUDET Cl. (2016), *Les réseaux : Principes fondamentaux*, Editions Lavoisier.

[CHER2004] CHERRY S., "Edholm's Law of Bandwidth », IEEE SPECTRUM, 1<sup>er</sup> juillet 2004, disponible sur <https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/edholms-law-of-bandwidth>

[SHAN1949] SHANNON C. et WEAVER W., *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, 1949.

# Les outils techniques de la gestion des fréquences

Par **Yann MAIGRON**  
ANFR

Selon le media ConsoGlobe, 29 Tera-Octets de données sont publiés chaque seconde dans le monde. Leur flux irrigue et relie l'ensemble des zones d'activités de notre planète. Parce qu'elles sont d'un emploi relativement aisé et qu'elles accompagnent nativement la mobilité, les fréquences radioélectriques constituent un support privilégié de ces flux. Elles sont donc indispensables à de nombreux secteurs : les communications, l'audiovisuel, les transports, l'énergie, l'industrie, la sécurité, la défense...

Le spectre radioélectrique est une ressource naturelle, à l'instar de l'eau, de l'énergie ou de la terre, mais contrairement à celles-ci, il est présent partout, en égales quantité et qualité, et n'est ni consommé ni dégradé lors de son utilisation. En un lieu donné, dès qu'elle n'est plus utilisée par un dispositif, une fréquence radioélectrique peut être instantanément réutilisée. Les fréquences radioélectriques fonctionnent donc comme des catalyseurs d'activités. Pour autant, elles sont une ressource rare. Rare parce que l'utilisation simultanée et non contrôlée d'une même fréquence par plusieurs acteurs au même endroit peut créer des brouillages entre leurs services. Rare aussi parce qu'elles ne sont pas toutes dotées des mêmes qualités, notamment de propagation ou de capacité à transporter des quantités importantes d'informations. L'exploitation du spectre disponible est donc bien souvent exposée à la loi des rendements décroissants.

## Une multiplicité d'outils au service de la gestion des fréquences

Un emploi non encadré des fréquences peut conduire à la création de brouillages susceptibles de compromettre le fonctionnement des services de radiocommunications et de dégrader la valeur d'usage du spectre radioélectrique.

Un système de gouvernance reposant sur un cadre institutionnel à trois niveaux a été mis en place afin de définir les conditions et de mettre en œuvre les règles d'une gestion efficace du spectre : au niveau international le secteur des radiocommunications de l'Union internationale des Télécommunications (UIT-R), au niveau régional la Conférence européenne des Postes et Télécommunications (CEPT) pour l'Europe et, au niveau national, le gouvernement pour la France.

Sur un plan pratique, la gestion des fréquences fait appel à quatre grandes catégories d'outils : ① des corpus de règles et de normes internationales, régionales ou nationales précisant notamment les tableaux d'attribution des bandes de fréquences d'application obligatoire ainsi que les recommandations qui définissent les bonnes pratiques d'utilisation du spectre par les services de radiocommunication pour éviter les brouillages préjudiciables ; ② des procédures de coordination et d'enregistrement destinées à décider des attributions de droits d'usage aux parties requérantes (assignations ou allotissements) puis à garantir la protection de ces droits par leur enregistrement dans des fichiers de référence ; ③ des bases de données dans lesquelles sont enregistrés les droits d'usage ; ④ des outils techniques de planification et de gestion des assignations.



## **Les tableaux d’attribution des bandes de fréquences**

La solution générale retenue pour limiter les risques de brouillage a été de contingenter l’utilisation des bandes de fréquences et d’en harmoniser l’usage autant que nécessaire. Un double contingentement a ainsi été mis en place.

Au niveau international, l’UIT a divisé la planète en trois grandes zones géographiques ou « régions ». A travers le règlement des radiocommunications (RR) elle répartit, sur chacune d’elles, les bandes de fréquences du spectre radioélectrique entre trente-neuf services de radiocommunication et elle précise les règles relatives à leur utilisation.

Au niveau national, l’Etat français affecte, par des décisions périodiques, l’ensemble du spectre entre onze affectataires de premier rang dont neuf entités gouvernementales et deux autorités indépendantes, l’ARCEP et le CSA. Le résultat de cette répartition est le tableau national de répartition des bandes de fréquences (TNRBF) géré par l’Agence nationale des fréquences (ANFR) et signé par le Premier Ministre. Celui-ci précise, pour chaque bande de fréquences, le ou les services attribués en France et le ou les affectataires qui ont accès à ces services. Il fixe les droits et obligations des affectataires ainsi que les principales règles à appliquer pour la coordination et l’enregistrement des assignations de fréquences. Ce tableau, qui se fonde notamment sur les dispositions du RR, les accords internationaux signés par la France, certaines recommandations ou décisions de la CEPT et les accords nationaux conclus entre affectataires, constitue le document de référence pour la gestion nationale des fréquences. Il est complété par des notes qui spécifient les dispositions propres à l’utilisation des fréquences en France, notamment les modifications et adjonctions nécessaires à la gestion des bandes au niveau national, ainsi que par des annexes qui complètent ou précisent certaines règles générales d’attribution, notamment dans les bandes partagées par plusieurs affectataires. Le TNRBF est disponible en version PDF sur le site de l’ANFR<sup>(1)</sup>.

## **Les procédures et applications de coordination et d’enregistrement des droits d’usage du spectre**

La reconnaissance internationale des droits d’usages liés à l’assignation d’une fréquence ou à l’allotissement d’un canal est indispensable pour en assurer la protection juridique. Pour les services de terre, elle se matérialise par l’inscription de l’assignation au Fichier de Référence international des Fréquences (MIFR) ou par la modification des Plans. A cette fin, l’administration requérante adresse, pour chaque station ou groupe de stations concerné, une notification au Bureau des Radiocommunications (BR) de l’UIT-R selon les modalités détaillées dans le RR (Appendice 4). Ces notifications, regroupées par service, bandes de fréquences et régions concernées sont transmises au moyen d’une interface web sécurisée, WISFAT (Interface web pour la soumission des assignations et des allotissements de fréquences aux services de Terre). Des logiciels mis à disposition par l’UIT (TerRaNotices, TerRaNV) permettent de générer les fiches de notification et d’en contrôler la complétude avant leur soumission.

Le BR publie, toutes les deux semaines, *via* la Circulaire internationale d’information sur les fréquences pour les services de Terre (BRIFIC – services de Terre), les informations relatives aux notifications d’assignations et d’allotissements soumises par les administrations. Après contrôle de leur conformité aux dispositions du tableau d’attribution des bandes de fréquences et en l’absence d’objection de la part des administrations nationales, le BR les enregistre au MIFR ou dans les Plans mondiaux ou régionaux et les publie *via* la BRIFIC.

(1) <https://www.anfr.fr/gestion-des-frequences-sites/tnrbf/>



Au niveau national, la reconnaissance du droit d'usage d'une fréquence par un utilisateur, selon des conditions spécifiées, ainsi que sa protection juridique nécessitent l'assignation de cette fréquence, *i.e.* l'autorisation préalable et formelle de l'ensemble des affectataires concernés de la bande de fréquences et son enregistrement au Fichier national des fréquences. Toutes les demandes d'assignation et d'enregistrement doivent faire l'objet d'une procédure de coordination nationale appelée « procédure CAF », à l'exception des demandes relatives aux autorisations d'utilisation de fréquences délivrées par les affectataires bénéficiant d'un statut exclusif ou prioritaire dans la bande concernée qui bénéficient *de facto* d'un droit d'enregistrement. Dans le cas où l'émetteur utilisant cette fréquence dépasse un certain niveau de puissance (5 W à la date de rédaction de cet article), l'utilisateur doit également obtenir l'accord de l'ANFR ou, dans certains cas, son avis, pour l'implantation ou la modification de la station radioélectrique concernée avant de pouvoir se prévaloir de l'exercice effectif de son droit d'usage de la fréquence concernée. Cet accord est délivré à l'issue d'une procédure de coordination pour l'utilisation optimale des sites radioélectriques appelée procédure COMSIS.

La procédure de coordination nationale et d'enregistrement des assignations de fréquences au Fichier national des fréquences est gérée par l'ANFR. Elle s'appuie, en pratique, sur l'application FNF accessible par les affectataires *via* une interface web. Les demandes d'assignation ou d'allotissement relatives aux services de radiocommunication, à savoir les services de Terre, y compris le service de radiodiffusion, le service spatial (stations terriennes) et la radioastronomie, sont déposées sous forme de fichiers (XML, SGML...) dans une zone d'échange puis validées par les affectataires concernés. Après avoir passé les différents contrôles visant à en garantir la complétude et l'éligibilité, notamment au regard de leur conformité par rapport au TNRBF, les demandes sont publiées. Des fonctions de consultation, d'extraction et d'impression permettent aux affectataires d'y accéder. Ils disposent alors d'un délai de deux mois pour formuler leurs observations. Tous les mois, les demandes d'assignation n'ayant pas fait l'objet de commentaires dans les deux mois suivant leur publication sont réputées approuvées et sont enregistrées par l'application FNF dans la base de données du Fichier national des fréquences. L'application FNF permet également de générer les fichiers de notification, selon le format d'échange défini par le BR, pour demander l'enregistrement au MIFR des assignations qui ont été validées au niveau national et, le cas échéant, coordonnées selon les termes des accords internationaux signés par la France.

Aucune station radioélectrique de puissance supérieure à 5 W ne peut être mise en service en France avant d'avoir reçu un accord ou un avis de l'ANFR. Afin d'obtenir un accord d'implantation, les affectataires et les opérateurs envoient leurs dossiers de demande par le biais d'une télé-procédure et de l'application STATIONS associée à une base de données gérée par l'ANFR. Ces dossiers, contrôlés puis publiés chaque semaine dans une circulaire consultable *via* l'application STATIONS, sont étudiés sous un délai de quatre semaines par les affectataires et opérateurs concernés de manière à vérifier que les nouveaux émetteurs ne perturberont pas le fonctionnement de ceux qui sont déjà installés. L'ANFR analyse les avis avant de se prononcer et vérifie également que les dispositions réglementaires relatives à l'exposition du public aux rayonnements électromagnétiques sont respectées.

## **Les bases de données notariales**

Au niveau supranational, les données administratives et techniques relatives aux assignations bénéficiant d'un droit à protection sont inscrites au MIFR, géré par l'UIT-R. Cette base de données peut être requêtée *via* l'outil e-MIFR moyennant l'ouverture d'un compte auprès du BR (compte TIES). L'accès aux données du MIFR est également possible au travers de la consultation de la base de données des BRIFIC, *via* l'outil TerRaQ qui permet de lancer des requêtes sur cette base, ou d'un portail de consultation en ligne. Les BRIFIC bimensuelles peuvent, quant à elles,

être consultées directement sans installation de logiciels spécifiques à partir des DVD-ROM disponibles auprès du BR.

En France, deux bases de données dites *notariales* couvrent l'essentiel des informations relatives aux droits donnés aux affectataires et utilisateurs finaux en matière de gestion des fréquences sur le territoire national : le Fichier national des fréquences et la base STATIONS.

Le Fichier national des fréquences, développé sur une base Oracle, est géré par l'Agence nationale des Fréquences. Alimenté par l'application FNF dans le cadre de la procédure CAF, il récapitule l'ensemble des informations relatives aux assignations de fréquences attribuées par les affectataires, soit près de 450 000 assignations à fin 2019. A compter de leur enregistrement au Fichier national des fréquences, les assignations bénéficient d'un statut national et de l'antériorité, *i.e.* de la protection contre les brouillages préjudiciables vis-à-vis de toutes les assignations ultérieures présentées par d'autres affectataires. L'accès aux informations du Fichier national des fréquences est réservé aux affectataires au travers d'un éditeur de requêtes intégré à l'application FNF.

La base STATIONS récapitule l'ensemble des informations administratives et techniques relatives aux stations radioélectriques communiquées à l'ANFR dans le cadre de la procédure COMSIS. Développée sur une base Oracle, la base de données STATIONS est actualisée par l'application éponyme qui gère les demandes d'accord ou d'avis ainsi que les déclarations relatives à l'implantation d'installations radioélectriques sur le territoire national. L'accès en mode Extranet à la base Stations se fait par authentification et mot de passe et permet la consultation des projets d'installations (circulaires hebdomadaires) ainsi que des installations déclarées (stations de puissance inférieure à 5 W) ou ayant obtenu un accord ou un avis favorable de l'Agence (stations de puissance supérieure à 5 W), soit près de 80 000 sites radioélectriques fin 2019.

## **Les outils de planification et d'assignation de fréquences**

Ces outils, indispensables aux utilisateurs du spectre et aux affectataires, guident leurs choix d'architectures, et orientent la recherche de solutions intégrant à la fois les objectifs assignés aux systèmes déployés et les contraintes réglementaires. Développés en interne ou par customisation de progiciels du marché, ces outils intègrent différents modules (base de données, interfaces de visualisation, SIG, modules de calcul, interfaces d'échange avec les applications et bases de données standard (BRIFIC, FNF, STATION...)) et permettent de suivre les cycles de vie des licences, de calculer les redevances et de s'interfacer avec les systèmes de facturation, de réaliser des analyses techniques (couverture, CEM...) et une pré-planification des stations et réseaux, de rechercher des fréquences libres à partir d'un plan de fréquences donné...

## **Conclusion**

Pour réaliser son objectif de prévention des brouillages, la gestion des fréquences s'est dotée, tant au niveau supranational qu'au niveau national, d'outils pour stocker et partager les informations relatives aux droits d'usage accordés, identifier les ressources disponibles et coordonner leur attribution entre parties prenantes.

Avec la prolifération des nouveaux services et la croissance des besoins dans certaines bandes de fréquences, de nouveaux modes de gestion, plus dynamiques, seront vraisemblablement appelés à se développer et, avec eux, de nouveaux outils devront être conçus et mis en œuvre. L'IA, les bases de données adaptatives, l'*open data*, le *crowdsourcing* et les *blockchains* sont autant de technologies qui apporteront vraisemblablement, demain, des solutions techniques aux défis qu'imposera une gestion dynamique des fréquences.

# L'évolution de la télévision et de son usage des fréquences

Par Walid SAMI

Union européenne de radio-télévision (UER)

## Introduction

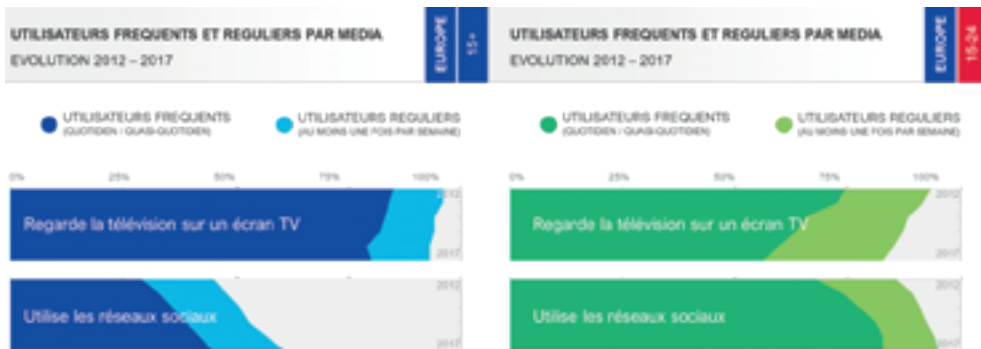
Cet article retrace les étapes majeures de l'évolution de la télévision en termes de modes d'usage, de diffusion et de distribution, d'offre de contenu et modèles économiques, et de régulation. Il examine en quoi cette évolution a affecté l'usage des fréquences pour la télévision, notamment pour sa diffusion terrestre.

## Etapes majeures

|  | 1960-1990  | 1990-2000   | 2000-2010   | 2010-2020  |
|--|--|---|---|--|
| <b>Modes d'usage</b>                               | Un seul poste de télévision par foyer  | Multiplés postes par foyer.<br>Ecrans de grande taille et format 16/9 apparaissent.       | Le poste de télévision fixe s'améliore (écran plat, haute définition, son amélioré).<br>Les téléviseurs portables et mobiles se multiplient.<br>L'usage individuel démarre. | Le poste de télévision fixe résiste et s'améliore (ultra haute définition, connecté).<br>L'iPad débarque.<br>La télévision devient accessible sur les tablettes et téléphones mobiles. |
| <b>Modes de diffusion et de distribution</b>       | Terrestre analogique.<br>Câble analogique.<br>Satellite analogique.  | <i>Idem</i> + satellite et câble numériques et début du terrestre numérique.              | <i>Idem</i> + tout numérique sur satellite, câble et terrestre.<br>La télévision par Internet se développe.   | <i>Idem</i> + Développement rapide des réseaux mobiles 3G et 4G permettant une réception de la télévision par Internet sur les appareils mobiles.                                      |
| <b>Offre et modèles économiques</b>                | Contenu en <i>live</i> , programmation « linéaire ». Quelques chaînes nationales publiques et commerciales.<br>Modèles « Gratuit » ou « Payant », voir paragraphe 5. | Offre toujours « linéaire ». Plus de chaînes, notamment commerciales.                     | Apparition de l'offre « non linéaire » de la vidéo à la demande par Internet.<br>Apparition du contenu généré par les téléspectateurs (YouTube, Facebook...).               | Avènement des programmes à la demande par souscription (SVOD) avec des opérateurs globaux (Netflix...).<br>Explosion du contenu généré par les téléspectateurs.                        |
| <b>Régulation</b>                                  | Contenu : régulation par les Etats.<br>Fréquences : gestion par les radiodiffuseurs nationaux.   | Contenu : Autorités de régulation des médias.<br>Fréquences : Régulateurs des fréquences. | <i>Idem</i> + la régulation évolue pour couvrir l'internet  | <i>Idem</i> , voir paragraphe 6  |
| <b>Usage des fréquences hertziennes terrestres</b> | Usage modéré, ressources abondantes.<br>Accords et plans régionaux ST61 et GE89.   | Usage intensif.<br>Accord régional Chester 97.  | Accord et plan régional GE06.<br>Bande des 800 MHz perdue.  | Accords et plans Afrique subsaharienne et MENA.<br>Bande des 700 MHz perdue.   |

## L'usage évolue du collectif vers l'individuel

Entre 2012 et 2017, la télévision « traditionnelle » a décliné modérément face à une augmentation significative de l'utilisation des réseaux sociaux par les Européens de plus de quinze ans. Cette évolution est bien plus prononcée pour les jeunes entre quinze et vingt-quatre ans (voir Figures 1 et 2).



Source: EBU / Eurobarometer, basé sur UE 28

Figures 1 et 2 : Evolution de l’usage de la télévision et des réseaux sociaux en Europe des 28 pour les plus de 15 ans (à gauche) et pour les 15-24 ans (à droite)

### Les modes de diffusion et de distribution se multiplient

Le premier mode de diffusion de la télévision fut l’hertzien, avec des émetteurs de forte puissance couvrant des zones aussi larges que possible, complétés par des émetteurs relais pour couvrir des zones d’ombre. Viendra ensuite, chronologiquement, la distribution par câble, dont le déploiement est bien plus lent et plus coûteux par rapport à l’hertzien. Suivra ensuite la diffusion par satellite, qui est la version « supérieure » de la diffusion hertzienne, avec des zones de couvertures multinationales. Le dernier mode de distribution en date est celui par Internet, utilisant le support filaire ou sans fil (Wifi, 4G). Ce mode est connu sous le nom IPTV.

Les modes de diffusion hertzien, câblé et satellitaire sont tous passés de la technologie analogique à la technologie numérique, offrant plus de capacité, de qualité et de fonctionnalités.

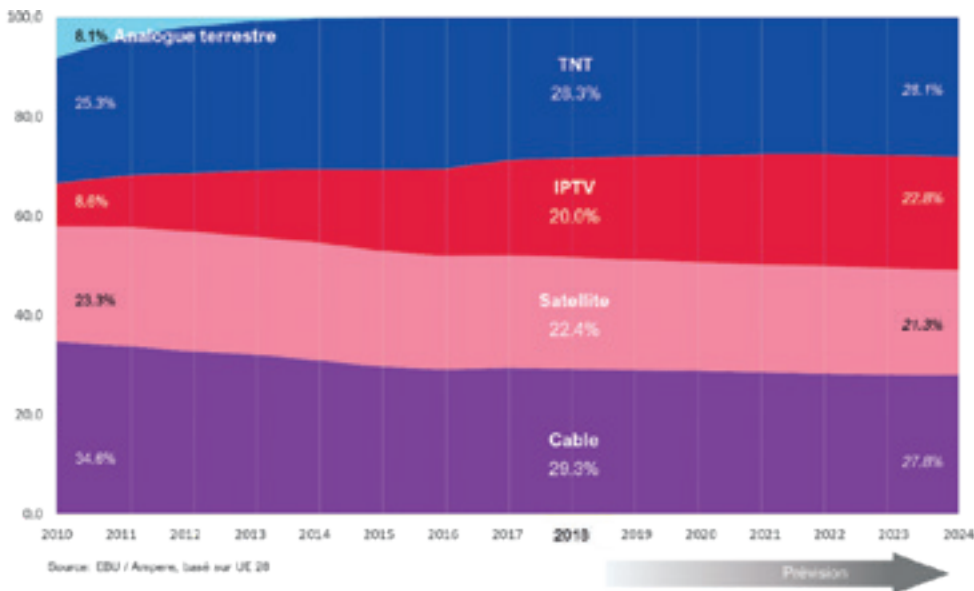


Figure 3 : Mode de réception principal, en % de foyers, dans l’Europe des 28

Les pourcentages montrés sur la figure 3 sont des moyennes qui couvrent des variations très larges. La part de la télévision terrestre par exemple varie de quelques pourcents dans certains pays (Belgique) à plus de 75 % dans d'autres (Grèce). Ces chiffres concernent la réception sur le poste principal. En comptant la double réception, les chiffres de la télévision terrestre augmenteront.

La diffusion terrestre semble bien résister à la concurrence des divers autres modes de distribution. Parmi les raisons figurent la gratuité et la simplicité pour les usagers, les obligations légales pour les chaînes publiques d'assurer une réception gratuite universelle, la souveraineté nationale, la résilience en cas de catastrophes naturelles et la possibilité pour les diffuseurs de payer moins cher des droits de diffusion (sport) pour une réception gratuite limitée géographiquement.

Pour satisfaire les nouveaux modes d'usage exposés au paragraphe 3, en particulier la réception sur les appareils mobiles, de nouvelles technologies de diffusion pour la télévision terrestre sont en cours de développement sur la base de celles utilisées pour les réseaux de données mobiles (EBU, 2018 ; Ratkaj, 2019).

## **L'offre explose et les modèles économiques se recherchent**

Avec l'explosion de l'offre de contenu, la course vers l'audience s'est intensifiée. L'offre « à la demande » concurrence l'offre « linéaire » programmée.

Les modèles économiques luttent pour s'imposer, avec d'un côté le « gratuit », financé par la redevance (le cas des chaînes du service public) ou la publicité (le cas des chaînes commerciales gratuites, et plus récemment des contenus disponibles en ligne, dits *Over-The-Top* ou OTT, ainsi que ceux générés et mis en ligne par le public). Et de l'autre côté, le « payant », financé par la vente du contenu à la demande (le cas des services VOD disponibles sur Internet et sur le câble) ou par abonnement mensuel, soit pour l'accès au support (le cas de l'abonnement à un bouquet par câble, satellite ou IPTV), soit pour l'accès au contenu (à l'exemple de Canal+ et plus récemment Netflix, Amazon et autres).

La multiplication de l'offre payante oblige les usagers à opérer des choix (IPTV et SVOD augmentent au détriment des abonnements au câble) mais renforce la place de l'offre gratuite (Stewart, 2019).

## **La régulation est amenée à s'adapter**

Avec la spectaculaire montée de l'utilisation de l'Internet pour la diffusion et l'échange du contenu audiovisuel, des outils de régulation adaptés sont développés, surtout à l'échelle communautaire. Par exemple, la directive européenne « Services de médias audiovisuels <sup>(1)</sup> » traite des questions de contenu. D'autres exemples récents incluent la directive « Le droit d'auteur dans le marché unique numérique <sup>(2)</sup> » et les « Contrats de fourniture de contenus numériques et de services numériques <sup>(3)</sup> ».

Les obligations en matière de production de contenu audiovisuel européen tendent à s'appliquer indépendamment des technologies et plateformes de distribution. Aussi, elles se renforcent sur le contenu « à la demande » (30 % contre 50 % sur le contenu « linéaire »).

(1) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM%3Aam0005>

(2) [http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2019-0231\\_FR.html](http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2019-0231_FR.html)

(3) [http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2019-0232\\_FR.html#title1](http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2019-0232_FR.html#title1)

## **L'usage des fréquences : « faire plus avec moins »**

Entre les années 1950 et 1970, la télévision hertzienne était un des plus gros utilisateurs des fréquences. La transmission de l'image, du son et de la couleur, avec les modulations analogiques, était très gourmande en largeur de bande. Un programme de télévision occupait jusqu'à 8 MHz. Aussi, les émetteurs géographiquement proches les uns des autres doivent utiliser des fréquences différentes pour éviter les brouillages. Cette contrainte a nécessité l'utilisation de 6 à 8 canaux (donc 48 à 64 MHz) pour diffuser un seul programme en analogique sur un territoire comme la France. Une coordination des fréquences est également nécessaire entre pays voisins. Afin d'éviter le phénomène du « premier arrivé premier servi », des conférences régionales organisées par l'UIT ont réparti de façon équitable les canaux sur les émetteurs des pays concernés. Ainsi fut fait le plan de l'accord de Stockholm 1961 pour la zone européenne de radiodiffusion, puis le plan de l'accord de Genève 1989 pour la zone africaine de radiodiffusion, et plus tard, l'accord de Genève 2006 pour la planification de la télévision et la radio numériques dans la Région 1<sup>(4)</sup> de l'UIT. Ces plans contiennent des canaux occupant trois plages de fréquences : la bande I de 47 à 68 MHz (non incluse dans le plan GE06), la Bande III de 174 à 230 MHz et les bandes IV et V de 470 à 862 MHz. Au total, 469 MHz étaient consacrés à la diffusion de la télévision par voie hertzienne, environ 47 % du spectre inférieur à 1 GHz.

En Europe, avec ces 469 MHz, il était possible de planifier entre 7 et 9 réseaux de diffusion analogique, offrant 7 à 9 programmes de télévision au total.

Avec la technologie de diffusion numérique, développée dans les années 1990 et déployée dans les années 2000 (la TNT, à la norme DVB-T, a démarré en France en 2005), il était possible de diffuser six programmes dans un seul canal de 8 MHz au lieu d'un, avec une qualité d'image et de son au moins égale à l'analogique.

En parallèle, le développement rapide des services mobiles de données 3G et 4G dans les années 2000 a créé un besoin de fréquences pour le service mobile dans les bandes inférieures à 1 GHz, où se trouve la bande historique des 900 MHz utilisée par les systèmes mobiles numériques 2G (GSM). La propagation des ondes dans cette partie du spectre permet de déployer de nouveaux réseaux à couverture étendue avec moins de sites que dans les bandes de fréquences supérieures qui, quant à elles, offrent plus de capacité pour des couvertures urbaines notamment.

Ainsi, la CMR-07 a décidé d'attribuer une tranche en haut de la bande UHF historique de télévision, de 790 à 862 MHz au service mobile pour les applications IMT, connue sous les appellations « bande des 800 MHz » et « premier dividende numérique ». Le second ne tardera pas à venir.

Pour plusieurs pays européens, cette perte de la bande des 800 MHz pour la télévision était gérable, dans la mesure où son utilisation était moins intense que la partie inférieure de la bande. Malgré cette situation, il a fallu mettre en place, dans plusieurs pays européens, un mécanisme de financement des réaménagements de fréquences nécessaires pour libérer la bande et résoudre les perturbations causées par les émetteurs du service mobile sur certaines antennes de réception de télévision situées à proximité.

A la CMR-12, une pression exercée par la région Asie-Pacifique et par l'Afrique sub-saharienne a donné lieu à l'attribution au service mobile pour les applications IMT d'une seconde tranche du spectre jusqu'alors attribué à la diffusion. Elle est située juste en dessous de la première, de 694 à 790 MHz, appelée « Bande des 700 MHz » et « second dividende numérique ». Cette attribution était assortie d'une prise d'effet en 2015, à la date de la CMR-15.

---

(4) La Région 1 de l'UIT comprend l'Europe, l'Afrique, le Moyen-Orient et une partie de l'Asie.



Cette nouvelle perte de spectre a eu un impact plus conséquent sur les radiodiffuseurs européens. Aussi, les années 2010 ont vu une augmentation des attentes des téléspectateurs pour des services de télévision en haute définition (ou TVHD), disponible déjà sur le satellite et le câble, et qui commençait à se généraliser du côté de la production des programmes. La diffusion en haute définition requiert plus du double de la bande passante par rapport à la diffusion en définition dite standard (UIT-R, 2016). Le passage en haute définition nécessite donc plus de spectre, à un moment où une seconde partie du spectre venait d'être extraite à la radiodiffusion. Les avancements technologiques en matière de compression (MPEG4 puis HEVC) et de codage et modulation (DVB-T2) présentaient des voies de solutions mais au prix d'investissements conséquents de la part des radiodiffuseurs, et parfois même des téléspectateurs quand il faut adapter l'équipement de réception.

L'effort consenti par les radiodiffuseurs pour libérer la bande des 700 MHz, de façon progressive jusqu'en 2020, voire plus tard pour certains pays, a été compensé par une décision de l'Union européenne du 17 mai 2017 (UE, 2017) de garantir la disponibilité de la bande de fréquences 470-694 MHz (dénommée « bande de fréquences inférieure à 700 MHz ») au moins jusqu'en 2030 pour la fourniture de services de radiodiffusion par voie terrestre, y compris de la télévision gratuite, et pour l'utilisation par les microphones sans fil.

A ce stade, la part du spectre utilisable par la diffusion terrestre de la télévision s'est trouvée réduite de 168 MHz en l'espace de huit ans. A cette réduction s'ajoute l'arrêt de l'utilisation de la bande I (VHF 47-68 MHz) pour la télévision, en raison des inconvénients inhérents à cette partie du spectre, caractérisée par un niveau de bruit industriel plus élevé et des antennes d'émission et de réception encombrantes. Aussi, la bande III (VHF 174-230 MHz) a été retenue dans plusieurs pays européens, y compris la France, pour la diffusion de la radio numérique terrestre à la norme DAB+. Au total, le spectre de la télévision terrestre s'est trouvé réduit de 245 MHz, soit plus de la moitié des 469 MHz disponibles historiquement.

Une nouvelle tentative a eu lieu à la CMR-15, venant de l'Amérique du Nord, appuyée par quelques pays du Moyen-Orient, d'attribuer une tranche supplémentaire, la « bande des 600 MHz », au service mobile pour les applications IMT, mais sans succès. Elle a toutefois donné lieu à une décision de rediscuter les changements possibles de l'attribution de la bande 470-694 MHz dans la Région 1 de l'UIT à la CMR-23 après une phase d'étude des besoins et des possibilités de partage. Cette décision a été confirmée par la CMR-19.

## Conclusion

La télévision a beaucoup évolué avec les changements technologiques et leur impact sur les habitudes d'usage des téléspectateurs, en particulier dans les deux dernières décennies. L'usage des fréquences par la télévision a lui aussi beaucoup évolué dans les deux dernières décennies, surtout pour la diffusion terrestre. Malgré une réduction de plus de la moitié du spectre initialement disponible, la télévision est restée présente comme mode de réception principale pour près d'un tiers des foyers européens. Son accès au spectre reste toutefois soumis à plusieurs facteurs, dont les principaux sont :

- l'évolution de la demande des téléspectateurs en termes de type de programmes, gratuit *versus* payant, linéaire *versus* à la demande, sur poste fixe ou en mobilité ;
- l'évolution de la technologie de diffusion pour s'adapter aux nouveaux modes d'usage, notamment individuel et mobile ;
- l'évolution de la stratégie des diffuseurs en termes de modèle économique pour la distribution de programmes ;
- l'évolution de la position des gouvernements quant au traitement des besoins de la télévision et des radiocommunications mobiles en termes de fréquences inférieures à 1 GHz.

## Références bibliographiques

RATKAJ D. (2019), “5G: what it is and what it might become”, *tech-i*, n°39, mars, pp. 10-11.

EBU (2018), “Trials tests and projects relating to 4G/5G broadcast supported by european PSB”, *Technical Report TR044*, juillet.

STEWART D. (2019), “My antennae are tingling: Terrestrial TV’s surprising staying power”, *Deloitte Insights (online)*, 9 décembre.

UIT-R (2016), “Requirements for the implementation of digital terrestrial television broadcasting networks”, *Handbook on Digital Terrestrial Television Broadcasting Networks and Systems Implementation*, pp. 14-15.

UE (2017), « Décision (UE) 2017/899 du parlement européen et du Conseil du 17 mai 2017 sur l'utilisation de la bande de fréquences 470-790 MHz dans l'Union », *Journal officiel de l'Union européenne*, 25 mars, L. 138/131 – L. 139/137.

## Abréviations

|            |   |
|------------|---|
| Chester 97 | Accord de Chester 1997                          |
| CMR        | Conférence mondiale des Radiocommunications     |
| DVB-T      | <i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i> |
| GE06       | Accord et plan de fréquences de Genève 2006     |
| GE89       | Accord et plan de fréquences de Genève 1989     |
| HEVC       | <i>High Efficiency Video Coding</i>             |
| IPTV       | <i>Internet Protocol Television</i>             |
| MENA       | <i>Middle East &amp; North Africa</i>           |
| MPEG       | <i>Moving Picture Encoding Group</i>            |
| OTT        | <i>Over The Top</i>                             |
| ST61       | Accord et plan de fréquences de Stockholm 1961  |
| SVOD       | <i>Subscription based VOD</i>                   |
| TNT        | Télévision numérique terrestre                  |
| UER        | Union européenne de Radiotélévision             |
| UIT        | Union internationale des Télécommunications     |
| VOD        | <i>Video On Demand</i>                          |

# La gestion des fréquences en temps de crise

Par **Claire LANDAIS**

Secrétaire générale de la Défense et de la Sécurité nationale

La stratégie de sécurité nationale a pour objet d'identifier l'ensemble des menaces et des risques susceptibles d'affecter la vie de la Nation, notamment en ce qui concerne la protection de la population, l'intégrité du territoire et la permanence des institutions de la République, et de déterminer les réponses que les pouvoirs publics doivent y apporter<sup>(1)</sup>.

Les retours d'expérience des crises majeures les plus emblématiques de ces vingt dernières années ont montré que la désorganisation des télécommunications constituait un élément majeur d'aggravation de la crise. En effet, les moyens de communication utilisés aujourd'hui, dans toute leur diversité, permettent la coordination de la gestion de la crise et une plus grande rapidité de réaction. Par ailleurs, il est important que les populations touchées puissent communiquer avec les services de secours, la sécurité publique et leurs proches, en disposant d'un moyen permettant de poser des questions.

Lors de l'attentat contre le *World Trade Center* à Manhattan le 11 septembre 2001, 200 000 lignes téléphoniques et 100 000 lignes informatiques ont été totalement interrompues, les téléphones mobiles saturés, et les communications radio désorganisées ; en ont résulté de lourdes conséquences sur l'organisation des secours avec un impact important en vies humaines. Lors de l'accident industriel de l'usine AZF, toutes les lignes de communication filaires ou mobiles ont été très rapidement saturées, hors réseau résilient (réseau RIMBAUD) et moyens radio des services de secours. L'attaque du Bataclan a occasionné une saturation de la téléphonie mobile et des problèmes de synchronisation des moyens radio entre primo-intervenants. Après le passage de l'ouragan Irma, un *black-out* complet a été constaté instantanément (6 septembre 2017), qui n'a été résorbé qu'au bout de sept jours par réinstallation progressive – réparation câble sous-marin, Radio-Guadeloupe et TNT (9 septembre), puis reprise progressive de la couverture des réseaux mobiles (13-14 septembre). Plus récemment, en marge des manifestations des « gilets jaunes », des éléments se sont attachés à détruire des moyens de diffusion (TDF) et certains moyens de communication, sans doute afin d'isoler les populations et d'empêcher les autorités de communiquer.

La question de la gestion des fréquences en cas de crise se révèle donc primordiale.

## **Les responsabilités du Premier ministre dans la gestion des crises**

La direction politique et stratégique de la réponse aux crises majeures est assurée par le Premier ministre en liaison avec le Président de la République. Ensemble, ils fixent les objectifs de sortie de crise et les stratégies de relations internationales et de communication.

Le Premier ministre « dirige l'action du Gouvernement (article 20 de la Constitution) ». A ce titre, il « prépare et coordonne l'action des pouvoirs publics en cas de crise majeure<sup>(2)</sup> ». Pour exercer ses responsabilités dans ce domaine, il s'appuie sur l'un de ses services, le SGDSN.

---

(1) Article L. 1111-1 du Code de la défense.

(2) Article L. 1131 1 du Code de la défense.

## Le Secrétariat général de la Défense et de la Sécurité nationale

Dans le domaine de la gestion de crise, le SGDSN élabore la planification interministérielle de défense et de sécurité nationale, veille à son application et conduit des exercices la mettant en œuvre. La mission de planification de défense et de sécurité nationale vise :

- à préparer la Nation, dans toutes ses composantes, étatiques ou non, à des crises majeures ;
- à assurer la continuité de l'Etat et des fonctions essentielles de la Nation.

Les plans comportent un volet communication important, qui indique quels flux d'information doivent circuler, entre les acteurs de la gestion de crise d'une part, et avec la société civile d'autre part.

### Moyens de communication en situation de crise

Plusieurs moyens de communication doivent transmettre la voix, des données, des images. Ils doivent être résilients dans le sens où ils doivent fonctionner malgré les menaces qui pèsent sur les télécommunications (saturation, pannes graves et défaillances des réseaux, catastrophes naturelles et industrielles, malveillances et attaques physiques ou numériques, indisponibilité des ressources humaines).

La voix reste le moyen privilégié pour transmettre rapidement des ordres, des directives ou des informations. Ainsi, la téléphonie et la radio sont deux services de communication qui permettent l'interaction entre les deux correspondants, avec une mise en œuvre facile. En outre, la voix, quand elle est de bonne qualité, peut permettre d'identifier un interlocuteur.

Les autres services de transmission de données (sms et mms, messagerie, accès à des portails, visiophonie) sont utilisés en gestion de crise, avec un besoin de mobilité de plus en plus prononcé. Ils permettent de partager les informations avec un grand nombre d'acteurs.

Dans un contexte de multiplication des crises, désormais régulières et à l'ampleur croissante, il est avant tout fondamental de considérer les moyens de communication, **et en particulier les moyens de communication hertziens**, comme **des outils majeurs** de la gestion de crise. Ils permettent en effet aux autorités d'assurer leurs fonctions dans la gestion de crise.

Ainsi la gestion de crise est à la fois horizontale (au niveau local du département et des départements limitrophes) et verticale (vers la zone de défense et de sécurité, vers le niveau ministériel central – cabinets, centre de crise, service du haut fonctionnaire de défense, directions centrales d'administration, CIC).

Au niveau local, le préfet de département, en tant que représentant de l'Etat dans le département, a un rôle prédominant dans la gestion d'une situation de crise (cf. décret 2004-734 du 29 avril 2004). Il est le seul compétent pour prendre les mesures relatives à l'ordre, à la sûreté, à la sécurité et à la salubrité publics.

Il peut s'appuyer sur le soutien de la zone de défense et de sécurité lorsque l'événement dépasse les capacités disponibles au sein de son département.

Avant la crise, le préfet doit anticiper les risques et préparer la réponse de l'Etat en crise. Il doit identifier les risques et préparer la population. Pour remplir sa mission, le préfet de département peut armer sa cellule de crise, le centre opérationnel départemental (COD), qui regroupe l'ensemble des acteurs de la crise qui sont les relais des acteurs de terrain. Le COD est un outil interministériel de gestion de crise, dont l'objectif est de faire remonter toutes les informations du terrain, de les analyser et de les transmettre au préfet pour faciliter la conduite stratégique de la crise et la prise de décision.

Il s'appuie sur les services de l'Etat du département, les directions interdépartementales interministérielles, le commandant de groupement de gendarmerie départementale, le directeur départemental de la sécurité publique, le délégué militaire départemental.

## **Les moyens de communication hertziens (radio)**

Concernant les moyens de communication hertziens, le spectre radioélectrique qu'ils utilisent est une ressource économique rare et convoitée, que l'Etat soumet donc à régulation selon les modalités précisées aux articles L. 41 et suivants du Code des postes et communications électroniques.

En pratique, sa gestion quotidienne est répartie entre un petit nombre d'affectataires, que sont les principales administrations de l'Etat utilisatrices de fréquences<sup>(3)</sup>, l'Autorité de Régulation des Communications électroniques et des Postes (ARCEP) et le Conseil supérieur de l'Audiovisuel (CSA), ainsi que, outre-mer, les gouvernements locaux de Nouvelle-Calédonie et de Polynésie française. Ces affectataires répartissent ensuite les bandes dont ils disposent entre utilisateurs publics ou privés, selon des procédures qui leur sont propres, constituant ainsi le tableau national de répartition de bandes de fréquences (TNRBF), qui est tenu par l'Agence nationale des Fréquences (ANFR) et validé par le Premier ministre.

Or, les nécessités de l'ordre public et de la sécurité de l'Etat commandent que, dans les circonstances prévues aux articles L. 1111-2 « en cas de menace portant notamment sur une partie du territoire, sur un secteur de la vie nationale ou sur une fraction de la population » et L. 2141-3 du Code de la défense<sup>(4)</sup>, « le droit de soumettre à contrôle et à répartition, les ressources en énergie, matières premières, produits industriels et produits nécessaires au ravitaillement et, à cet effet, d'imposer aux personnes physiques ou morales en leurs biens, les sujétions indispensables », seules soient autorisées les émissions indispensables, et cela sous le contrôle de l'Etat.

En effet, les situations « de crise » impliquent une intensification de l'activité des organismes chargés de la sécurité intérieure et de l'ordre public et entraînent, par voie de conséquence, un accroissement plus ou moins important des besoins en fréquences, notamment pour le fonctionnement des transmissions ou des outils de détection de ces organismes de défense militaire ou civile. Ces besoins accrus ne peuvent être satisfaits que par prélèvement sur les fréquences mises à la disposition d'autres utilisateurs moins prioritaires.

Aussi est-il nécessaire, dès le temps de paix, de recenser et d'identifier précisément les bandes de fréquences susceptibles d'être réaffectées en temps de crise au profit des forces de défense et de sécurité, ainsi que la liste des stations radioélectriques prioritaires pour ces mêmes besoins de défense et de sécurité, dont la permanence de fonctionnement et la protection doivent être assurées (y compris en matière de communication gouvernementale), et de prévoir à l'inverse les mesures de restriction s'appliquant à toutes les autres stations.

## **L'allocation de fréquences**

L'Agence nationale des Fréquences établit et actualise pour le compte du Secrétaire général de la Défense nationale, et selon ses directives, en liaison avec les administrations et autorités concernées, le tableau national de répartition des bandes de fréquences spécifique au temps de crise, et le mémento de temps de crise.

(3) Intérieur, Défense, Equipement (Aviation civile, Météo, Ports et Navigation Maritime), Recherche et Espace.

(4) Issus des articles 2 et 6 de l'ordonnance n°59-147 du 7 janvier 1959, portant organisation générale de la défense.

Le Code des postes et communications électroniques (art. R20-44-11) confie à l'ANFR l'allocation des bandes de fréquence entre les affectataires<sup>(5)</sup>. Elle prend la forme du tableau national de répartition des bandes de fréquence – TNRBF, qui est ensuite soumis à l'approbation du Premier ministre par arrêté<sup>(6)</sup>. La révision du TNRBF est faite au rythme des conférences mondiales avec les affectataires. En complément, l'ANFR assure la gestion et le contrôle de l'utilisation des fréquences<sup>(7)</sup>.

Lorsqu'un affectataire (ministère de la Défense) souhaite utiliser en priorité, même temporairement, une bande de fréquence qui ne lui est pas allouée, il faut qu'il en fasse la demande à l'ANFR, qui mène alors les travaux de concertation entre les affectataires en vue d'une proposition de modification du TNRBF.

Cette procédure n'est pas adaptée à une situation d'urgence du fait des délais pour la mettre en œuvre. C'est ce qui a été démontré encore récemment : le ministère des Armées, lors des attentats du 13 novembre 2015, a eu besoin de pouvoir utiliser ses moyens de communications radio opérationnels en milieu urbain, pour l'opération SENTINELLE, ce qui nécessitait de pouvoir utiliser les fréquences d'un autre affectataire. Il s'est tourné directement vers l'ARCEP qui a affecté temporairement au ministère des Armées des fréquences dont l'utilisation ne devait pas porter à conséquence, sans toutefois que cela soit inscrit dans le TNRBF, afin de répondre aux circonstances exceptionnelles.

Le besoin de pouvoir réallouer plus rapidement des bandes de fréquences est avéré pour les moyens de communications actuels, en cas de maintien du niveau élevé de menace d'attentat terroriste sur le sol français.

C'est pourquoi un arrêté du Premier ministre, élaboré en concertation étroite avec les ministères affectataires des fréquences et les autorités de contrôle, permet à l'Agence nationale des Fréquences d'organiser les modalités procédurales permettant l'adoption d'un tableau national des bandes de fréquences (TNRBF) comportant l'affectation des ressources spectrales additionnelles au profit des ministères de l'Intérieur et des Armées, en cas de menace, au sens de l'article L. 1111-2 du Code de la défense.

Le texte de l'arrêté rappelle les missions de l'Agence nationale des Fréquences dans son premier article puis, dans ses articles 2 et 3, précise les tâches à effectuer pour la préparation et la validation de modifications du tableau national de répartition des bandes de fréquences qui prévoient une réserve de fréquences utilisables pour assurer l'ordre public et la sécurité intérieure et extérieure de l'Etat. Les modifications apportées au tableau national de répartition des bandes de fréquences n'entrent en vigueur qu'à compter de la constatation par le pouvoir exécutif d'une des situations mentionnées à l'article L. 1111-2 du Code de la défense.

Cet arrêté a été pris le 30 août 2018 en application de l'article L. 43 du Code des postes et des communications électroniques relatif aux objectifs de l'Agence nationale des Fréquences dans les circonstances prévues à l'article L. 1111-2 du Code de la défense.

Si ses dispositions ont un caractère technique, cet arrêté apporte utilement sa pierre au dispositif global de la réponse de l'Etat aux crises majeures.

(5) Ministère de la Défense, ministère de l'Intérieur, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, haut commissaire de la République dans les collectivités d'outre-mer, administration de l'aviation civile, administration de la météorologie, autorités administratives indépendantes CSA et ARCEP, Centre national d'Etudes spatiales, télécommunications dans les collectivités d'outre-mer.

(6) Art. L. 41 du Code des postes et télécommunications électroniques - CPCE. « Le Premier ministre définit, ..., les fréquences ou bandes de fréquence radioélectriques qui sont attribuées aux administrations de l'Etat... »

(7) En particulier, en application du R20-44-11 alinéa 11 du CPCE, elle gère les fréquences pour réseaux mobiles professionnels, et les fréquences utilisées à titre temporaire.



# **Police du spectre, brouillage offensif, brouillage non intentionnel.**

## **Contrôle du spectre, cyber-sécurité, cyberdéfense et guerre électronique : même combat ?**

Par Catherine GABAY  
ANFR

### **Le spectre**

Le spectre radioélectrique est défini comme l'ensemble des fréquences comprises entre 9 kHz et 3 000 GHz. Invisible et immatériel, partagé entre différents services (radiodiffusion, mobile, fixe, radiolocalisation, radionavigation, radioastronomie, recherche spatiale, radioamateur), c'est une ressource rare et stratégique.

### **La réglementation du spectre**

Des réglementations internationales et nationales assurent une utilisation efficace du spectre des radiofréquences et une cohabitation harmonieuse des différents services dans cet espace limité.

L'Union internationale des Télécommunications (UIT) assure la réglementation au plan international.

En France, l'Agence nationale des Fréquences (ANFR), établissement public administratif placé auprès du ministre de l'Économie et des Finances, est en charge de la planification, de la gestion et du contrôle du spectre. Une journaliste décrivait le rôle de l'ANFR dans *Ouest France*, le 26 avril 2015, comme un celui d'un « chef d'orchestre » et ajoutait : « ce large spectre est partagé entre différents utilisateurs [...] Comme sur une large autoroute où chacun doit rouler sur sa voie, les usagers ne doivent pas empiéter sur les bandes des voisins. L'agence fait tout pour que les fréquences n'entrent pas en conflit les unes avec les autres ».

### **La police du spectre : une mission régaliennne de l'ANFR**

Pour faire respecter les lois et règlements qui régissent l'utilisation du spectre et intervenir en cas d'infractions, il faut une force de police du spectre électromagnétique, ou « police des fréquences ». En France, l'Agence nationale des Fréquences (ANFR) a ce rôle dans le cadre de ses opérations de contrôle du spectre.

Assermentés et habilités, les agents de contrôle de l'ANFR disposent de pouvoirs d'enquête pour investiguer et constater les cas de violation de la législation en matière de radiocommunications. Ils peuvent aussi être amenés à intervenir en tant qu'experts auprès de la Police judiciaire ou être réquisitionnés de manière exceptionnelle par la puissance publique.

## LE CONTRÔLE DE L'UTILISATION DES FRÉQUENCES, L'ANFR « GARDIENNE DU SPECTRE » SUR LE TERRAIN



L'ANFR est présente sur l'ensemble du territoire pour exercer la mission de police du spectre.  
©ANFR

Les termes employés dans la presse pour décrire la mission et les agents de contrôle du spectre sont éloquentes. L'ANFR est qualifiée de « gendarme des fréquences » par Tony Robin dans *l'Est républicain* en 2019, de « police des fréquences » par Romain Bosso dans *l'Express* en 2019, de « gendarme des ondes » par François Chrétien dans *Ouest France* en 2017, et ses agents sont renommés « gardiens du spectre » par Ghislain Utard dans *l'Est républicain* en 2017. Le travail d'investigation des agents de contrôle est décrit comme un « véritable travail de détectives » par Olivier Berrezai dans *Ouest France* en 2019. Déjà en 1998, Jérôme Dupuis dans *l'Express* qualifiait les agents de contrôle du spectre de l'ANFR de « fins limiers » et la Direction de Contrôle du Spectre de « escouade de pointe ».

## Une définition du brouillage

Un brouillage correspond à une énergie électromagnétique due à des émissions, rayonnements ou inductions, qui dégrade, entrave ou interrompt le fonctionnement d'émetteurs et/ou de récepteurs de radiocommunications. L'UIT a introduit la notion de brouillage préjudiciable, définie comme un « brouillage qui compromet le fonctionnement d'un service de radionavigation ou d'autres services de sécurité ou qui dégrade sérieusement, interrompt de façon répétée ou empêche le fonctionnement d'un service de radiocommunication utilisé conformément au Règlement des radiocommunications ».

Les brouillages ont des causes très diverses, d'émissions radio par des sources radioélectriques non autorisées ou défectueuses à des émissions involontaires de parasites électromagnétiques générées par un appareil électrique, électronique ou radio, non conforme, vétuste ou mal réglé. 25 % des cas de brouillages traités chaque année par l'ANFR sont dus à des parasites électromagnétiques !

Le brouillage d'une bande de fréquences entrave voire empêche toutes les utilisations de cette bande de fréquences dans un périmètre donné. Tous les secteurs et domaines, pas seulement les services de radiocommunication, sont potentiellement concernés, y compris des services critiques ou de sécurité, avec le risque de créer des situations dangereuses pour la vie humaine ou économiquement pénalisantes.

Certains systèmes radio sont plus vulnérables que d'autres, car leur efficacité dépend de leur capacité à détecter un signal faible.

## **Brouillage délibéré versus interférence involontaire**

Un brouillage par parasites électroniques émis par un appareil vieillissant est considéré comme non intentionnel. À l'inverse, l'utilisation d'un brouilleur est un brouillage volontaire, sans compter le brouillage par déception, nommé leurrage ou *spoofing*, qui consiste à émettre des signaux trompeurs, pour lesquels l'intention est avérée et particulièrement offensive.

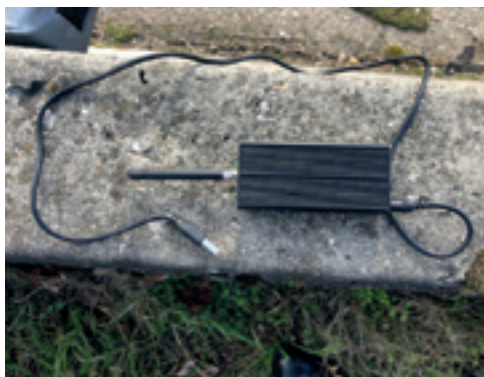
## **Brouillage offensif**

Au-delà de la notion de brouillage volontaire, la notion de brouillage offensif semble mieux à même de décrire les utilisations de brouilleurs ou les tentatives hostiles de déni de satellites de services de télévision pour des motivations géopolitiques ou économiques.

## **La lutte contre les brouilleurs illicites**

L'ANFR est particulièrement impliquée dans la lutte contre le risque de prolifération de brouilleurs illicites, notamment de brouilleurs GNSS (GPS, Glonass ou Galileo). Il est en effet crucial de protéger les signaux des systèmes de géolocalisation par satellites qui sont critiques pour une gamme sans cesse croissante d'applications, que ce soit pour se positionner avec précision ou pour des capacités de synchronisation et de référence de temps.

Défini dans le Code des Postes et Communications électroniques (CPCE) comme un « dispositif destiné à rendre inopérants des appareils de communications électroniques de tous types, tant pour l'émission que pour la réception », le brouilleur agit en règle générale en émettant de façon plus forte que le signal utile pour le masquer. Un brouilleur ressemble à un boîtier muni d'une ou de plusieurs petites antennes, selon les bandes de fréquences visées.



Brouilleur GPS saisi lors d'une intervention de l'ANFR.  
©ANFR



Brouilleur « multi-bandes » analysé dans un véhicule  
laboratoire de l'ANFR. ©ANFR

La loi française prévoit leur interdiction générale (importation, publicité, cession à titre gratuit ou onéreux, mise en circulation, installation, détention et utilisation), assortie d'une sanction pénale allant jusqu'à six mois de prison et 30 000 euros d'amende.

À noter qu'une dérogation à cette interdiction générale est accordée pour le compte de l'État « pour les besoins de l'ordre public, de la défense et de la sécurité nationale, ou du service public de la justice ».

Outre qu'ils font de plus en plus partie de la panoplie des criminels pour leurs méfaits, l'utilisation de brouilleurs peut avoir des conséquences graves pour la sécurité, notamment en raison de leurs effets collatéraux sur une zone beaucoup plus grande qu'imaginée (par exemple, un brouilleur de téléphonie mobile utilisé pour empêcher les utilisations de téléphone mobile dans une salle de classe et qui perturbe la téléphonie mobile du quartier, un brouilleur de GPS utilisé par un employé qui veut empêcher la géolocalisation de son véhicule par son employeur et perturbe des avions volant à 2 000 mètres d'altitude ou parqués à 500 mètres de là).

La multiplication des cas de brouillages traités par l'ANFR liés à des petits brouilleurs GNSS ces dernières années est préoccupante. Sans compter les velléités de certains VIPs qui souhaiteraient lutter contre les drones paparazzi avec des brouilleurs qui peuvent potentiellement avoir des puissances et des portées très importantes. Ainsi un « hôtelier de luxe de la Côte d'Azur » cité dans « La chasse aux drones, le sport de l'été » par Elisa Braun dans *le Figaro* du 31 août 2018, « qui songe à installer un dispositif de brouilleur d'ondes GPS, nuisible aux drones ». L'ANFR est particulièrement active dans la lutte contre ces brouilleurs. Leurs utilisateurs se considèrent invisibles aux yeux de leur patron, mais ils ne le sont pas des agents de l'ANFR. Plusieurs utilisateurs de brouilleurs GNSS ont vu ces dernières années leurs véhicules interceptés et ont eu à répondre devant la justice, dans le cadre d'opérations menées par l'ANFR avec des matériels innovants de détection et l'appui d'une coopération renforcée avec les forces de l'ordre.

## **Le traitement des brouillages par l'ANFR : un véritable travail d'investigation technique**



Mesures spectrales pour le traitement d'un brouillage.  
©ANFR

Le traitement d'un brouillage, suite à son signalement à l'ANFR (environ 1 500 cas par an), est mené sur le terrain par des agents assermentés et habilités, équipés de matériels techniques sophistiqués afin de rechercher, identifier et localiser la cause du brouillage. Dans certaines situations, un dispositif de détection est installé sur un site pertinent pour la durée nécessaire à la caractérisation du brouillage. Une fois l'équipement et le responsable du brouillage identifiés, l'ANFR formule des préconisations pour faire cesser le brouillage. L'ANFR peut notifier une taxe forfaitaire de 450 € pour frais d'intervention, et lorsqu'elle souhaite que l'affaire soit poursuivie en justice, rédiger un procès-verbal d'infraction (PVI) transmis au procureur. Si besoin, les agents de l'ANFR peuvent solliciter le soutien d'un officier de police judiciaire à leurs côtés au cours de leurs investigations, par exemple pour faire saisir des équipements radio litigieux.

Sur autorisation du président du tribunal de grande instance compétent, les agents peuvent aussi procéder eux-mêmes à des saisies. Pour la résolution des cas de brouillage, l'ANFR procède cependant le plus souvent à l'amiable.

## **Des actions préventives pour réduire les risques de brouillages causés par des équipements ou des utilisations non conformes**

Ces opérations consistent en des contrôles sur le terrain de stations et réseaux radio et du marché des équipements radioélectriques.

### **Des actions pédagogiques**

La sécurisation du spectre reposant en partie sur la bonne application des conditions d'utilisation des fréquences, l'ANFR consacre un de ses axes de travail à sensibiliser les acteurs concernés.



Affiche pour sensibiliser aux risques des brouilleurs GPS.  
©ANFR



Plaquette d'information sur les réseaux sans fil de type RLAN ou WIFI.  
©ANFR

## **Contrôle du spectre, cyber-sécurité, cyberguerre et guerre électronique : même combat ?**

### **Malheureusement, pas de complexe d'infériorité à avoir face à la cybercriminalité**

Les liaisons sans fil apportent, en même temps que des avantages, de nouvelles vulnérabilités. Elles peuvent en effet être la clé d'entrée d'une attaque ou en être la cible.

La menace est réelle, même si elle n'est pas aujourd'hui largement reconnue en dehors de quelques communautés d'experts, peut-être parce que, contrairement à la majorité des attaques en cybercriminalité, beaucoup des brouillages traités par l'ANFR sont non intentionnels et moins médiatisés, même si cette tendance change avec la publication d'articles récents.

Pourtant, les conséquences des attaques au spectre n'ont rien à envier à celles des attaques informatiques ou des actions de guerre électronique. Un brouillage porte atteinte à la disponibilité et peut causer un déni de service. Un leurrage compromet l'intégrité des informations véhiculées. Or, les trois concepts fondamentaux en sécurité de l'information sont la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité. Par ailleurs, pour nombre d'applications et de secteurs, les enjeux liés à la disponibilité des systèmes priment sur la confidentialité ou l'authenticité. Enfin, le caractère non intentionnel d'un brouillage ne doit pas rassurer car, offensif ou pas, le brouillage aura les mêmes

effets. D'ailleurs, dans sa définition du brouillage préjudiciable, l'UIT ne distingue pas entre brouillage délibéré et brouillage non intentionnel.

**L'action de « police du spectre » menée par l'ANFR participe donc, au même titre que la sécurité informatique et la cyber-sécurité, à la sécurité numérique, et plus largement à la sécurité économique comme à celle de l'État.**

Ces dernières années, la culture en matière cyber a été renforcée. Il doit en être de même avec le contrôle du spectre, en charge de la protection du spectre radioélectrique.

## **Maintenir et renforcer continuellement les capacités de réponse aux brouillages**

L'importance de la mission de police du spectre nécessite aussi de pouvoir maintenir et renforcer continuellement ses moyens. Plusieurs actions sont menées par l'ANFR dans ce sens, parmi lesquelles une analyse prospective des menaces *via* une veille technologique et sociétale et un échange régulier avec les affectataires de fréquences, une confrontation régulière de ses méthodes avec ses pairs à l'international, un investissement dans la durée pour la modernisation des équipements et méthodes et la formation régulière des agents spécialistes qui les mettent en œuvre, et enfin une vigilance à ce que le cadre légal et réglementaire national et international continue à apporter l'appui nécessaire à la prévention et à la répression des atteintes au spectre.

En complément, l'ANFR encourage les partenariats et les actions opérationnelles inter-administrations pour unir les compétences, les pouvoirs et les expertises.

## **Impliquer et sensibiliser tous les utilisateurs du spectre pour limiter les risques de brouillage et réduire leurs effets**

Chacun doit devenir un acteur vigilant, aussi prudent dans l'espace hertzien que dans l'espace numérique et dans l'espace physique. Il est notamment essentiel de poursuivre les actions pédagogiques pour la bonne utilisation des fréquences. Il est également crucial, pour les utilisations les plus critiques, de promouvoir les moyens de résilience (en l'occurrence : matériels robustes, redondance, capacité à fonctionner en mode dégradé...) et de reprise d'activité.

## **Encourager la détection et le signalement des brouillages préjudiciables pour élever le niveau global de sécurité**

Si la détection d'un brouillage préjudiciable n'empêche pas les attaques de se produire, c'est la première étape indispensable à sa résolution. La détection appuie les opérations de réponse et permet, le cas échéant, à la police du spectre d'intervenir.

Les affectataires, opérateurs mobiles et plusieurs autres entités sont déjà particulièrement vigilants et renforcent régulièrement leurs capacités de détection.

Ce n'est pas forcément vrai aujourd'hui de la part d'autres utilisateurs du spectre, moins spécialistes, mais pour qui le spectre est ou sera critique (par exemple, voitures ou navires autonomes, territoires intelligents, santé connectée). Il est important qu'ils développent une maturité « fréquentielle » afin de savoir reconnaître un brouillage préjudiciable lorsqu'il intervient. Cela peut nécessiter la mise en place sur leurs sites d'équipements spécifiques. La détection doit se prolonger par un signalement à l'ANFR, qui, en plus de permettre, le cas échéant, à l'Agence d'intervenir pour résoudre le brouillage et réprimer ses auteurs, contribue à mieux mesurer l'ampleur du phénomène des brouillages et ainsi à renforcer la connaissance nécessaire au maintien des moyens de protection et de défense.



# Les enjeux des fréquences pour la radioastronomie

Par Ivan THOMAS

et Karl-Ludwig KLEIN

Observatoire de Paris, Station de radioastronomie de Nançay, PSL, CNRS, OSUC, Université d'Orléans

## Introduction

L'atmosphère et l'ionosphère de la Terre sont transparentes aux ondes électromagnétiques de 10 MHz à quelques dizaines de Gigahertz (GHz) et pour certaines fréquences jusqu'à quelques Terahertz (THz). C'est dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, et en particulier durant la Seconde Guerre mondiale, que l'on réalisa l'apport de cette nouvelle fenêtre sur l'Univers nous permettant d'en étudier des aspects très différents de l'observation traditionnelle en lumière visible. Dans cet article nous donnons un aperçu de ce que la radioastronomie apporte à la recherche scientifique et, de façon connexe, au développement technologique, ainsi que des contraintes importantes auxquelles elle doit faire face.

## Qu'est-ce que la radioastronomie ?

Le ciel du radioastronome ne ressemble guère au ciel étoilé que nous voyons à l'œil nu. Nuages de gaz, étoiles éteintes (en lumière visible), galaxies, l'univers dans son ensemble... : la radioastronomie a contribué à changer notre regard sur notre environnement cosmique.

Parmi les objets du système solaire, le Soleil est la source dominante. Au-dessus de sa couche visible en optique, les ondes radio permettent d'observer son atmosphère beaucoup plus dynamique, avec des éruptions et éjections de masse (Figure 1). L'observation radio d'émissions non thermiques, produites par les mouvements d'électrons dans les magnétosphères de Jupiter et Saturne, nous permet d'explorer les champs magnétiques et l'interaction entre une planète et ses satellites. Le

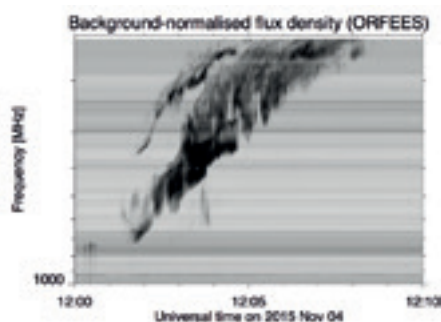


Figure 1 : A gauche, spectre dynamique de l'émission radio d'une onde de choc dans la couronne solaire. L'axe vertical montre la fréquence, entre 1 GHz (bas) et 140 MHz. Le flux reçu est d'autant plus élevé que la couleur est sombre. La dérive des hautes vers les basses fréquences traduit le mouvement de l'onde de choc de la basse vers la haute couronne. Les barres horizontales sont pour la plupart des résidus d'émetteurs terrestres. Observation : spectrographe ORFEES, station de radioastronomie de Nançay. A droite, réseau nord-sud des antennes du Radiohéliographe de Nançay, avec des paraboles de 5 m de diamètre. Le spectrographe ORFEES utilise une seule antenne du même type. © Observatoire de Paris, Station de radioastronomie de Nançay.

système solaire nous donne ainsi les outils pour chercher des planètes ailleurs et caractériser leur environnement spatial. Les émissions radio de raies spectrales émises par les comètes révèlent leur composition chimique, avec de nombreuses molécules observables uniquement en ondes millimétriques.

Contrairement à la lumière visible, les étoiles ordinaires ne sont pas les émetteurs radio les plus brillants. En revanche, des stades ultimes de l'évolution stellaire se révèlent au travers des observations radio. Les pulsars sont des étoiles condensées après leur phase de libération d'énergie par fusion nucléaire, rotateurs rapides dont la réception périodique de signaux nous fournit des mesures précises des astres eux-mêmes (Figure 2) et de l'espace que les ondes radio parcourent. La surveillance sur de nombreuses années est un outil précieux pour la future détection d'ondes gravitationnelles.

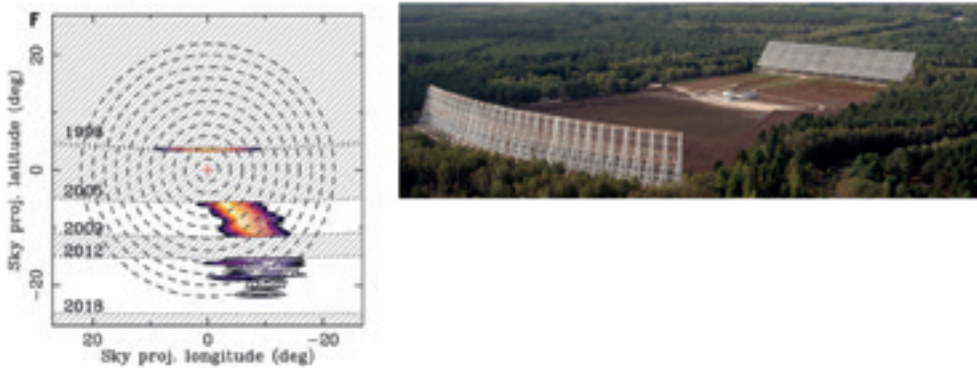


Figure 2 : A gauche, cartographie de l'émission radio d'un pulsar, faite sur la base de l'analyse de la polarisation des impulsions reçues par les radiotélescopes d'Arecibo et Nançay. L'émission se situe au-dessus d'un des pôles magnétiques de l'astre, indiqué par le signe plus au centre de la carte. D'après Desvignes et al., Science 365, 1013 (2019). Reproduit avec l'autorisation de l'AAAS. A droite, les miroirs mobile (arrière-plan) et fixe (avant-plan) du Radiotélescope décimétrique de Nançay. © Observatoire de Paris, Station de radioastronomie de Nançay.

A l'autre opposé de l'évolution stellaire, les observations en ondes millimétriques avec ALMA au Chili nous montrent les nuages de gaz dans les galaxies où se forment de nouvelles étoiles (Figure 3). Les observations ont aussi donné la meilleure image jamais obtenue d'un système planétaire en formation. Cette image révèle des condensations dans le disque de poussières et débris autour de la proto-étoile qui se contracte. Ces condensations sont les embryons des futures planètes. Ces observations produisent des contraintes inédites pour la théorie de la formation des planètes.

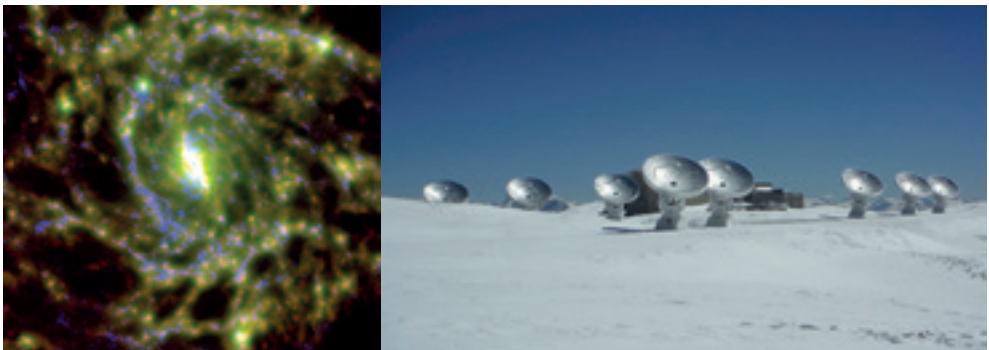


Figure 3 : A gauche, la galaxie spirale IC 342 dans la constellation Camelopardalis. Grâce à NOEMA, les scientifiques ont réussi à capturer une image d'une précision inégalée, montrant la distribution des nuages de poussière et donc les régions de formation d'étoiles actives dans la galaxie. © IRAM / A.Schruba / J.Pety, NASA / JPL-Caltech, NASA / JPL-Caltech / J.Turner. A droite, le réseau d'antennes NOEMA de l'IRAM sur le Plateau de Bure.

Depuis longtemps, l'observation de la raie à 21 cm (1,4 GHz) de l'hydrogène neutre et de son décalage Doppler en fonction de la vitesse radiale de l'émetteur est un traceur des mouvements d'astres lointains. Elle nous montre que la rotation des nuages autour du centre des galaxies ne se comporte pas comme Kepler et Newton le prédisent, sauf si une grande quantité de la matière dans l'Univers nous est invisible – une observation fondamentale pour établir l'idée de la matière noire, qui a ouvert une nouvelle branche de la recherche en astrophysique. La même technique nous permet de mesurer la vitesse apparente d'éloignement des galaxies qui traduit en fait l'expansion de l'Univers. Avec des décalages importants qui déplacent la raie de 1,4 GHz en dessous de 150 MHz, on cherche à identifier l'époque et la première signature de la formation des étoiles dans l'Univers, en mesurant la quantité d'hydrogène neutre en fonction du temps.

Les mouvements des astres autour du centre de notre galaxie font penser que ce centre est occupé par un trou noir géant, un objet constitué d'étoiles effondrées. En combinant des télescopes répartis sur la Terre, dont le télescope de 30 m de l'IRAM en Espagne qui était l'antenne la plus sensible du réseau, la radioastronomie a fourni la première image des environs d'un tel trou noir dans une autre galaxie. Cette image montre un anneau lumineux autour du trou noir, formé par l'émission de fond qui est focalisée par la gravitation du trou noir de plusieurs milliards de masses solaires.

## **Apports de la radioastronomie à la société**

En dehors de la compréhension physique qui nous permet de connaître les contraintes que l'Univers impose sur notre vie, la radioastronomie a un apport direct aux activités technologiques et économiques humaines. C'est la faiblesse du signal recherché qui a conduit au développement de récepteurs à très faible température de bruit (jusqu'à 10 K), avec de nombreuses applications dans la gamme 10 MHz – 1 THz et au développement de systèmes d'analyse du spectre sur des bandes très larges. C'est aussi grâce à la radioastronomie que nous avons appris à maîtriser la radiométrie passive pour l'observation de la Terre et la mesure des paramètres géophysiques : température, composition de l'atmosphère, distribution de la vapeur d'eau... Ou encore les appareillages de détection médicale : thermographie du corps humain en ondes millimétriques, détection et localisation de tumeurs cancéreuses en ondes centimétriques, tomographie en rayons X. Les mesures de type interférométriques à longues bases (VLBI) et astrométriques permettent d'améliorer les référentiels de géolocalisation (dérive des continents, variation de la rotation terrestre, GNSS...).

L'activité solaire, sujet d'études scientifiques, affecte aussi la technologie, et en particulier la technologie embarquée sur satellite. Les perturbations des transmissions radio au travers de l'ionosphère terrestre ont des conséquences directes sur les communications HF et les systèmes GNSS. Les activités opérationnelles de surveillance qui commencent à être menées au sein de l'aviation civile internationale et des armées doivent s'appuyer sur des observations de surveillance du Soleil. Le spectre radio, particulièrement sensible aux perturbations solaires, fournit des données d'entrée. En France, la météorologie de l'espace fait partie d'une coopération entre radioastronomes et l'armée de l'air.

## **La radioastronomie nécessite des bandes de fréquences d'observation protégées**

On peut identifier en radioastronomie les observations à spectre continu (continuum) et celles de raies spectrales. Les observations continuum permettent de mesurer précisément la distribution spectrale du rayonnement céleste. Elles nécessitent des bandes d'observation toutes les octaves à partir d'environ 10 MHz avec une largeur minimale de 2 %, idéalement de 10 %, de la fréquence

centrale. Les observations spectrales permettent d'identifier les espèces atomiques et moléculaires par leurs fréquences de transition en émission ou en absorption, puis de suivre leur mouvement dans l'Univers par leur décalage Doppler. Ces observations requièrent des fréquences protégées spécifiques avec des largeurs de bande du même ordre de grandeur que celles des observations continuum.

Les premières bandes du service de radioastronomie ont été initialement définies à l'UIT dans les années 1960, à une époque où la technologie, les récepteurs et les systèmes de communication étaient exclusivement analogiques avec des largeurs de bande instantanées faibles et avec un spectre radio peu dense et peu contraint. Les bandes de radioastronomie statutairement bien protégées (statut primaire) permettaient de garantir la qualité des observations et les bandes à protection moindre (statut secondaire ou notes) permettaient aussi d'y observer en fonction de leur taux d'utilisation réel par les autres services de radiocommunication. La montée progressive des fréquences d'observation a ensuite conduit à attribuer au service de radioastronomie un nombre notable de nouvelles bandes au-dessus de 76 GHz, lors de la conférence mondiale des radiocommunications en 2000. Les applications commencent à investir fortement les bandes millimétriques ; télécommunications mobiles (5G) et satellitaires jusqu'à 70 GHz, radiolocalisation au-delà de 70 GHz. Il est nécessaire de garantir la compatibilité de ces attributions avec les observatoires de radioastronomie millimétriques.

De fortes évolutions ont aussi eu lieu en dessous de 65 GHz : du côté scientifique, la montée en performance des instruments (sensibilité, largeurs de bande observées); du côté des autres services de radiocommunication, l'évolution vers les modulations numériques complexes à étalement de spectre associée à une densification de l'utilisation réelle des bandes de fréquence attribuées. Une évolution des tables de fréquences en faveur du service de radioastronomie serait nécessaire : élargissement des bandes protégées au-delà des 2 %, augmentation du niveau de protection de certaines bandes (par exemple sous 1,4 GHz), voire attribution de nouvelles bandes (par exemple sous 100 MHz). Un autre outil de compatibilité possible est de considérer des contraintes de fréquences plus fortes vis-à-vis des autres services, mais uniquement dans des zones réglementées autour des observatoires.

Les observatoires de radioastronomie sur le territoire métropolitain sont la station de radioastronomie de Nançay dans le Cher, pour les observations en dessous de 20 GHz, et l'observatoire millimétrique du plateau de Bure (NOEMA) dans les Hautes-Alpes pour les observations au-dessus de 20 GHz.

### **Des sensibilités extrêmement élevées et des critères associés contraignants**

Les récepteurs de la radioastronomie peuvent mesurer les signaux reçus de sources dont la puissance peut être jusqu'à 1 million de fois plus faible que celle du bruit système provenant du récepteur, du sol et de l'atmosphère, au prix d'un moyennage sur des temps longs (jusqu'à des dizaines d'heures) et une très grande stabilité du récepteur. La radioastronomie est totalement dépendante du signal céleste naturel et incontrôlable, portant les caractéristiques des radiosources et toute la complexité de notre Univers au travers de son profil fréquentiel, sa dynamique, sa modulation, ses période et durée d'apparition et même de son existence, par exemple pour la recherche d'une vie extraterrestre ou les phénomènes transitoires. Les recommandations de l'UIT-R (RA.769, RA.1513) concernant les seuils de brouillages et le taux de perte de données admissibles pour la radioastronomie définissent ainsi des critères relativement contraignants pour les autres services de radiocommunications. Les émissions perturbatrices provenant des bandes adjacentes aux bandes d'observation de radioastronomie, et souvent captées par les lobes

secondaires des antennes des télescopes, sont les plus difficiles à identifier. Or, ces perturbations risquent d'augmenter avec la multiplication des réseaux de communication terrestres et des constellations satellitaires, l'explosion du nombre d'émetteurs en mouvement « à faible portée » (objets connectés, radars, drones...) et les effets d'agrégation de puissance. Il est devenu nécessaire de conserver autant que possible des bandes de garde et d'introduire les outils de compatibilité avec la radioastronomie dans les phases de normalisation des produits, en lien généralement avec la localisation des émetteurs par rapport aux sites de radioastronomie.

## **Conclusion**

A une époque où l'astrophysique opère par des observations multi-longueurs d'onde et multi-messagers, la radioastronomie reste une technique originale. Elle a su surmonter, par la construction de grands interféromètres, jusqu'à des instruments intercontinentaux, l'inconvénient de la grande longueur d'onde qui est la faible résolution angulaire. Les grands interféromètres sont des instruments-clés. En Europe, LOFAR (cœur d'antennes aux Pays-Bas et antennes dans les pays périphériques dont la France) ouvre l'imagerie aux fréquences les plus basses observables depuis la Terre. Le nouvel interféromètre ALMA, au Chili, fait depuis quelques années des observations inédites en ondes millimétriques. L'avenir de la radioastronomie au sol est la construction du Square Kilometre Array (SKA), qui deviendra l'interféromètre le plus sensible en ondes centimétriques-métriques.

En France, la station de radioastronomie de Nançay en ondes centimétriques-métriques, avec son nouvel interféromètre NenuFAR, et l'interféromètre NOEMA de l'IRAM près de Gap, le plus sensible en ondes millimétriques dans l'hémisphère Nord, contribuent à bien des égards à ces développements. Aux côtés des grands instruments, des instruments historiques et de plus petite taille continuent à être opérationnels pour des tâches spécifiques de surveillance, qu'il s'agisse des pulsars, des planètes ou du soleil, pour la recherche fondamentale et pour diverses applications. Ces instruments alimentent la recherche de la communauté scientifique internationale.

La condition de la poursuite de ces activités est la disponibilité de bandes de fréquences d'observation libres de perturbations préjudiciables au niveau des sites de radioastronomie. Dans un contexte de densification des usages et des quantités du spectre dédiées, cela passe par la mise à jour constante de la protection réglementaire internationale et européenne des bandes attribuées au service de radioastronomie. Mais cela doit aussi passer de plus en plus par des zones géographiques de plus forte protection autour des observatoires, notamment vis-à-vis des perturbations potentielles apportées par les émetteurs mobiles et « à faible portée ». Par exemple, en éteignant automatiquement ces émetteurs dans ces zones *via* des outils intégrés à la normalisation européenne et nationale et la géolocalisation. Enfin, ces zones contraintes pourraient permettre à la radioastronomie moderne d'observer dans des bandes attribuées à faible protection réglementaire et de répondre au besoin de bandes d'observation plus larges.

# HORS DOSSIER

## Le baromètre du numérique 2019

Par **Matthias DE JOUVENEL**, **Gérard LALLEMENT** et **Michel SCHMITT**  
Conseil général de l'Économie

### Une étude de référence

Depuis l'an 2000, le Conseil général de l'économie (CGE) fait réaliser chaque année une enquête sur la diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française, en liaison avec l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse depuis 2003 et avec l'Agence du numérique depuis 2016. Les accès, les équipements et les usages les plus importants sont suivis avec régularité sans que les phénomènes émergents soient négligés.

La fiabilité de cette enquête repose sur des entretiens en face-à-face avec un large échantillon de personnes âgées de plus de douze ans<sup>(1)</sup> (2259 personnes en 2019 dont 207 jeunes de moins de 18 ans) sélectionnées selon la méthode des quotas. Les résultats sont redressés pour être représentatifs de la population française. Le mode de collecte et la taille de l'échantillon permettent de construire des analyses détaillées en fonction du sexe, de l'âge, du nombre de personnes dans le logement, du niveau de diplôme, de la profession, des revenus ou de la dimension de l'agglomération de résidence.

Le sérieux et l'ancienneté de cette enquête annuelle en font le baromètre de référence. L'ensemble des données postérieures à 2006 sont disponibles en open data sur le site [data.gouv.fr](https://data.gouv.fr)<sup>(2)</sup>. Les rapports sont disponibles sur le site du ministère de l'économie et des finances<sup>(3)</sup>.

Le numérique est devenu partie intégrante de nos sociétés modernes. L'édition 2018 du baromètre du numérique avait mis en avant les craintes de la population vis-à-vis de la protection des données personnelles. Cette année, l'objectif a été d'interroger la population sur l'incidence du numérique sur leur vie personnelle et professionnelle et sur la société en général. Plus spécifiquement, ont été analysés l'évolution de la mobilité et des usages, les besoins des usagers en matière de portabilité des applications mobiles et de leurs données, la confiance dans les médias, l'incidence du numérique sur l'environnement et son rôle dans l'évolution des relations avec les administrations publiques.

### Des individus connectés à chaque instant, l'omniprésence du smartphone

Le smartphone est au cœur des usages numériques. Avec un taux d'équipement de 77 % (+2 points) contre 76 % (-2 points) pour l'ordinateur, le smartphone est désormais l'équipement numérique de référence. Si l'on observe un ralentissement de la croissance du taux de pénétration du smartphone depuis 2016, la prédominance du smartphone s'est renforcée avec le déclin de l'équipement en ordinateur (-7 points depuis 2012).

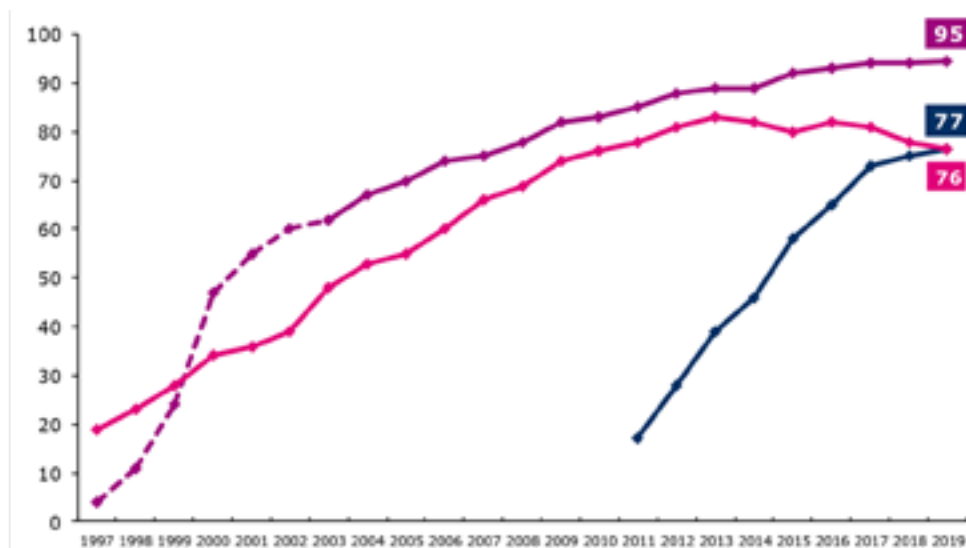
(1) Sauf précision contraire, les résultats présentés concernent la population de 12 ans et plus.

(2) <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/barometre-du-numerique>

(3) Edition 2019 : <https://www.economie.gouv.fr/barometre-numerique-2019>



**Graphique 1 – Taux d'équipement en téléphone mobile, smartphone et ordinateur**  
 – Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et Aspirations ».

En 2019, le smartphone s'impose comme l'équipement privilégié pour se connecter à Internet (51 % des Français, +9 points, contre 31 % pour l'ordinateur, -7 points).

**Figure 1 – Equipement le plus utilisé pour se connecter à Internet**  
 – Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



**51%**

(+ 9 points par rapport à 2017)



**31%**

(- 7 points par rapport à 2017)



**6%**

(- 1 point par rapport à 2017)

Source : CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et Aspirations ».

Si 88 % des Français âgés de 12 ans au moins sont des internautes, l'utilisation d'Internet recule pour la première fois d'une année sur l'autre (89 % en 2018). C'est aussi le cas de l'utilisation quotidienne qui baisse de deux points (78 %).

**Graphique 2 – Taux de pénétration d’Internet dans la population –**

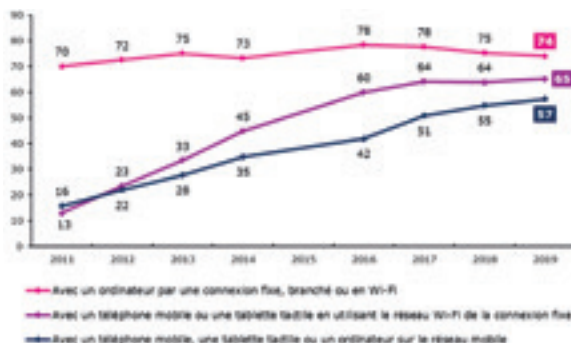
– Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et Aspirations ».

**Graphique 3 – Les différents modes de connexion à Internet à domicile**

– Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et Aspirations ».

Les modes de connexion continuent cependant à évoluer vers davantage de mobilité y compris à domicile : on observe en effet un recul de la connexion fixe via l’ordinateur (74 %, -1 point) mais une augmentation de la connexion sur réseau mobile via le smartphone et la tablette (+57 %, +2 points).

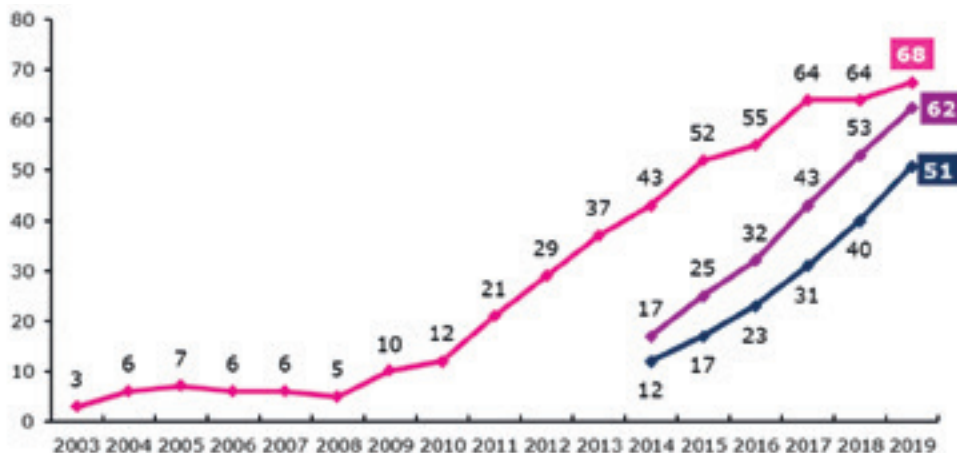
**Deux services en croissance très rapide : la vidéo à la demande et les messageries instantanées**

La souscription à un abonnement SVOD progresse fortement (+11 points entre 2018 et 2019) pour atteindre 36 % de la population.

Les usages du mobile liés à Internet sont, également, en expansion : 68 % de la population utilise un téléphone pour naviguer sur Internet (+4 points), 62 % des Français envoient des messages (+9 points) et 51 % téléphonent via des applications (+11 points).

**Graphique 4 – Proportion de la population qui utilise un téléphone mobile pour ...**

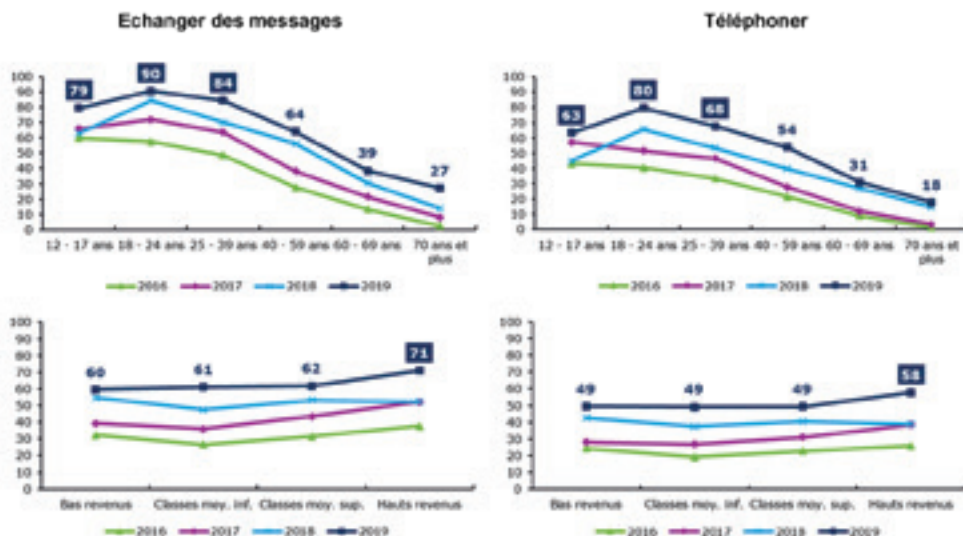
– Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et Aspirations ».

### Graphique 5 – Utilisation des messageries instantanées pour différents usages selon l'âge et le niveau de revenus

– Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et Aspirations ».

Si l'engouement pour les messageries instantanées progresse chaque année depuis 2016 et s'avère partagé par toutes les catégories de la population, les jeunes sont les principaux utilisateurs de ces nouveaux modes de communication. Les plus fortes hausses sont toutefois observées en 2019 chez les personnes disposant de hauts revenus (+20 points, échanger des messages et téléphoner) et chez les personnes de plus de 70 ans (+13 points, échanger des messages).

### Graphique 6 – Utilisation des navigateurs préinstallés et appétence des internautes pour d'autres navigateurs

– Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –

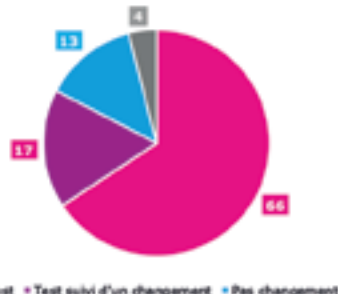
#### Le navigateur utilisé le plus fréquemment était-il préinstallé ?

- Champ : ensemble de la population de 12 ans et plus possédant un smartphone en % -



#### Répartition des détenteurs de smartphone selon qu'ils ont testé ou non un autre navigateur

- Champ : ensemble de la population de 12 ans et plus possédant un smartphone en % -



Source : CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et Aspirations ».

### Graphique 7 – Importance accordée à la possibilité de transférer des données (contacts, photos, etc.) et applications lors d'un prochain achat de smartphone

Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquête sur les « Conditions de vie et les Aspirations », juin 2019

## Le smartphone : des choix contraints en matière de systèmes d'exploitation et d'applications

Si l'offre en matière de smartphones est large (Apple, Google, Huawei, Honor, Samsung, Wiko...), deux systèmes d'exploitations seulement en équipent la quasi-totalité : Android (Google) pour 77 % des interrogés et iOS (Apple) pour 22 % d'entre eux.

Chaque smartphone possède un navigateur par défaut : Google Chrome pour Android et Safari pour iOS. Chrome domine le marché des navigateurs mobiles en équipant 65 % des téléphones, tandis que la part de marché de Safari s'élève à 18 %. 80 % des détenteurs de smartphone utilisent le navigateur préinstallé et les deux tiers n'en ont pas testé d'autres. En revanche, pour les 30 % en ayant testé un autre, plus de la moitié en ont changé.

S'agissant de la portabilité des données et des applications d'un smartphone à l'autre, 73 % des détenteurs de ces équipements considèrent qu'elle est importante ou très importante.

## La télévision permet de mieux suivre et de mieux comprendre l'actualité qu'Internet

Malgré quelques inquiétudes, notamment en matière d'environnement, les Français portent une appréciation plutôt positive sur l'incidence des technologies du numérique dans leur quotidien. Avoir accès à Internet est une condition perçue comme de plus en plus souvent nécessaire pour se sentir intégré dans la société.

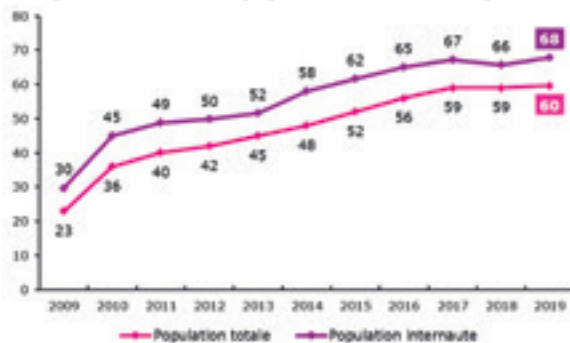
Avec 60 % des répondants qui en sont utilisateurs, les réseaux sociaux croissent légèrement (59 % en 2018, +1 point).

Télévision et Internet occupent les premières places du classement des médias que ce soit pour suivre l'actualité (respectivement 48 % et 19 % de citations) ou la comprendre (40 % et 22 %). Les réseaux sociaux, en revanche, sont loin d'être un média de référence en la matière puisque seuls 4 % des répondants affirment qu'ils permettent de mieux comprendre l'actualité.

Les moins de 40 ans se tournent cependant plus volontiers vers Internet et les plus 12-24 ans vers les réseaux sociaux. Pour 23 % des 12-17 ans les réseaux sociaux sont le média qui permet le mieux de *suivre* l'actualité et 38 % des 18-24 ans citent Internet avant la télévision.

### Graphique 8 – Proportion d’individus ayant utilisé un réseau social au cours des 12 derniers mois

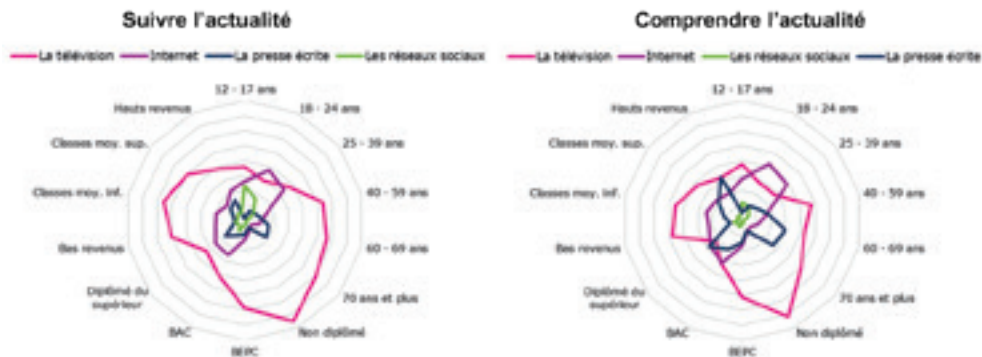
Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquête sur les « Conditions de vie et les Aspirations ».

### Graphique 9 – Média qui permet le mieux de ...

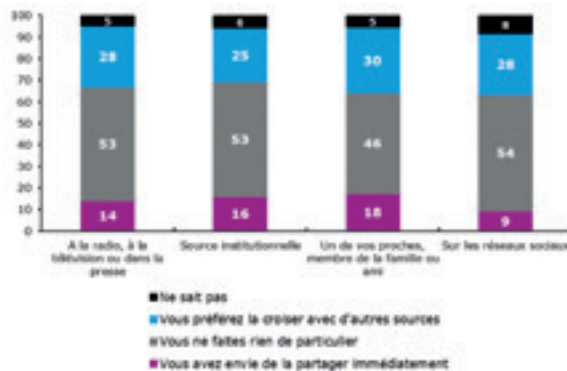
– Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et Aspirations ».

### Graphique 10 – Réactions face à une information étonnante rapportée par différentes sources

Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquête sur les « Conditions de vie et les Aspirations », juin 2019

Quand il s'agit de réagir vis-à-vis d'« informations étonnantes », le scepticisme à l'égard des réseaux sociaux est particulièrement fort. Ainsi 9 % seulement des personnes interrogées disent avoir envie de partager immédiatement une telle information vue sur les réseaux sociaux contre 14 % quand celle-ci a été rapportée par un média traditionnel, 16 % par une source institutionnelle et 18 % par un proche.

Les personnes optimistes sont les plus disposées à partager des informations étonnantes. Ainsi, les individus qui pensent que leurs conditions de vie vont s'améliorer dans les cinq prochaines années sont 18 % à vouloir partager ces informations lorsqu'elles sont communiquées par la radio, la télévision ou la presse, 21 % lorsqu'elles le sont par des personnes proches et 12 % par les réseaux sociaux.

## Des impacts ressentis positivement sauf en matière d'environnement

**Graphique 11 – Se sentir prêt pour adopter de nouvelles technologies ou de nouveaux services numériques**

Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquête sur les « Conditions de vie et les Aspirations ».

63 % de la population affirment qu'Internet et les technologies de l'information ont un impact positif sur leur vie privée. 71 % des actifs occupés mentionnent un impact positif sur leur vie professionnelle. Le numérique est ressenti comme un vecteur de sociabilité : 51 % des répondants ont retrouvé d'anciennes connaissances grâce à Internet (+11 points depuis 2014), 44 % ont noué de nouvelles amitiés (+17 points) et 15 % ont fait des rencontres amoureuses (+5 points). Le corolaire de ces nouvelles formes de socialisation est qu'il devient de plus en plus crucial d'être connecté pour se sentir intégré à la société (68%, +3 points en un an, +14 points en dix ans).

**Graphique 12 – Perception des ordinateurs et d'Internet comme une menace ou une chance**  
– Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et Aspirations ».



On observe cependant une polarisation des opinions des Français vis-à-vis de la transition numérique. 28 % de la population ne se sent pas disposée à adopter de nouvelles technologies ou de nouveaux services numériques (+5 points par rapport à 2017), tandis que, dans le même temps, la proportion d'individus prêts à embrasser le changement numérique immédiatement progresse de 3 points (27 %, +3 points). L'âge joue un rôle particulièrement important dans cette polarisation : les 18-24 ans sont 39 % à se sentir prêt à adopter de nouvelles technologies ou de nouveaux services numériques immédiatement (+15 points), alors que les 40-59 ans sont plus d'un quart (26 %) à ne pas vouloir s'engager sur cette voie (+8 points).

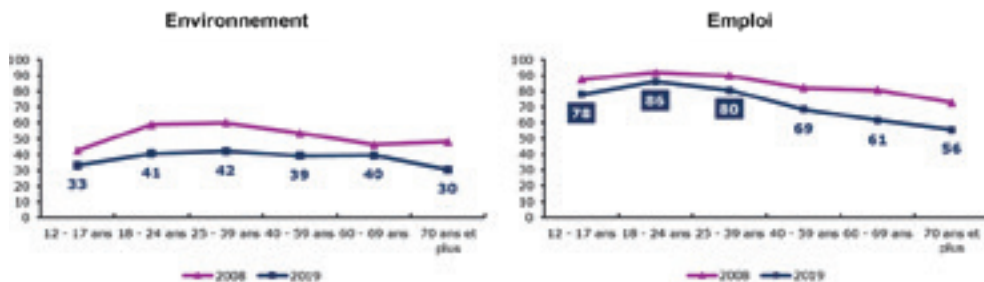
S'agissant des objets connectés, 9 % de la population affirme déjà posséder une enceinte connectée mais plus des deux-tiers des Français ne comptent pas utiliser d'objets connectés dans le futur.

Cette position se démarque du relatif optimisme des Français concernant l'impact du numérique sur l'emploi et l'éducation, et ce, malgré le recul enregistré en dix ans sur ces indicateurs.

Pour une large majorité des Français, le numérique est une chance pour l'éducation et la formation (70 %), l'emploi (70 %) et la création artistique (66 %). Cependant, la part de ceux qui jugent l'impact du numérique sur l'emploi comme une chance recule fortement (-14 points par rapport à 2008).

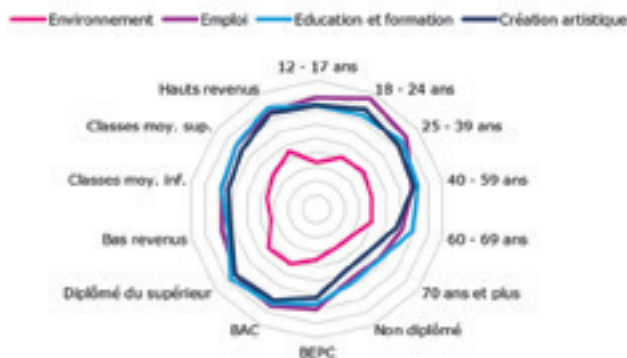
L'impact négatif du numérique sur la protection de l'environnement est en revanche bien affirmé : 38 % seulement des personnes pensent que les technologies numériques représentent une chance pour l'environnement (-15 points par rapport à 2008). Les 18-24 ans et les 25-39 ans sont ceux qui ont

**Graphique 13 – Perception des ordinateurs ou d'Internet comme une chance pour l'environnement et l'emploi selon l'âge**  
 – Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et Aspirations ».

**Graphique 14 – Perception des ordinateurs ou d'Internet comme une chance pour l'environnement, la création artistique, l'éducation & la formation et l'emploi selon l'âge, le diplôme et le niveau de revenus**  
 – Champ : Ensemble de la population de 12 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquête sur les « Conditions de vie et les Aspirations », juin 2019

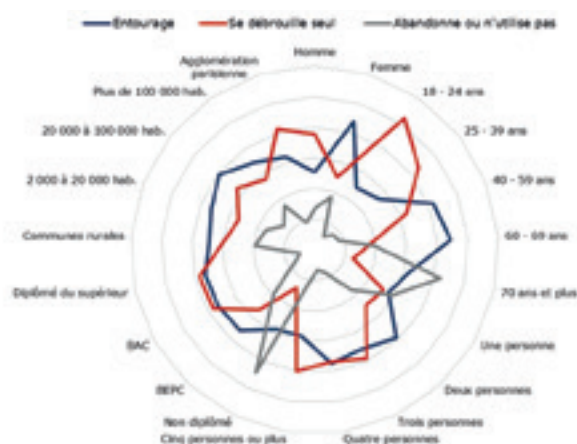
le plus évolué dans leur perception (-19 points pour les 18-24 ans et -18 points pour les 25-39 ans). Face aux inquiétudes croissantes concernant l'impact du numérique sur l'environnement, les Français semblent prêts à faire des efforts : 80 % d'entre eux envisagent de diminuer l'impact de leurs équipements sur l'environnement (par exemple en les gardant plus longtemps ou en achetant des équipements d'occasion ou reconditionnés) et 69 % de réduire l'impact de leurs usages (par exemple en privilégiant le téléchargement de contenu plutôt que le streaming). De la même manière, une majorité de la population affirme être prête à accepter un supplément de prix de l'ordre de 5 % pour diminuer la consommation électrique de leur ordinateur et pour favoriser leur recyclage (respectivement 70 %, +5 points par rapport à 2009 et 73 %, +8 points).

## Le rôle du numérique dans l'évolution des relations avec les administrations publiques

De nombreuses démarches sont accessibles en ligne : parmi les 434 services en ligne listés sur le site Service-Public.fr<sup>(4)</sup>, on retrouve notamment les services de l'administration fiscale, les aides sociales, les demandes de permis de conduire, etc.

La part des personnes qui n'utilisent jamais ces outils ou qui abandonnent à la moindre difficulté baisse un peu (16 %, contre 18 % l'an dernier). 4 adultes sur 10 se débrouillent seuls ou n'ont pas de difficultés particulières. Face à une difficulté, les personnes préfèrent se faire aider (44 %), de préférence par un proche (35 %).

**Graphique 15 – Caractéristiques socio-démographiques des personnes ayant déclaré abandonner ou ne pas utiliser, demander de l'aide à son entourage ou se débrouiller seules face à une difficulté lors de l'utilisation d'outils informatiques et numériques selon le sexe, l'âge, la taille du foyer, le diplôme et la taille de l'agglomération**  
– Champ : ensemble de la population de 18 ans et plus, en % –



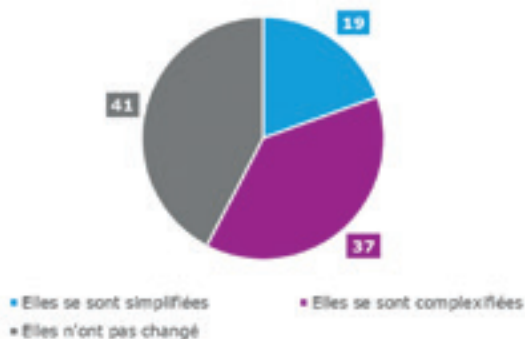
Source : CREDOC, Enquête sur les « Conditions de vie et les Aspirations », juin 2019

Un adulte sur trois seulement ne voit aucun frein à la réalisation des démarches administratives en ligne. Pour les autres, les difficultés d'utilisation de l'informatique et d'Internet (16 % des premières réponses), la complexité des démarches administratives en elles-mêmes (11 %), le défaut de conception des sites (10 %) et l'absence d'un interlocuteur susceptible de porter assistance (10 %) sont principalement cités comme des freins aux démarches en ligne.

(4) <https://www.service-public.fr>

### Graphique 16 – Perception de l'évolution des relations avec les administrations publiques ces dernières années

Champ : Ensemble de la population de 18 ans et plus, en % –



Source : CREDOC, Enquête sur les « Conditions de vie et les Aspirations ».

Seule une minorité des adultes interrogés (19 %) déclarent que les démarches administratives se sont simplifiées. A l'inverse, 37% d'entre eux considèrent qu'elles se sont complexifiées.

### Conclusion

Il est notable de constater que si la mobilité des usages et certains services comme les messageries instantanées, la vidéo à la demande et les réseaux sociaux continuent de progresser, les personnes interrogées expriment parfois un désenchantement, des frustrations et des craintes vis-à-vis du numérique, dont elles reconnaissent par ailleurs l'incidence globalement positive sur leur vie privée et professionnelle. Le baromètre du numérique permet d'apporter un éclairage sur ces points particuliers.

# RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

## Le nucléaire civil, enjeux et débats

### Introduction

Richard LAVERGNE

### État des lieux

Évolution du cadre d'activité de la filière de l'électronucléaire au niveau mondial : de 1950 à aujourd'hui

Marc DEFFRENNES et Daniel IRACANE

Quelle place pour le nucléaire dans des marchés électriques libéralisés ?

Patrice GEOFFRON



Janvier 2020

### Aspects industriels et technologiques

The Nuclear Mission in an Integrated, Carbon-Free Energy Future

Sherry BERNHOFT, Andrew SOWDER and Robert AUSTIN

Réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération. Éléments d'analyse des technologies et perspectives - Didier PILLET

Nuclear Power in a Clean Energy System - Keisuke SADAMORI

Les enjeux du renouvellement du parc nucléaire - Valérie FAUDON

Les leviers industriels de la compétitivité du nucléaire - Xavier URSAT

Approvisionnement en uranium et métaux stratégiques pour le nucléaire : dépendance ou faux problème ? Philippe KNOCHÉ

Le rôle du nucléaire dans les scénarios de décarbonation du mix européen à l'horizon 2050

Fabien ROQUES et Yves LE THIEIS

Que s'est-il passé à Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima Daiichi ? Et où en est-on aujourd'hui ?

Jean-Christophe NIEL et Jean COUTURIER

The Competitiveness of Nuclear Energy: From LCOE to System Costs

Jan Horst KEPLER and Marco COMETTO

Coûts du nouveau nucléaire et éclairages sur l'économie du cycle

Jean-Guy DEVEZEUX DE LAVERGNE et Michel BERTHÉLEMY

La gestion des déchets radioactifs en France et dans le monde

Pierre-Marie ABADIE

Une gestion conjointe du nucléaire et des énergies renouvelables variables pour une économie bas carbone - Alain BURTIN

### Débats et politiques

La gestion des déchets nucléaires - Laurent MICHEL et Aurélien LOUIS

Les enjeux du contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France - Bernard DOROSZCZUK et Lydie ÉVRARD

Vers une convergence internationale des réglementations en matière de sûreté nucléaire ? Anne-Cécile RIGAIL et Julien COLLET

Comment développer la transparence et la participation dans le domaine du nucléaire civil ? Jean-Claude DELALONDE

Peut-on surmonter la peur du nucléaire ? Myrto TRIPATHI

Une filière nucléaire française en transition - Augustin BOURGUIGNAT

La dimension stratégique du nucléaire civil

Marc-Antoine EYL-MAZZEGA

Comment parler du nucléaire en France ?

Entretien avec Pierre-Franck CHEVET et Hervé MARITON

Témoignage du maire d'une commune accueillant une centrale nucléaire Bertrand RINGOT

La fin de l'électronucléaire – Récit anticipatif - Bernard LAPONCHE

Le dossier a été coordonné par Richard LAVERGNE

Ce numéro peut être consulté et téléchargé gratuitement sur notre site

<http://www.annales.org>

# Résumés

## 08 Cadres et instruments juridiques des fréquences

Olivier JAPIOT et Eddie TADEJ

Les fréquences radioélectriques constituent une ressource naturelle limitée dont l'exploitation par de nombreux acteurs publics et privés s'intensifie pour accompagner le développement des technologies sans fil. En outre, les ondes ignorent les frontières, ce qui nécessite une étroite coordination internationale afin d'éviter les brouillages. Cette double spécificité explique la particulière prégnance du droit international et du rôle de l'Union internationale des télécommunications (UIT), en particulier de son Règlement des radiocommunications (RR), qui définit – au niveau mondial – les principales modalités d'utilisation des bandes de fréquences. Le droit de l'Union européenne, pour sa part, porte essentiellement sur l'harmonisation des régimes d'autorisation de fréquences. Le cadre juridique français, enfin, est fondé sur le principe selon lequel les fréquences radioélectriques appartiennent au domaine public de l'Etat, qui en définit l'utilisation dans un cadre international et européen précis et contraignant. La gestion des bandes de fréquences est confiée à l'Agence nationale des fréquences (ANFR) qui en coordonne l'utilisation par des affectataires publics.

## 13 Le cadre mondial de la gestion des fréquences : réglementation et normalisation

François RANCY

Le spectre des fréquences radioélectriques constitue la ressource rare qui sous-tend la plupart des applications dont nos sociétés sont devenues largement dépendantes en quelques décennies. Sa gestion repose sur un système de règles et de normes internationales qui sont adoptées dans le cadre de l'Union internationale des Télécommunications (UIT) à travers un processus conduit par les États Membres de l'UIT et associant étroitement les principales parties prenantes dans l'utilisation du spectre (opérateurs, industriels, organisations internationales et sectorielles). Ce processus vise à construire un consensus régional et mondial sur la meilleure façon de gérer le spectre, en faisant évoluer conjointement les cadres nationaux et international de manière à les adapter à l'évolution rapide des technologies et des usages, sans pour autant mettre en danger les investissements réalisés précédemment. Ce processus de production de règles et de normes d'application universelle, en place depuis 113 ans, a permis le développement de l'écosystème des radiocommunications tel que nous le connaissons aujourd'hui.

## 19 Le cadre régional de la gestion des fréquences en Europe, un niveau élevé d'harmonisation, par la coopération entre l'UE, la CEPT et l'ETSI

Eric FOURNIER

Le cadre régional de la gestion des fréquences s'insère entre le cadre mondial de l'UIT, qui fixe les règles pour éviter les brouillages des stations des autres Etats, et le cadre national, souverain pour gérer le spectre à l'intérieur des frontières et pour autoriser l'utilisation des fréquences. Il permet une harmonisation des fréquences indispensable pour les économies d'échelle, le fonctionnement du marché unique, et la bonne efficacité du spectre aux frontières. L'harmonisation européenne porte à la fois sur l'utilisation des fréquences et

sur la mise sur le marché des équipements. Au niveau institutionnel, elle s'appuie sur une coopération étroite entre la CEPT, qui étudie la compatibilité entre usages et qui harmonise l'utilisation des fréquences, l'ETSI, qui développe les normes harmonisées, et l'Union européenne, qui peut imposer les mesures d'harmonisation et les règles de fonctionnement du marché intérieur. La coopération régionale permet aussi de gérer les questions d'accès équitable au spectre aux frontières et d'élaborer des propositions communes pour les conférences de l'UIT.

## 25 La gestion nationale

Gilles BRÉGANT

Le spectre, ressource vulnérable, exige une gestion attentive. En France, la gestion du spectre est assurée par l'Agence nationale des fréquences, en concertation avec les onze affectataires du spectre. Elle comporte trois facettes complémentaires. Tout d'abord, le tableau national de répartition des bandes de fréquences, synthèse entre les négociations internationales sur l'évolution de l'usage des bandes et les besoins des acteurs nationaux, fait l'objet d'actualisations régulières, puis est approuvé par le Premier ministre. Les affectataires recueillent ensuite des projets d'émetteurs, qui sont autorisés par l'ANFR après consultation, puis consignés dans un cadastre numérique. Les droits d'émission ainsi acquis font l'objet d'une coordination aux frontières. Enfin, le contrôle du spectre permet de remédier aux brouillages, tandis que la conformité des terminaux est évaluée par des sondages réguliers. La technicité de ces missions s'accroît régulièrement avec le recours croissant au partage du spectre, à des gammes de fréquences plus élevées et des émetteurs plus nombreux, ce qui requiert une évolution continue des compétences et des outils de l'ANFR.

## 30 Le contrôle du spectre

Nicolas SPANJAARD-HUBER

Le contrôle des fréquences constitue la dernière phase de leur gestion. Il s'agit d'une part d'en vérifier l'utilisation conforme à la réglementation et d'autre part d'éliminer les brouillages qui peuvent se produire malgré toutes les précautions prises. Le contrôle constitue donc le service après-vente permettant de garantir aux utilisateurs autorisés la disponibilité effective des fréquences qui leur sont attribuées. La tâche est d'autant plus nécessaire et ardue que l'utilisation du spectre est de plus en plus intensive. Il est en effet devenu difficile d'identifier une activité humaine qui ne fasse pas appel à la radioélectricité. Cet article décrit les différentes facettes du contrôle des fréquences, qu'il s'agisse du contrôle préventif (conformité à la réglementation) ou du contrôle curatif (élimination des brouillages). Il donne aussi un bref aperçu des méthodes et moyens techniques utilisés.

## 35 Spectrum economics: serving public policies

Gérard POGOREL

Since the 1990s, economic approaches and assessments have played an increasing role in policies for managing the radio-frequency spectrum. Along with stiffer competition in telecommunications, they have generated considerable benefits for citizens, consumers, industry and governments in Europe and the world. More recently, as concerns have grown about the relatively slow speed of the deployment of 4G networks and fears arisen about a repetition of these delays during the deployment of 5G, the ability of these economic and financial approaches to provide the guiding principles for a spectrum



policy has come under question. This “spectrum economics” is examined, specifically the policies for assigning bandwidths. Examples of policy decisions with an impact on market developments along with evidence drawn from recent in-depth studies lead us to reconsider the principle that auctions are the most effective means for promoting competition and driving investment. We are also led to question another principle, namely: that the amount of revenue raised through an auction of bandwidths is overriding proof of the auction’s success. After reviewing analyses of the causal relations and trade-offs between various methods for assigning bandwidths and setting fee structures, guidelines are suggested for a more effective, balanced approach to bandwidth assignments that would better align the award process with broader, economic and societal, objectives.

#### 41 **La valeur patrimoniale du spectre radioélectrique**

Olivier COROLLEUR

L’objectif de cette contribution est d’illustrer, par quelques exemples, les multiples dimensions de la valeur du spectre radioélectrique et les différents travaux sur lesquels repose sa valorisation. Tout comme d’autres actifs environnementaux, le spectre ne répond en effet pas à un mais à de multiples besoins simultanés. La concurrence d’usages marchands et non marchands, la portée, parfois mondiale, des décisions prises pour sa gestion, la nécessité de prendre en compte, au-delà de sa valeur d’usage actuel, sa valeur de préservation (pour prendre en compte les usages futurs ou le souhait d’une partie de la population de limiter au maximum l’exposition aux ondes électromagnétiques) constituent autant de défis pour les instances qui participent à la régulation de ce bien commun.

#### 47 **Radiofréquences et santé**

Olivier MERCKEL

La recherche des effets potentiels sur la santé de l’exposition aux radiofréquences semble suivre, de façon plus ou moins organisée, et avec plus ou moins de retard, l’évolution des technologies. Si les grandes questions abordées dans les années 2000 au plus fort du déploiement des réseaux mobiles, au premier rang desquelles l’interrogation concernant le risque de tumeurs cérébrales associé à l’usage du téléphone, ont pu sembler un temps pratiquement résolues, des résultats de recherche récents, ainsi que le changement d’échelle dans la connectivité, et donc potentiellement dans notre exposition aux ondes électromagnétiques, relancent la nécessité d’évaluer les risques associés. En particulier, les recherches menées sur les liens entre exposition aux ondes et fonctionnement cérébral, si elles ne révèlent pas d’effet pathologique, semblent ouvrir des voies intéressantes pour explorer la compréhension des interactions entre les champs électromagnétiques et le vivant.

#### 55 **Les fréquences de l’IoT : un nouveau paradigme pour les ingénieurs radio**

Benoît PONSARD

L’Internet des Objets va généraliser l’usage de liens radio pour connecter des objets de natures très variées. Cependant, ces nouveaux usages apportent de nouvelles contraintes sur la radio : de petits messages peu fréquents émis par des millions d’objets ne se gèrent pas comme le téléchargement de films ou les jeux en ligne. L’IoT impose donc de repenser le partage du spectre radioélectrique et d’adapter, en conséquence, les protocoles de communication. C’est la voie inventée par le réseau Sigfox et sa technologie radio à bande aléatoire ultra étroite. Ce nouveau paradigme est aussi pris en compte par l’IoT cellulaire et l’IoT satellitaire. Dans tous les cas, la quantité de spectre nécessaire à l’IoT est faible en

comparaison des autres usages. C'est pourquoi il n'est pas impensable d'avoir, à terme, une bande radio dédiée à l'IoT. Avec une harmonisation mondiale, cette bande radio dédiée sera favorable à l'émergence de solutions globales pour l'Internet des Objets.

## 60 5G Connectivity

Roberto VIOLA

The article highlights the importance of 5G Connectivity in the EU policy context as highlighted by European Commission's 5G Action Plan. Without first-class communication networks, there will be no Digital Single Market. The Commission initiated visionary EU-funded research activities already in 2012, which led to the setup of the European 5G Public Private Partnership (5G PPP). In this context, an important policy objective of the Commission is pursuing its 5G spectrum roadmap, which has taken on board the view of the Member States, and serves the Gigabit connectivity targets of the Union. In order to make 5G deployment a success, it is essential to set the conditions ensuring timely access to the appropriate spectrum and allowing for the necessary investment in high-capacity networks. The European Electronic Communications Code promotes a more flexible and dynamic access to spectrum, through trading and leasing, but also sharing solutions, notably with regard to the spectrum licensing. However, the current availability of spectrum for 5G in all bands, low, mid and high, is still a challenge in Europe. Whereas the 700 MHz band has already been harmonised at EU level, there are also a legal obligations to assign upper bands in all Member States by end of 2020. The Commission will insist on the 2020 deadline and consider derogations only in very exceptional cases and if fully justified. We may not compromise 5G deployment and services take-up to the benefit of industry, society and the environment by the short-sighted objective of maximising auction revenues. While health matters remain a national competence, we need to engage with all relevant authorities to ensure that all decisions regarding radio exposure limits that go beyond the European and international precautionary levels are made in full knowledge of the evidence and of the likely consequences. The European Commission is following the developments, attentive to address important horizontal topics of efficient and sustainable spectrum management, establishing a favourable mind set to spectrum sharing - both by regulators and industrial players -, as well as contributing to the green transformation of other economic sectors. These topics should underlie a longer-term European spectrum strategy.

## 64 Plateformes à haute altitude

Christine MENGELLE

Utilisées initialement à des fins essentiellement scientifiques, les plateformes à haute altitude ont suscité un intérêt croissant depuis la fin des années 1990, comme complément de connectivité radio des réseaux terrestres et à satellites. Positionnées au-dessus du trafic aérien commercial et des courants-jets, facilement déployables et nécessitant une infrastructure de réseau et une maintenance au sol minimales, elles offrent en plus une large zone de couverture associée à une très faible latence. Les plateformes à haute altitude sont donc particulièrement intéressantes pour assurer des opérations de surveillance civiles et de défense, ou de télécommunication dans des zones isolées géographiquement ou suite à un cataclysme. Les progrès technologiques et la mise en place d'un cadre réglementaire propice par les Conférences mondiales des Radiocommunications (CMR) successives depuis 1997 permettent d'envisager le déploiement à court terme de projets de stations à haute altitude.

## 67 Constellations de satellites

François RANCY

Dès les premières années de l'ère spatiale, les satellites géostationnaires (GSO) se sont imposés pour la fourniture de services commerciaux de télécommunications spatiales, pour des raisons économiques, vite redoublées par une priorité réglementaire internationale, le No. 22.2 du Règlement des radiocommunications de l'UIT (RR). Au début des années 90, l'apparition de projets de constellations de plusieurs dizaines de satellites non-géostationnaires (NGSO) qui visaient à fournir l'équivalent d'un service mobile cellulaire avec téléphones portables, amena les Conférences mondiales des Radiocommunications (CMR) de l'UIT successives, de 1992 à 1997, à définir un cadre réglementaire adapté à cette demande avec l'attribution de quelques centaines de mégahertz et des procédures d'accès au spectre fondées sur le principe du premier-arrivé-premier servi. Dès 1995, des projets de plusieurs centaines de satellites NGSO virent le jour avec l'ambition d'offrir à tous les pays de la planète l'accès fixe à Internet. Ils firent valoir des demandes en spectre de plusieurs gigahertz qui ne purent être satisfaites aux CMR-97 et 2000 qu'en adoptant, au prix des plus grandes difficultés, une approche globale remplaçant le No. 22.2 par un système de limites contraignantes et vérifiables protégeant l'intégralité du spectre partagé avec les systèmes GSO. Au début des années 2000, la crise des valeurs technologiques fit que ces projets ne se réalisèrent pas. Aujourd'hui, les progrès de la technologie et les décisions de l'UIT prises vingt ans plus tôt font que des constellations de plusieurs milliers de satellites NGSO sont en cours de déploiement. C'est un des rares exemples où la réglementation mondiale a précédé la technologie.

## 72 L'utilisation des fréquences radioélectriques pour l'observation de la Terre

Dominique MARBOUTY

Les fréquences radioélectriques sont très largement utilisées pour l'observation de la Terre, en particulier par satellite. On décrit ici le mécanisme de ces mesures et leur impact sur la prévision météorologique. On explique comment la décision prise d'attribuer à la 5G une bande de fréquences très proche d'une bande d'absorption de la vapeur d'eau, cruciale pour ces mesures, risque de mettre l'observation de la Terre en danger.

## 78 Les besoins actuels et futurs en fréquences pour les armées : un défi stratégique pour la France

Jérôme BORDELLÈS et Mickaël ULVOA

Pour rester compétitives face à un ennemi qui exploite les potentialités numériques, les armées se modernisent en acquérant des équipements innovants, afin de mettre en œuvre le concept de combat collaboratif, reposant sur une connectivité accrue et sur une large utilisation du spectre fréquentiel. C'est le cas des programmes majeurs (comme SCORPION pour l'armée de Terre), ou encore de la démarche capacitaire de l'armée de l'Air avec le Système de Combat aérien du Futur (SCAF). Cette évolution est caractérisée par la recherche du très haut débit et d'une faible latence (comme l'exige le combat aéronaval) et s'appuiera sur tout type de support radio électrique ou sur des constellations de satellites (MEO/LEO) et sur les HAPS. La représentation de la situation tactique en temps réel permise par cette connectivité repose sur de nombreux capteurs d'information comme les satellites d'observation, les drones, sur les liaisons de données inter-plateformes et sur des moyens

de détection plus performants, comme les futurs radars postés sur les Frégates de Défense et d'Intervention, entièrement numériques et capables de conduire les missiles dans des environnements hostiles. Ainsi, la boucle de décision sera d'autant raccourcie, face à toute menace, y compris celle des missiles hyper-véloces. Dépendantes de l'emploi d'un spectre fréquentiel de plus en plus contraint, les armées doivent enfin développer une résilience au brouillage du spectre : manœuvre délicate mais ô combien stratégique !

## 89 La couche physique : un élément-clé des réseaux sans fil

Philippe CIBLAT et Alain SIBILLE

Le succès des réseaux sans fil depuis les années 90 repose largement sur la technologie numérique et sur le concept de réseau cellulaire, qui permettent une utilisation efficace de la ressource spectrale tenant compte des lois fondamentales de l'électromagnétisme. Cette utilisation a énormément progressé depuis 40 ans, grâce à la mise à disposition de plus en plus de spectre, en relation avec une grande diversification des usages. Le présent article se concentre sur la « couche physique » du « modèle OSI » [ROLI2016], modèle sur lequel l'architecture des réseaux est fondée depuis les années 1970. La couche physique s'intéresse à la transmission et à l'émission des signaux issus du monde physique dans le milieu de propagation au travers d'une antenne, ainsi qu'à l'opération inverse en réception. Les caractéristiques de la couche physique sont en effet déterminantes pour la performance des réseaux sans fil, conditionnant la couverture des territoires comme la capacité à assurer un service donné.

## 94 Les outils techniques de la gestion des fréquences

Yann MAIGRON

Le spectre radioélectrique est au cœur de l'activité économique des sociétés numériques modernes mais également d'enjeux sociaux, culturels et politiques de premier plan. Or, ses ressources sont limitées et doivent être partagées entre l'ensemble des pays et une grande variété d'usages et de services. La gestion des fréquences radioélectriques s'est donc très rapidement avérée indispensable, au niveau supranational et au niveau national, pour garantir la qualité de la ressource spectrale et prévenir les brouillages. Des procédures ont ainsi été élaborées par l'Union internationale des télécommunications puis déclinées au niveau des Etats pour garantir aux utilisateurs un accès efficace au spectre. Leur mise en œuvre mobilise aujourd'hui des capacités de traitement et de partage des données, des méthodes d'analyse et des outils techniques qui devront, demain, évoluer pour faire face aux défis que la prolifération de nouvelles technologies et de nouveaux services impose à la gestion du spectre.

## 98 L'évolution de la télévision et de son usage des fréquences

Walid SAMI

La télévision a beaucoup évolué avec les changements technologiques, en particulier dans les deux dernières décennies. D'un usage collectif, la télévision se consomme de plus en plus de façon individuelle avec des appareils personnels connectés, surtout chez les jeunes adultes. Le contenu se diversifie et la possibilité est donnée au téléspectateur de sélectionner le contenu qu'il veut, où il veut et quand il veut, par une multitude de modes de diffusion et de modèles économiques, profitant du développement de l'Internet fixe et mobile. D'un autre côté, la pression sur les fréquences a déjà fait perdre à la diffusion terrestre une partie importante du spectre qui lui était initialement réservé. Toutefois, la consommation

d'un contenu linéaire sur un poste de télévision qui reçoit gratuitement le signal hertzien simple bien résister et justifier la continuation d'une plateforme de diffusion terrestre – et même son évolution – pour s'adapter aux nouveaux modes d'usage.

## 104 La gestion des fréquences en temps de crise

Claire LANDAIS

Les retours d'expérience des crises majeures les plus emblématiques de ces vingt dernières années ont montré que la désorganisation des moyens de communication constituait un élément majeur d'aggravation de la crise, que ce soit pour la réponse de l'Etat ou pour les capacités des populations à appeler les services de secours, la sécurité publique et leurs proches. Les fréquences radio sont de plus en plus utilisées, par la téléphonie mobile GSM, par les émetteurs récepteurs radio (PR4G pour les armées, ACROPOL pour la police nationale, ou ANTARES pour les services de secours). Les fréquences sont des ressources rares et le besoin de pouvoir les réallouer plus rapidement est avéré en cas de maintien du niveau élevé de menace d'attentat terroriste sur le sol français. C'est pourquoi un arrêté du Premier ministre a été édicté afin de permettre l'affectation exceptionnelle de fréquences additionnelles au profit des ministères de l'intérieur et des armées, en cas de menace.

## 108 Police du spectre, brouillage offensif, brouillage non intentionnel. Sécurisation du spectre, cyber-sécurité et guerre électronique : même combat ?

Catherine GABAY

Les menaces que les brouillages, offensifs ou non intentionnels, font peser sur tous les secteurs de l'économie et de l'Etat n'ont rien à envier aux menaces liées aux attaques informatiques. Les brouillages entravent voire empêchent toutes les utilisations des fréquences perturbées dans un périmètre donné, pouvant compromettre tous types d'applications. La sécurisation du spectre est un enjeu de souveraineté. Pour prévenir et résoudre les cas de brouillages, il faut une police du spectre des radiofréquences. L'Agence nationale des fréquences (ANFR) joue ce rôle dans le cadre de ses missions de contrôle du spectre avec plus de 1400 brouillages préjudiciables qui lui sont signalés chaque année. Afin de faire face aux défis posés par l'évolution des technologies et des usages, l'ANFR renforce continuellement ses moyens et ses méthodes de contrôle et encourage la sensibilisation de tous les utilisateurs aux enjeux de la sécurisation de l'espace fréquentiel.

## 114 Les enjeux des fréquences pour la radioastronomie

Ivan THOMAS et Karl-Ludwig KLEIN

La radioastronomie utilise la transparence de l'atmosphère terrestre pour observer le ciel entre une dizaine de MHz et quelques THz. La sensibilité accrue des observations permet de sonder l'univers de plus en plus loin, donc de plus en plus près de sa naissance, de découvrir un univers variable au cours du temps et violent. La radioastronomie fournit ainsi des observations originales à l'astrophysique. Cette capacité se trouve contrainte, voire menacée, par l'utilisation active du spectre radioélectrique. Dans cet article, nous esquissons les contributions de la radioastronomie à la recherche astrophysique et à la technologie et les besoins de protection des fréquences dont elle a besoin.

## HORS DOSSIER

### 119 Le baromètre du numérique 2019

Gérard LALLEMENT, Matthias DE JOUVENEL et Michel SCHMITT

Depuis l'an 2000, le Conseil général de l'économie (CGE) fait réaliser chaque année une enquête sur la diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française, en liaison avec l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse depuis 2003 et avec l'Agence du numérique depuis 2016. Les accès, les équipements et les usages les plus importants sont suivis avec régularité sans que les phénomènes émergents soient négligés. La fiabilité de cette enquête repose sur des entretiens en face-à-face avec un large échantillon de personnes âgées de plus de douze ans (2259 personnes en 2019 dont 207 jeunes de moins de 18 ans) sélectionnées selon la méthode des quotas. Le sérieux et l'ancienneté de cette enquête annuelle en font le baromètre de référence. Le numérique est devenu partie intégrante de nos sociétés modernes. L'édition 2018 du baromètre du numérique avait mis en avant les craintes de la population vis-à-vis de la protection des données personnelles. Cette année, l'objectif a été d'interroger la population sur l'incidence du numérique sur leur vie personnelle et professionnelle et sur la société en général. Plus spécifiquement, ont été analysés l'évolution de la mobilité et des usages, les besoins des usagers en matière de portabilité des applications mobiles et de leurs données, la confiance dans les médias, l'incidence du numérique sur l'environnement et son rôle dans l'évolution des relations avec les administrations publiques.



# Abstracts

## 08 The legal frameworks and instruments related to radio-frequencies

Olivier JAPIOT & Eddie TADEJ

The radio-frequency spectrum is a limited natural resource that many public and private actors are putting to a more intense use to develop wireless technology. Since radio-frequencies leap over borders, tight international coordination is needed to avoid interference. These two characteristics account for the dominance of international law and the role of the International Telecommunication Union (ITU), in particular its Radio Regulations Board, which sets, at the planetary level, the principal rules for assigning bandwidths. European Union mainly seeks to harmonize systems for authorizing frequencies; and the French legal framework is founded on the principle that these frequencies belong to the public domain. The state thus regulates uses within the precise limits set by these international and European legal frameworks. The management of bandwidths lies in the hands of the Agence Nationale des Fréquences (ANFR), which coordinates uses by the parties who are assigned bandwidths.

## 13 The global framework for managing the radio-frequency spectrum: Regulation and standardization

François RANCY

The radio-frequency spectrum is a scarce resource essential to most of the applications on which our societies have come to depend within a few decades. It is managed through a system of international regulations and standards adopted by the International Telecommunication Union (ITU). This process, conducted by ITU member states, involves working closely with major stakeholders who use the spectrum (operators, industries, international and sectoral organizations). It seeks to reach a regional and worldwide consensus about the best way to manage the spectrum by modifying national and international laws and regulations so as to adapt them to the rapid evolution of technology and uses but without jeopardizing the investments already made. Thanks to this 113-year-old process for making regulations and standards with a universal scope, radiocommunications, as we know them, have developed.

## 19 The regional management of radio-frequencies in Europe, a high level of harmonization through cooperation between the EU, CEPT and ETSI

Eric FOURNIER

The regional management of radio-frequencies is part of the world organization of the International Telecommunication Union (ITU), which sets the rules for avoiding interference among the frequencies used in member states. It also fits in with the national, sovereign bodies that manage the radio-frequency spectrum within each country's borders and assigns bandwidths. This regional management allows for harmonizing bandwidths, which is indispensable for economies of scale, the operation of the European single market and the effective operation of bandwidths in border zones. Harmonization in the EU focuses on the uses of radio-frequencies and the marketing of equipment in this sector. This involves close cooperation with the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), which studies the compatibility of uses

and harmonizes frequency assignments, the European Telecommunications Standards Institute (ETSI), which drafts standards for harmonization, and the European Union, which may impose rules for harmonization in the single market. Through regional cooperation, questions about fair access to radio-frequencies in border zones are handled and joint proposals drafted for ITU conferences.

## 25 **The national management of radio-frequencies**

Gilles BRÉGANT

The radio-frequency spectrum, a vulnerable resource, requires an attentive management, which, in France, is done through the Agence Nationale des Fréquences (ANFR) and its consultations with stakeholders. By taking account both of international negotiations on changes in the uses of bandwidths and of the needs of national actors, the ANFR grants bandwidths to eleven “assignees”. The table listing assigned bandwidths is regularly updated and approved by the prime minister. These “assignees” then collect projects from “emitters”, which the ANFR, after having authorized them following consultations, will record in a digital registry. Permits for emissions are subject to coordination near the borders. This system of control settles problems of interference and regularly assesses the compliance of equipment in terminals. This work is steadily becoming more technical with growing recourse to the sharing of the spectrum, as higher frequencies are put to use and the number of emitters increases. This requires continually updating ANFR’s skills, qualifications and tools.

## 30 **Controlling the radio-frequency spectrum**

Nicolas SPANJAARD-HUBER

Control, the last phase in the management of the radio-frequency spectrum, entails checking whether uses comply with regulations and eliminating any interference that might occur despite all precautionary measures. Control is the “after-sales” service that guarantees authorized users that their assigned bandwidths are actually available. This necessary task is harder to perform as the spectrum is put to a more intensive use — we can barely mention a human activity that does not have recourse to radio waves. Various facets of this control are described, whether preventive (compliance with regulations) or remedial (elimination of interference), along with its technical means and methods.

## 35 **Spectrum economics: Serving public policies**

Gérard POGOREL

Since the 1990s, economic approaches and assessments have played an increasing role in policies for managing the radio-frequency spectrum. Along with stiffer competition in telecommunications, they have generated considerable benefits for citizens, consumers, industry and governments in Europe and the world. More recently, as concerns have grown about the relatively slow speed of the deployment of 4G networks and fears arisen about a repetition of these delays during the deployment of 5G, the ability of these economic and financial approaches to provide the guiding principles for a spectrum policy has come under question. This “spectrum economics” is examined, specifically the policies for assigning bandwidths. Examples of policy decisions with an impact on market developments along with evidence drawn from recent in-depth studies lead us to reconsider the principle that auctions are the most effective means for promoting competition and driving investment. We are also led to question another principle, namely: that the amount

of revenue raised through an auction of bandwidths is overriding proof of the auction's success. After reviewing analyses of the causal relations and trade-offs between various methods for assigning bandwidths and setting fee structures, guidelines are suggested for a more effective, balanced approach to bandwidth assignments that would better align the award process with broader, economic and societal, objectives.

#### 41 **The radio-frequency spectrum as an asset**

Olivier COROLLEUR

The many aspects of assigning a “value” to the radio-frequency spectrum are discussed along with the studies that calculate this value. Like other environmental assets, the spectrum serves not just one but many, simultaneous needs. The competition between commercial and noncommercial uses, the scope (sometimes worldwide) of the decisions made about how to manage this asset, the necessity to reckon with not just the spectrum's current use value but also its “conservation value” (which would make allowance for future uses or for the demand to limit the exposure to electromagnetic waves as much as possible)... so many challenges for the organizations that regulate this commons.

#### 47 **Radio-frequencies and health**

Olivier MERCKEL

Research on the potential health effects of an exposure to radio-frequencies has apparently followed in the footsteps of advances in technology, with more or less of a lag and in a more or less organized manner. When mobile networks were being deployed during the first decade of this century, major questions were raised (chief among them: the risk that using mobile phones would cause brain tumors) and apparently settled — for a while. Findings from recent research along with the change of scale in “connectivity” (and thus of our exposure to electromagnetic waves) have made it necessary, once again, to assess risks. In particular, research on the relation between this exposure and the functioning of the brain, though not having detected any pathological effects, seems to open new approaches to understanding the interactions between electromagnetic fields and life.

#### 55 **Radio-frequencies for the Internet of Things: A new paradigm for engineers**

Benoît PONSARD

The Internet of Things (IoT) is going to generalize the use of radio waves to connect devices of varied sorts: new uses but also new constraints. Short, infrequent messages emitted by millions of devices cannot be managed like downloads of videos or online gaming. The IoT forces us to rethink the assignment of bandwidths and adapt communication protocols. Sigfox network invented such an approach with its ultra narrowband technology, a paradigm that the cellular and satellite IoTs have taken into account. Since the radio-frequency spectrum necessary for the IoT is small in comparison with other uses, we can imagine that a bandwidth would be devoted to the IoT. Such a bandwidth, if harmonized worldwide, would be conducive to the emergence of global solutions for the Internet of Things.

## 60 5G Connectivity

Roberto VIOLA

The importance of 5G connectivity is placed in the policy context of the 5G Action Plan approved by European Commission (EC). There will be no digital single market without first-class communication networks. The Commission was already sponsoring visionary EU-funded research activities in 2012, which led to the European 5G Public Private Partnership (5G PPP). An important policy objective for the Commission is to pursue its 5G spectrum roadmap, which takes account of the views of member states and serves the EU's Gigabit connectivity targets. To make 5G deployment a success, the conditions have to be set for ensuring timely access to the appropriate part of the spectrum and mustering the investment necessary for high-capacity networks. The European Electronic Communications Code advocates a more flexible and dynamic access to the radio-frequency spectrum through trading and leasing; and it backs sharing solutions for spectrum-licensing. The available spectrum for 5G in all bands (low, mid and high) is still at issue. Whereas the EU has already harmonized the 700 MHz band, legal requirements call for assigning upper bands in all member states by the end of 2020. Insisting on this deadline, the EC considers exemptions only for very exceptional, fully justified cases. The short-sighted objective of maximizing auction revenues should not lead us to compromise the deployment of 5G. Although health remains a matter of national jurisdiction, discussions must be undertaken with all competent authorities to ensure that any decision regarding the exposure limit to radio-frequencies that goes beyond the precautionary European and international levels will be made in full knowledge of both the evidence and likely effects. The EC is following up on developments, attentive: to major horizontal topics having to do with an efficient and sustainable spectrum management; to molding an opinion among regulators and industries in favor of spectrum-sharing; and to the "greening" of other economic sectors. These topics should underlie a longer-term European spectrum strategy.

## 64 High-altitude platforms

Christine MENGELLE

Mainly used at the start for scientific purposes, high-altitude platforms have increasingly attracted interest since the 1990s as a complement to land and satellite networks. At a position above the altitude of commercial air traffic and the jet stream, such platforms — which are easy to deploy and necessitate a minimal infrastructure (networks and maintenance) on the ground — offer, in addition, a wide zone of coverage with very low latency. They are, therefore, of special interest for civil or military surveillance operations and for telecommunications in areas isolated by geography or a disaster. Technological progress and a propitious regulatory framework — established since 1997 by successive World Radiocommunication Conferences (WRCs) — open the possibility of rolling out plans for high-altitude stations in the near future.

## 67 Satellite constellations

François RANCY

Since the start of the space era, geostationary satellites (GSOs) have been used to provide commercial telecommunication services. International regulations soon caught up thanks to Radio Regulation 22.2 of the ITU. At the start of the 1990s, plans for constellations

with dozens of nongeostationary satellites (NGSOs) were made to provide the equivalent of a cellular mobile service for portable telephones. As a consequence, the ITU's World Radiocommunication Conferences (WRC), successively from 1992 to 1997, set up a regulatory framework adapted to this demand, assigned a few hundred megahertz and defined procedures for access to the radio-frequency spectrum based on the "first come, first served" principle. By 1995, plans for hundreds of NGSOs were being made to offer all countries on the planet access to the Internet. The WRCs in 1997 and 2000 could satisfy the subsequent requests for a spectrum of several gigahertz only by adopting (after surmounting major difficulties) a global approach that replaced Regulation 22.2 with a system that had verifiable, mandatory limits in order to protect the full spectrum shared with GSO systems. In the first years of the 21st. century, these plans lay dormant owing to the dot-com bubble. Nowadays, technological progress and the ITU's decisions from twenty years ago have set the conditions for launching constellations with thousands of NGSOs — a rare example of global regulations preceding technology.

## 72 Using radio-frequencies to observe the Earth

Dominique MARBOUTY

Radio-frequencies are heavily used to observe the Earth, in particular from satellites. This Earth watch, the measurements made and their impact are described with regard to weather predictions. The decision to assign 5G a bandwidth close to that of the absorption of water vapor (crucial for measurements) could endanger observations of the Earth

## 78 The armed forces' current and future needs of radio-frequencies: A strategic issue for France

Jérôme BORDELLÈS & Mickael ULVOA

To remain competitive in dealing with an enemy that taps digital technology's potential, armies are modernizing and acquiring innovative equipment to implement the concept of "collaborative combat" based on more connectivity and a broader use of the radio-frequency spectrum. Such is the case of major programs in France (*e.g.*, SCORPION for the army or SCAF for the air force). Characterized by a quest for high speeds and very low latency (required for air/naval combat), this trend relies on all types of radio support and on satellite constellations. Obtaining a real-time view of a tactical situation, thanks to this connectivity, depends on sensors for collecting information, satellites for observations, drones, interplatform connections for handling data, and better means of detection (like the radar systems to be installed on ships under the FDI, a completely digital program capable of guiding missiles in a hostile environment). Decision-making will thus be shortened when dealing with threats, including the menace of high-speed missiles. Dependent on using an ever more limited radio-frequency spectrum, the armed forces must foster resilience to cope with interferences and jamming, a sensitive but highly strategic maneuver.

## 89 The physical layer, a key layer for wireless networks

Philippe CIBLAT & Alain SIBILLE

The success of wireless networks since the 1990s stems from digital technology and the conception of a cellular network. These have made it possible to efficiently use the radio-frequency spectrum while observing the fundamental laws of electromagnetism. Since forty years ago, enormous progress has been made in using the spectrum, as the latter's

high end has been increasingly put to more diversified uses. The physical layer of the Open Systems Interconnection (OSI) model [ROLI2016], which underlays the architecture of networks since the 1970s, handles both the transmission and emission of signals from the physical world via antennas and the reverse operations for receiving signals. This layer's characteristics are decisive for the performance of wireless networks, for their coverage of geographical zones and their capacity to provide reliable services.

## 94 Techniques for managing radio-frequencies

Yann MAIGRON

The radio-frequency spectrum, now at the core of economic activities in modern digital societies, is related to major social, cultural and political issues. However this limited resource has to be shared out among all countries on the planet and for a wide range of uses and services. Managing the spectrum soon became indispensable at the supranational and national levels in order to guarantee the quality of radio-frequencies assignments and to prevent interference. Procedures for backing up this guarantee are designed by the International Telecommunication Union (ITU) and adjusted at the national level. Implementing them means tapping capacities for processing and sharing data and adopting analytical methods, techniques and tools — which will have to evolve to cope with the problems that the proliferation of new services and forms of technology will force upon the management of the radio-frequency spectrum.

## 98 Television and the radio-frequency spectrum

Walid SAMI

Television has changed along with technology, especially during the past two decades. Watching television used to be a group activity but has now become, especially for young adults, an individual form of consumption via personal, connected devices. Diverse contents are now offered, and viewers can select what they want to watch, and where and when they do so. They have at their fingertips a slue of channels of transmission and business models that have benefitted from the growth of the Internet via landline or wireless connections. Under pressure, landline transmission has already lost much of the radio-frequency spectrum reserved for it. Nevertheless, the consumption of linear contents on a television set that receives for free Hertzian signals has apparently not declined. This is an argument for maintaining and even improving a platform based on land lines in order to adapt to new uses.

## 104 Managing radio-frequencies in a crisis situation

Claire LANDAIS

Feedback from major crises during the past twenty years reveals that disorganized communications are a key factor that makes a crisis worse for governments to handle and for people who are trying to contact rescue services, authorities or persons close to them. Radio-frequencies are being more intensively used for mobile telephones (GSM) and radio receiver-transmitters (PR4G for the French armed forces, ACROPOL for the police and ANTARES for rescue services). Since these frequencies are a scarce resource, it is necessary to be able to reassign them fast, for example during a terrorist attack. For this reason; the prime minister has issued an edict for exceptionally assigning additional frequencies to the ministries of the Interior and of the Armed Forces in case of menaces.



## 108 Policing the radio-frequency spectrum: Unintentional interferences and jamming — Are the security of the spectrum, cybersecurity and electronic warfare a single combat?

Catherine GABAY

Unintentional interference on radio-frequencies and deliberate jamming are dangers for the economy and state on par with the menaces stemming from cyberattacks. The frequencies undergoing interference can hardly, or not at all, be used in the zone affected, and this jeopardizes all sorts of applications. The security of the radio-frequency spectrum is a matter of sovereignty. To prevent and handle cases of interference, a police is needed. The Agence Nationale des Fréquences (ANFR) has this role among its assignments for overseeing the spectrum: more than 1400 cases of prejudicial interference are reported to it each year. To cope with trends in technology and uses, the ANFR is continually bolstering its means and methods of control; and it advocates making all users aware of issues related to the security of the spectrum.

## 114 Frequencies for radio astronomy

Ivan THOMAS & Karl-ludwig KLEIN

Thanks to the transparency of the earth's atmosphere, radio astronomy observes the sky in a given bandwidth (from a dozen MHz to a few THz). As the means of observation become more sensitive, the universe can be sounded ever farther, closer to its creation. We thus discover how the universe has evolved over time. Radio astronomy supplies astrophysics with data, but the intensive use of the radio-frequency spectrum is restricting (even threatening) this activity. A brief description of the contributions made by radio astronomy to research in astrophysics and to technology and of its need for a protection of radio-frequencies...

## Miscellany

### 119 The 2019 digital barometer survey

Gérard LALLEMENT, Matthias DE JOUVENEL & Michel SCHMITT

Since 2000, the Conseil Général de l'Économie (CGE) has conducted a yearly survey on the diffusion of information and communications technology in French society. This survey follows up on electronic devices and their major uses and tries to detect new trends. The reliability of its findings comes from the face-to-face interviews conducted with a large sample of persons (2259 in 2019, including 207 under the age of 18). Since this survey has been repeatedly conducted for more than a decade, it has become a reference source, a genuine barometer of digital technology, now a full-fledged part of modern societies. The 2018 survey drew attention to the population's concerns about the protection of personal data. In 2019, respondents were asked about how digital technology has affected their lives, personal and occupational, and society in general. Trends related to mobility, uses and user's needs (*e.g.*, the portability of mobile applications and of user data) have been analyzed as well as people's confidence in the media, the effects of this technology on the environment and its role in changing our relations with public administrations.

# RÉALITÉS INDUSTRIELLES

## L'assurance aujourd'hui



Février 2020

### Introduction :

**Pierre-Charles PRADIER**

### Perspective cavalière sur l'industrie de l'assurance

L'industrie française de l'assurance - **José BARDAJI**

Les principaux marchés mondiaux d'assurance

**Jean-François OUTREVILLE**

Les fortunes contrastées de l'assurance et du courtage

Entretien avec **Pierre-Alain de MALLERAY**

La réassurance : de la garantie de la stabilité financière globale à la couverture assurantielle des effets du réchauffement climatique

**Patrick THOUROT**

L'assurance et la protection financière de l'agriculture

**Didier FOLUS, Pierre CASAL RIBEIRO, Bruno LEPOIVRE**

et **Antoine ROUMIGUIÉ**

### Questions d'actualité

Dans quelle mesure les fonds de pension permettraient-ils de résoudre le problème des retraites en France ? **Philippe TRAINAR**

L'assurance privée peut aider au financement de la dépendance

**Arnaud CHNEIWEISS**

L'impact des taux bas sur l'assurance - **José BARDAJI** et **Jean MALHOMME**

*Big Data*, GAFA et assurance - **Arthur CHARPENTIER**

L'assurance en Chine - **Marc-Philippe JUILLIARD**

Variable Annuities and Systemic Risk - **Wolf WAGNER**

### Perspectives longues

(Ré)assurance et risque systémique - **Denis KESSLER**

Comprendre les cycles dans l'assurance - **Gilles BÉNÉPLANC**

Quel avenir pour les probabilités prédictives en assurance ?

**Arthur CHARPENTIER, Laurence BARRY** et **Ewen GALLIC**

### Régulation

La régulation des assureurs en Europe. Quel juste niveau d'harmonisation ? **Bernard DELAS**

Solvabilité 2 : les assureurs se sont-ils laissé piéger ? **Sylvestre FREZAL**

Are reinsurance companies overcapitalized? **Anna BENDER**

Enjeux et défis de la libre prestation de services pour l'assurance française et européenne

**Philippe POIGET** et **Christian PIEROTTI**

Challenges and opportunities for the insurance sector in Europe

**Gabriel BERNARDINO**

---

Ce dossier a été coordonné par **Pierre-Charles PRADIER**

## Ont contribué à ce numéro

Le général **Jérôme BORDELLÈS** est né en 1967 à Agen. Après ses études à l'Ecole Spéciale Militaire de Saint-Cyr (1987-1990), il choisit l'arme des troupes de marine, spécialité Transmissions et poursuit sa formation à l'école d'application des Transmissions à Montargis. Il sert successivement au sein de plusieurs unités de l'armée de Terre, en France et à l'étranger, dans son domaine d'expertise. Il effectue de nombreuses missions opérationnelles en Guyane (1993), au Liban (2005) au titre des Nations-Unies, ou encore au sein de l'EUFOR Tchad RCA (2009). Il commande le 48<sup>e</sup> régiment de Transmissions d'Agen de 2010 à 2012. Diplômé du collège interarmées de Défense (2003), ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (SUPAERO) de Toulouse (2000-2002), et titulaire d'un Master en géostratégie de l'université d'Assas-Paris II, il mène également une riche carrière en états-majors opérationnels ou au sein de l'administration centrale du ministère des armées. Affecté à la Direction Générale du Numérique et des Systèmes d'Information et de Communication (DGNUM) depuis 2018, il prend les fonctions d'officier général chargé des fréquences du ministère des armées. Promu général de brigade le 1<sup>er</sup> décembre 2019, il assure dès lors également la fonction de directeur général adjoint de la DGNUM.

→ *Les besoins actuels et futurs en fréquences pour les armées : un défi stratégique pour la France*

**Gilles BRÉGANT** est diplômé de l'école Polytechnique et de l'Ecole nationale supérieure des Télécommunications (1988). Après 8 ans au Centre National d'Etudes des Télécommunications, il a rejoint le cabinet du Secrétaire d'Etat à la Recherche comme conseiller technique en charge des dossiers internationaux et des technologies de l'information (1996-1997). Il a ensuite rejoint la Direction générale de l'industrie, où il s'est vu confier la sous-direction « Programmes et Prospective » du service des technologies de l'Information. En 2001, il est nommé secrétaire général de la « Mission pour l'Economie numérique » du Ministère de l'Economie et des Finances. En 2005, il rejoint le Conseil supérieur de l'audiovisuel (CSA) comme directeur des technologies. Depuis janvier 2011, Gilles Brégant est directeur général de l'Agence nationale des fréquences. Il a présidé de 2012 à 2015 le RSPG, groupe des agences du spectre de l'Union européenne.

→ *Avant-propos*

→ *La gestion nationale*

**Philippe CIBLAT** a obtenu sa thèse de doctorat en traitement du signal de l'université Paris-Est à Marne-la-Vallée en 2000. Avant il a obtenu le diplôme d'ingénieur de Telecom Paris en 1996. Il est également titulaire d'une HDR depuis 2007. Depuis 2001, il est maître de conférences et ensuite professeur dans l'équipe Communications Numériques de Telecom Paris. Il en est le responsable depuis 2010. Il a été *Associate Editor* de IEEE Transactions on Signal Processing durant 6 ans. Il est maintenant *Associate Editor* de IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, et membre du comité technique IEEE en Signal Processing for Communications and Networking. Il participe à de nombreux comités de programme (ICASSP, SPAWC, ICC, GLOBECOM, etc). Il dirige ou a dirigé 19 thèses. Il a publié 50 articles de revues et plus de 120 articles de congrès internationaux et a déposé 10 brevets. Ses sujets de recherche portent sur l'allocation de ressources pour les réseaux.

→ *La couche physique : un élément-clé des réseaux dans sans fil*

**Olivier COROLLEUR** est actuellement sous-directeur des communications électroniques et des postes à la direction générale des entreprises (DGE). Placée sous l'autorité du ministre de l'Économie et des Finances, la DGE est notamment chargée de proposer, mettre en œuvre et

évaluer les politiques de l'Etat dans le domaine des technologies numériques, l'électronique, les industries spatiales et les communications électroniques en veillant au développement de leurs usages ainsi qu'à l'intérêt des utilisateurs. Avant de rejoindre la DGE en 2016, Olivier Corolleur a notamment travaillé à la direction générale des médias et des industries culturelles (2006 – 2010) puis à l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes (Arcep) en tant qu'adjoint au directeur du spectre et des relations avec les équipementiers (2010 - 2012), directeur des affaires économiques et de la prospective (2012 - 2014) puis directeur Internet et utilisateurs (2014 – 2016).

→ *La valeur patrimoniale du spectre radioélectrique*

**Eric FOURNIER**, ingénieur diplômé de Supelec, est actuellement directeur de la planification du spectre et des affaires internationales à l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR), l'établissement public français en charge de la gestion du spectre. A ce titre, il a la responsabilité de préparer les évolutions du tableau national de répartition des bandes de fréquences et les réaménagements des bandes de fréquences, de coordonner les fréquences aux frontières, de gérer les ressources orbite-spectre auprès de l'UIT et d'assurer la représentation française dans les réunions de l'UIT, de la CEPT et de l'UE dans le domaine des fréquences. Avant de rejoindre l'ANFR en 1997, il a travaillé 6 ans au CNET (Orange Labs) dans le domaine de la compatibilité électromagnétique et de la gestion des fréquences. Il a occupé diverses présidences de groupes internationaux : le Comité des communications électroniques de la CEPT de 2012 à 2018, le Groupe préparatoire de la CEPT (CPG-12) pour la Conférence mondiale des radiocommunications de 2012, le groupe de travail ingénierie du spectre de 1998 à 2003. Il a été chef adjoint de la délégation française à la conférence régionale des radiocommunications (CRR) de 2006 ainsi qu'aux conférences mondiales des radiocommunications (CMR) de 2007, 2012, 2015 et 2019. Il anime les « bons offices » du DSPG sur la coordination aux frontières pour les pays de l'UE.

→ *Le cadre régional de la gestion des fréquences en Europe : un niveau élevé d'harmonisation, par la coopération entre l'UE, la CEPT et l'ETSI*

**Catherine GABAY** est ingénieur SUPELEC, et également titulaire d'un Master en Télécommunications (IMPERIAL COLLEGE, Londres) et de deux Troisièmes Cycles, respectivement en Marketing Industriel et en Commerce International (CNAM, Paris). Elle a débuté sa carrière, de 1988 à 1994, en qualité d'Ingénieur d'Etudes puis de Chef de Projet Informatique dans l'industrie de l'armement au sein d'EADS, Thales et Safran. Elle a ensuite rejoint le groupe France Télécom - Orange où elle a été Chef de Projet au sein de la Division Réseaux et Services Internationaux et de la joint-venture Global One (1994-1997), puis Chargée d'Affaires Réglementaires au sein de la Direction des Relations Extérieures de France Télécom (1997-2000), et enfin Responsable de la Réglementation à la Direction de la Stratégie de Wanadoo (2000-2001). En décembre 2001, elle a pris les fonctions de Directrice de l'Innovation, de la Recherche et des Nouvelles Technologies au MEDEF. Elle est nommée, en mai 2008, Conseillère Technique chargée des Nouvelles Technologies, des Editeurs et du Multimédia auprès du Ministre de l'Education nationale. En mars 2010, elle a rejoint Iliad en tant que Directrice aux Affaires Réglementaires et Institutionnelles de Free Mobile. En avril 2017, elle a rejoint l'Agence nationale des Fréquences (ANFR) en tant que Directrice Adjointe de la Direction du Contrôle du Spectre.

→ *Police du spectre, brouillage offensif, brouillage non intentionnel. Contrôle du spectre, cyber-sécurité, cyberdéfense et guerre électronique : même combat ?*

**Olivier JAPIOT** est, depuis 1995, membre du Conseil d'Etat (cour administrative suprême en France). Il est diplômé de l'école de commerce HEC Paris, de l'Ecole nationale d'administration (ENA) et d'une maîtrise en droit. Il a occupé plusieurs fonctions dans l'administration française, en particulier au cabinet du Premier ministre et à celui du ministre de la culture et de la

communication. Il a été sous-préfet et directeur général adjoint de l'Opéra national de Paris. Il a également dirigé les services du Conseil supérieur de l'audiovisuel (CSA). Il a par ailleurs enseigné à SciencesPo Paris et rédigé plusieurs rapports dans le domaine des nouvelles technologies, en particulier sur le cadre juridique d'Internet (1998) et plus récemment sur l'impression 3D et le droit d'auteur (2016) ainsi que sur les outils de reconnaissance des œuvres sur les plateformes numériques (2017). Il est aussi conseiller juridique de l'ANFR.

→ *Cadres et instruments juridiques des fréquences*

**Matthias de JOUVENEL**, ancien élève de l'École normale supérieure de Cachan (département d'Économie et de gestion, 1997-2000) et ancien élève de l'École nationale supérieure des Postes et Télécommunications (2001-2002), est administrateur civil hors classe chargé de mission au sein du Conseil général de l'Économie (CGE), où il pilote le baromètre du numérique depuis plusieurs années.

→ *Le baromètre du numérique 2019*

**Karl-Ludwig KLEIN** a obtenu son doctorat à l'Université de Bonn (Allemagne) en 1984. Depuis il travaille à l'Observatoire de Paris, menant des recherches en physique solaire et ses applications à la météorologie de l'espace. Son intérêt principal est la physique des éruptions solaires et l'accélération de particules de haute énergie. Il est responsable scientifique du Radiohéliographe et du spectrographe ORFEES de la station de radioastronomie de Nançay et du service de surveillance du Soleil et du rayonnement cosmique à l'Observatoire de Paris. Il était président de la Community of European Solar Radio Astronomers (CESRA) de 1998 à 2010 et du Programme National Soleil-Terre (PNST) du CNRS/INSU de 2014 à 2019.

→ *Les enjeux des fréquences pour la radioastronomie*

**Gérard LALLEMENT**, ingénieur général des Mines, est en fonction au Conseil général de l'Économie (CGE).

→ *Le baromètre du numérique 2019*

**Claire LANDAIS** est Secrétaire générale de la défense et de la sécurité nationale depuis le 5 mars 2018. Diplômée de l'École supérieure des sciences économiques et sociales, de l'Institut d'études politiques de Paris et de l'École Nationale d'Administration (promotion « Averroès », 2000), elle est Conseillère d'Etat depuis 2000, travaillant à la section du contentieux, puis à la section des travaux publics. Mme Landais devient Commissaire du Gouvernement à la section du contentieux du Conseil d'Etat en 2007, puis exerce les fonctions de Directrice des affaires juridiques du ministère de l'éducation nationale et du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche à partir de 2008. Après avoir exercé de nouveau dès 2010 à la section du contentieux au Conseil d'Etat en tant que Rapporteur public, elle devient en 2012 Directrice des affaires juridiques du ministère de la défense et ce jusqu'en 2017, lorsqu'elle prend pour un an les fonctions d'Assesseur à la section du contentieux du Conseil d'Etat. Mme Landais est Chevalier de l'Ordre national du mérite et Commandeur des Palmes académiques.

→ *La gestion des fréquences en temps de crise*

**Yann MAIGRON** est Ingénieur général des Mines, ancien élève de l'ENS (1992), de l'ENST (1994) et du CNAM-EFAB (2016). En 1994, il a débuté sa carrière au ministère de l'Économie à la direction générale des Stratégies industrielles comme chargé de mission sur le Financement des PMI et de l'innovation. De 1996 à 2008, il a exercé diverses responsabilités à France Télécom notamment comme responsable du département Tarifs à la direction de la Réglementation puis responsable de la Stratégie et des opérations à FT R&D. De 2008 à 2012, il a poursuivi sa carrière à la Société Générale – Corporate & Investment Banking où il a notamment été responsable du

domaine applicatif des produits dérivés indices et actions et de la performance des processus opérationnels middle & back office. Depuis 2012, Directeur de la Gestion des Fréquences et CDO à l'ANFR, il est notamment en charge de la refonte des procédures de gestion des fréquences et de projets d'innovation (*Datalab, IA, blockchain, opendata*).

→ *Les outils techniques de la gestion des fréquences*

**Dominique MARBOUTY** est Ingénieur Général des Ponts, des Eaux et des Forêts honoraire depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2019. Il était avant cette date membre permanent du Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD) depuis septembre 2011. Il était également jusqu'à la même date le coordonnateur interministériel Copernicus, fonction exercée à mi-temps au sein du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche depuis 2013. Dominique Marbouty était précédemment directeur général du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (ECMWF, Reading, Royaume-Uni) depuis 2004. Il était auparavant directeur des opérations du même centre depuis 1999. Toute la première partie de sa carrière s'est déroulée au sein de Météo-France dont il a été directeur général adjoint de 1992 à 1998, s'occupant successivement des opérations, de la stratégie et enfin des développements et des services régionaux. Dominique Marbouty est actuellement président du Comité de Dialogue Radiofréquences de l'Anses et vice-président de Météo et Climat, Société Météorologique de France. Il est également membre et fellow de l'American Meteorological Society (USA). Il a été président de la Société météorologique européenne. Il est chevalier de la légion d'honneur.

→ *L'utilisation des fréquences radioélectriques pour l'observation de la Terre*

**Christine MENGELLE** est ingénieure fréquences au sein de la Direction des Affaires Réglementaires à Thales Alenia Space. Elle travaille depuis 1992 dans le domaine de la gestion des fréquences, tout d'abord au sein de la cellule ingénierie des fréquences du Département Compatibilité Electromagnétique du Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET) de France Télécom puis à Alcatel Espace à Toulouse devenu Alcatel Alenia Space puis Thales Alenia Space. Elle est experte dans les problématiques de partage entre services spatiaux et services terrestres, et, à ce titre, a participé à plusieurs Conférences Mondiales des Radiocommunications (CMR), notamment sur des projets satellites comme Globalstar, SkyBridge ou Galiléo, ou récemment sur le projet Stratobus de Thales Alenia Space.

→ *Plateformes à haute altitude*

**Olivier MERCKEL**, à l'issue d'une formation universitaire en télédétection, et de sa thèse consacrée à l'élaboration de méthodes de mesure de l'exposition des personnes aux rayonnements émis par les téléphones mobiles, a intégré le Département de recherche en électromagnétisme de Supélec en 2002, en qualité d'enseignant-chercheur, pour y poursuivre ses travaux sur l'exposition aux ondes, et notamment développer les bases d'un système de mesure en temps réel. En 2007, il intègre l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, aujourd'hui Anses, et devient responsable en 2008 de l'Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques. Cette entité réalise, en s'appuyant sur les travaux de recherche disponibles, et avec le concours de nombreux chercheurs et scientifiques d'organismes nationaux et internationaux, des expertises visant à évaluer les risques pour la santé humaine liés à l'exposition aux champs électromagnétiques, à la lumière, aux nanomatériaux, au bruit, au changement climatique ou encore aux horaires atypiques de travail.

→ *Radiofréquences et santé*

**Gérard POGOREL** est professeur d'économie et de gestion émérite à Télécom Paris et expert international indépendant des télécommunications et de l'économie numérique. Il est diplômé de HEC Paris, titulaire d'un doctorat en économie de l'Université de Paris Panthéon-Sorbonne



et d'un doctorat en sciences des organisations de l'Université Paris-Dauphine. Il intervient sur la scène internationale en tant qu'expert au niveau gouvernemental dans l'attribution du spectre 5G et par des présentations lors de séminaires en Europe et en Asie. Il a co-rédigé en 2014 un rapport au Premier ministre italien sur les investissements des opérateurs dans les réseaux à large bande dans la perspective de la stratégie numérique européenne. Il a été membre indépendant de l'Organo di Vigilanza de Telecom Italia Open Access (2009-2013) chargé de la surveillance de l'accès au réseau de l'opérateur historique. Il a co-fondé en 2006 les conférences européennes sur la gestion du spectre radio, dont il a été président et rapporteur (2009-2019). Il intervient auprès de la DG Connect de la Commission européenne et a présidé le groupe de suivi du programme-cadre de recherche et de développement technologique de l'Union européenne, ainsi que le comité de suivi du programme de recherche de l'UE sur la société de l'information et les technologies. Il a mis en place des programmes de recherche coopératifs sur les politiques de spectre avec des universités en Europe (Suède, Royaume-Uni, Italie), aux Etats-Unis (UC San Diego), ainsi qu'au Japon et en Thaïlande. Il participe à de nombreux comités internationaux sur la réglementation des télécommunications et des médias.

→ *Spectrum economics: serving public policies*

**Benoît PONSARD** est ingénieur Supélec (85) et docteur ENST (91). De 1985 à 2000, il mène différents projets de recherche et développement sur des produits et services dans de grandes sociétés des télécoms. En 2000, il rejoint la direction technique internationale de Orange pour assurer la coordination technique entre les filiales mobiles du groupe FT. En 2004, Benoît PONSARD devient professeur associé à l'Ensimag où il enseigne les télécoms ; ses travaux de recherche portent sur les réseaux de capteurs et l'Internet des Objets. Dès 2009, il crée la société Kimeggi, société de conseil stratégique et technique pour la connectivité des machines (M2M) et des objets (IoT). Depuis fin 2014, Benoît Ponsard est directeur de la standardisation, pour la société Sigfox.

→ *Les fréquences de l'IoT : un nouveau paradigme pour les ingénieurs radio*

**François RANCY** est ingénieur général des mines, ancien élève de l'École polytechnique (X74) et de l'École nationale supérieure des Télécommunications de Paris (1977). De 2011 à 2018, il a été Directeur du Bureau des Radiocommunications à l'Union Internationale des Télécommunications, après avoir été Directeur général de l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) de 2004 à 2010 et Directeur de la planification du spectre et des affaires internationales à l'ANFR de 1997 à 2004. De 1992 à 1997, il occupait les fonctions de Chef du Bureau Fréquences de France Télécom, et en parallèle, de 1994 à 1997, chef du groupement sur les études de radiocommunications et la gestion des fréquences au Centre national d'études des télécommunications où il avait commencé sa carrière en 1979 comme ingénieur en systèmes à satellites sur les programmes français TELECOM 1 et TELECOM 2 et sur le système mondial INTELSAT.

→ *Introduction : le spectre des fréquences, une ressource à urbaniser et mettre en valeur*

→ *Le cadre mondial de la gestion des fréquences : réglementation et normalisation*

→ *Constellations de satellites*

Dr. **Walid SAMI** est chef de projet principal à l'Union européenne de radio-télévision (UER), à Genève, en charge de la coordination des études sur l'utilisation du spectre. Il représente l'UER au sein de forums européens et internationaux. Il est Vice-Président de la Commission d'études 6 de l'UIT-R (Radiodiffusion) et contribue surtout aux Groupes de travail 6A (Diffusion terrestre) et 1A (Techniques d'ingénierie du spectre). Préalablement, Dr. SAMI a travaillé dans la gestion du spectre et la planification des fréquences pour les systèmes de diffusion numérique à Télédiffusion de France (TDF) et au CSA (Conseil Supérieur de l'Audiovisuel). Il a notamment passé 7 années à la tête du service de planification de la télévision du CSA, où il était chargé de la planification de la

télévision numérique terrestre en France. Dr. SAMI a obtenu un diplôme d'ingénieur en électricité / électronique de l'Université libanaise en 1986 et un doctorat en physique de Supelec / Université de Paris Sud en 1991.

→ *L'évolution de la télévision et de son usage des fréquences*

**Michel SCHMITT** est ingénieur général des Mines. Après une carrière scientifique en mathématiques appliquées comme directeur de laboratoire chez Thales-Research (1991-1995), puis directeur de la recherche à Mines ParisTech (2001-2012) et enfin Vice-président numérique de l'université Paris Sciences et Lettres (PSL) de 2015 à 2018, il a rejoint le Conseil général de l'Économie (CGE) fin 2018.

→ *Le baromètre du numérique 2019*

**Alain SIBILLE** est diplômé de l'École Polytechnique (1977) et de Télécom Paris (1979), et titulaire d'un doctorat d'Etat (1985). Il a démarré une carrière de chercheur au Centre National d'Études des Télécommunications en 1979 dans le domaine de la physique des composants micro-opto-électroniques, puis est devenu responsable de département enseignement-recherche à l'École nationale Supérieure de Techniques Avancées (1992), tout en maintenant un lien avec France-Télécom comme conseiller scientifique jusqu'en 1999. Il a contribué à de nombreux projets nationaux et européens dans le domaine des communications sans fils, ainsi qu'à l'animation de la communauté scientifique internationale du domaine. Depuis 2010 il est professeur à Télécom Paris (Institut Polytechnique de Paris) et directeur de la formation doctorale. Il est également secrétaire général d'URSI-France depuis 2012.

→ *La couche physique : un élément-clé des réseaux sans fil*

**Nicolas SPANJAARD-HUBER** est ingénieur général des mines, ancien élève de l'École polytechnique (1977) et de l'École nationale supérieure des télécommunications (1979). Il a commencé sa carrière au Centre National d'Études des Télécommunications (1979/1987) par des études sur la propagation des ondes au travers des hydrométéores. Il a été ensuite chef du département « Électronique et Communications », puis du département « Électronique et Physique » à l'Institut National des Télécommunications (1987/1995). De 1995 à 2005 il a exercé des fonctions de coordination et de représentation relatives aux ressources radioélectriques au sein du Groupe France Télécom. Il a à ce titre participé à l'élaboration de la réglementation radioélectrique en France et, parallèlement, est intervenu dans les réunions de l'Union Internationale des Télécommunications et de la Conférence Européenne des Postes et Télécommunications. Il a été nommé Directeur du contrôle du spectre à l'ANFR le 1er septembre 2005, fonction qu'il exerce encore aujourd'hui.

→ *Le contrôle du spectre*

**Eddie TADEJ** est, depuis 2012, Chef du service juridique et Secrétaire du Conseil d'administration de l'Agence nationale des fréquences (ANFR). Diplômé de la faculté de droit de Poitiers (1992), où il obtenu un Magistère et un DESS en droit des techniques de communication, il a occupé plusieurs fonctions au Conseil supérieur de l'audiovisuel (CSA), dont celles de responsable du pôle contentieux (2002-2007), puis de secrétaire du Collège (2008-2011). Il enseigne le droit des communications électroniques au MBA Production audiovisuelle à l'École Supérieure de Gestion (ESG) et le droit des fréquences au Master II Droit des activités spatiales et des télécommunications à la faculté de Paris-Saclay (Sceaux).

→ *Cadres et instruments juridiques des fréquences*

**Ivan THOMAS** est ingénieur de recherche à l’Observatoire de Paris et chargé de mission du Ministère de la recherche, de l’enseignement supérieur et de l’innovation. Durant une dizaine d’années, il conduit des développements instrumentaux en radioastronomie. A partir de 2011, il prend en charge la protection des fréquences pour la radioastronomie française et représente le Ministère en charge de la recherche à l’ANFR. Il s’occupe en parallèle de la protection du site de radioastronomie de Nançay. Il intervient dans différentes instances de régulation des fréquences (ANFR, ITU, CEPT, CRAF).

→ *Les enjeux des fréquences pour la radioastronomie*

Le capitaine de frégate **Mickaël ULVOA** est né en 1977 à QUIMPERLE (29). Diplômé de l’Ecole Navale (1998-2001) (missile – artillerie), il effectue une riche première partie de carrière sur Frégate Anti-Sous-Marine « Dupleix » (2001-2002), sur frégate « La Fayette » (2002-2004) et sur l’avisos « Commandant Duceing » (2004-2005), où il participe à de nombreuses missions, notamment en mer Méditerranée ou en Océan Indien. Diplômé ingénieur de l’Ecole Nationale Supérieure de l’Aéronautique et de l’Espace (SUPAERO) de Toulouse (2005- 2007), il alterne depuis une carrière articulée autour de postes à forte expertise technique (imagerie spatiale (HELIOS, SAR-LUPE, COSMO SKYMED, PLEIADES, MUSIS), renseignement spatial (ESSAIM, ELISA et CERES)) et de postes opérationnels (commandant en second de l’avisos « Premier Maître L’Her » et commandant du chasseur de mines « Eridan », avec des missions de soutien à la Force Océanique Stratégique, en Océan Indien en 2011 , ou encore en Afrique en 2013). Après avoir occupé le poste d’officier programme pour les satellites de télécommunication (SYRACUSE, ATHENA-FIDUS) du ministère des Armées au Commandement Interarmées de l’Espace, il rejoint la DGNUM en 2019 au bureau de la gouvernance des fréquences.

→ *Les besoins actuels et futurs en fréquences pour les armées : un défi stratégique pour la France*

**Roberto VIOLA** is Director General of DG CONNECT (Directorate General of Communication, Networks, Content and Technology) at the European Commission. He was the Deputy Director-General of DG CONNECT, European Commission from 2012 to 2015. Roberto Viola served as Chairman of the European Radio Spectrum Policy group (RSPG) from 2012 to 2013, as Deputy Chairman in 2011 and Chairman in 2010. He was a member of the BEREC Board (Body of European Telecom Regulators), and Chairman of the European Regulatory Group (ERG). He held the position of Secretary General in charge of managing AGCOM, from 2005 to 2012. Prior to this, he served as Director of the Regulation Department and Technical Director in AGCOM from 1999 to 2004. From 1985-1999 he served in various positions including Head of Telecommunication and Broadcasting Satellite Services at the European Space Agency (ESA). Roberto Viola holds a Doctorate in Electronic Engineering and a Master in Business Administration (MBA).

→ *5G Connectivity*