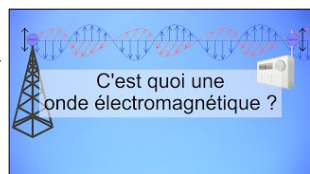




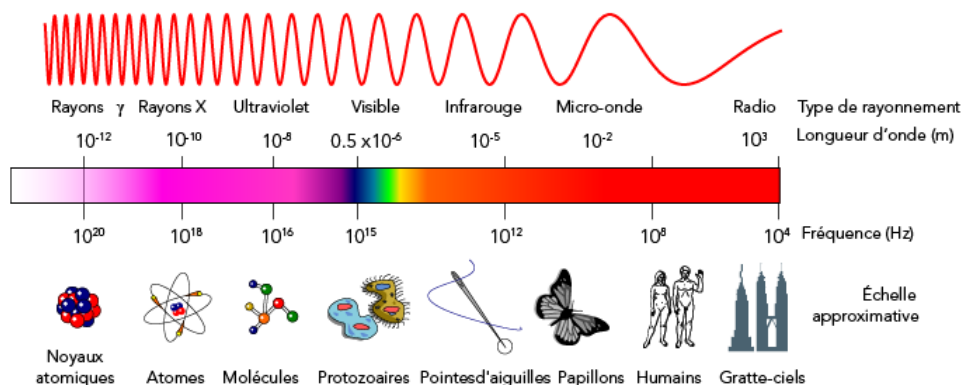
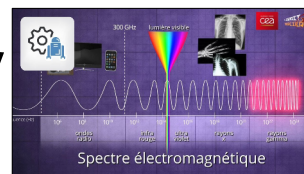
C'EST QUOI UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE ?

À regarder :

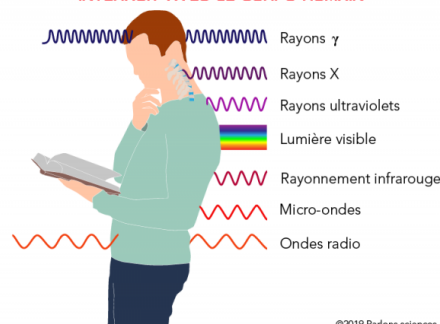
≈ 5 min
youtu.be/LgOH6xxCBQA



≈ 4 min
youtu.be/w7y-1eY0mcE



COMMENT LE RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE INTERAGIT AVEC LE CORPS HUMAIN



Source des deux images : <https://parlonssciences.ca>

La lumière est une onde électromagnétique, au même titre que les ondes radios, les micro-ondes, l'infrarouge, les rayons X, etc.

Les ondes se caractérisent par leur **période** T , qui est le temps nécessaire (en s) pour que l'onde complète un cycle. La **fréquence** f est l'inverse de la période : elle pourrait donc s'exprimer en s^{-1} , ce qu'on appelle plutôt des **hertz** (notation : **Hz**) en hommage au physicien allemand Heinrich Hertz¹ (1857 – 1894) qui confirma en 1887 l'existence d'ondes électromagnétiques en produisant et détectant de telles ondes, à l'aide d'un oscillateur et d'une antenne. Un hertz est finalement la mesure de la fréquence de répétition d'un événement qui se répète une fois par seconde.

La **longueur d'onde** λ est une unité (en m) : $\lambda = c T$, où c est la vitesse de propagation de l'onde.

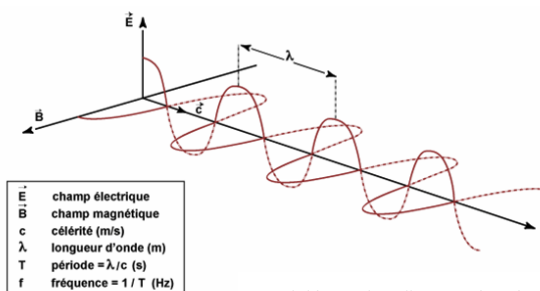
Dans le vide², on considère que cette vitesse est celle de la lumière : $c \approx 3 \times 10^8$ m / s.

Puisque $f = \frac{1}{T}$, on a alors $T = \frac{1}{f}$ puis : $\lambda = \frac{c}{f}$. Dans le vide,

on a donc $\lambda \approx \frac{3 \times 10^8}{f}$: c'est pourquoi, souvent, on découpe les fréquences f selon des nombres du type $3 \times 10^?$.

Il est également intéressant de retenir ces quelques ordres de grandeurs :

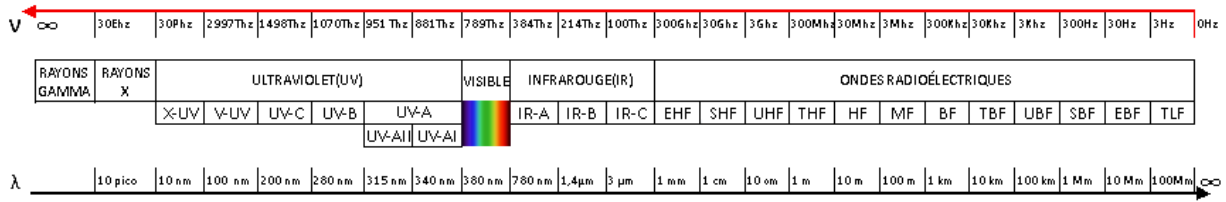
$f = 1$ Hz	↔	$\lambda \approx 300\,000$ km	← - - - - - →	$f = 10$ Hz	↔	$\lambda \approx 30\,000$ km
$f = 10$ kHz	↔	$\lambda \approx 30$ km	≡ - - - - - ≡	$f = 10$ MHz	↔	$\lambda \approx 30$ m
$f = 10$ GHz	↔	$\lambda \approx 3$ cm	- - - - - →	$f = 100$ GHz	↔	$\lambda \approx 3$ mm



Source de l'image : <https://e-cours.univ-paris1.fr>

¹ Atteint d'une rare maladie auto-immune, il décède à l'âge de 36 ans.

² La longueur d'onde dépend de la célérité (ou vitesse) de propagation de l'onde dans le milieu qu'elle traverse. Lorsque l'onde passe d'un milieu à un autre, dans lequel sa célérité est différente, sa fréquence reste inchangée, mais sa longueur d'onde varie.

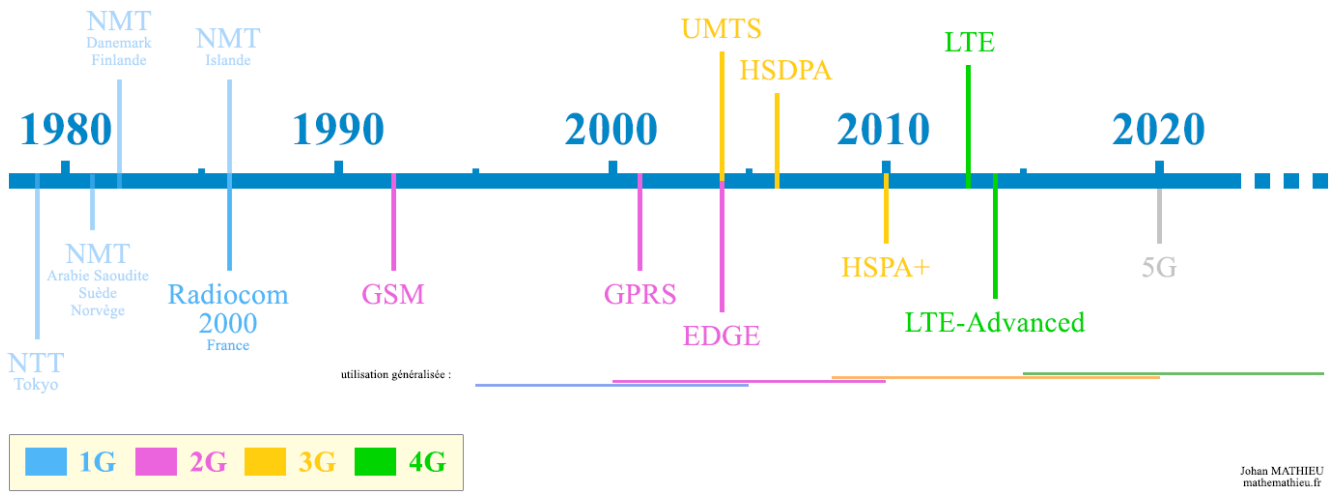


THÉORIE, DOMAINES DU SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Source de l'image : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Domaines_du_spectre_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique.png

DE LA 1G À LA 4G

APPARITION DES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE TÉLÉPHONIE MOBILE EN FRANCE



Johan MATHIEU
mathathieu.fr

- 2G**: voix + SMS
- 3G**: voix + SMS + internet limité (envoi de photos)
- 4G**: voix + SMS + internet (vidéos, applications)
- 5G**: voix + SMS + internet (réalité augmentée, véhicules connectés...)



Pour voir l'évolution de quelques téléphones mobiles : tallypress.com et practicallynetworked.com

Depuis 1976, différentes normes ont été utilisées pour la téléphonie mobile. En voici quelques-unes françaises, de la première génération (1G) à la cinquième (5G).

- **1G** : normes de télécommunications analogiques introduites dans les années 1980.
 - **Réseau NTT** : premier réseau cellulaire automatisé commercial, lancé à Tokyo par Nippon Telegraph and Telephone en 1979. En cinq ans, il couvre l'ensemble de la population du Japon.
 - **Réseau NMT³** : premier réseau de téléphonie mobile à proposer l'itinérance internationale. Lancé en Arabie Saoudite⁴, puis en Suède et Norvège en 1981. Étendu au Danemark et la Finlande en 1982, puis à l'Islande en 1986. En 1985, le nombre d'abonnés est de 110 000 en Scandinavie : le plus grand réseau mobile au monde à cette époque !
 - **Radiocom 2000** : déployée en France par France Télécom à partir de 1986.
Utilise la technologie numérique pour la signalisation (gestion des appels et des connexions) la modulation analogique pour la voix.

véhicule Peugeot équipé d'un Radiocom 2000



En 1988, le réseau Radiocom 2000 compte jusqu'à 60 000 abonnés et plus de 90 % des appareils sont installés à bord de véhicules. Son utilisation est avant tout professionnelle et on est très loin d'un phénomène de masse.

Bande de fréquence utilisée : autour des 400 MHz (fréquences attribuées dynamiquement en fonction des besoins).

- **2G** : la principale différence entre la 1G et la 2G concerne les signaux radio utilisés ; en effet, les réseaux 1G sont analogiques, tandis que les réseaux 2G sont numériques.
La 1G présentait de nombreux défauts : service de communication mobile médiocre, non sécuritaire (appels non cryptés) et coûteux.

- **GSM⁵** : norme commercialisée en France en 1992 (opérateur Itinériss de France Télécom).
La France abandonnera la 1G au profit exclusif de la 2G à partir du 28 juillet 2000.
Aujourd'hui, certains (dont les Belges) appellent encore un portable « un GSM ».
En quelques années, le nombre de lignes mobiles dépassent le nombre de lignes fixes : en France, on dénombre en 2001 pas moins de 35 millions d'abonnements mobiles contre 34 millions de lignes fixes.

3 Nordic Mobile Telephone

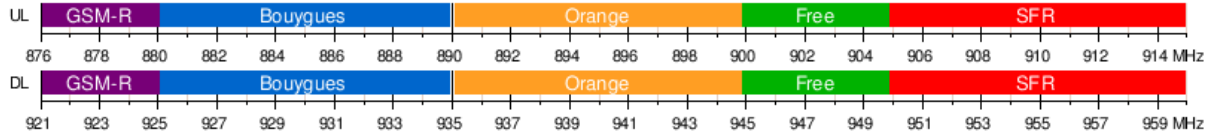
4 Assez curieux pour une norme portant le nom Nordie !

5 Global System for Mobile Communications

Débit maximum théorique de données descendantes (téléchargement) : 9,6 kb/s.

Bande de fréquences : 900 MHz (880-915 MHz pour l'envoi de la voix ou des données depuis le mobile et 925-960 MHz pour la réception des informations venant du réseau).

Une variante du GSM, le DCS (ou GSM 1800) utilise la bande des 1 800 MHz. Très vite, les téléphones supportant la norme GSM pouvaient utiliser les deux bandes : 900 et 1 800. Exemple de partage des fréquences GSM 900 selon les opérateurs, depuis 2011 (arrivée de Free mobile) :



Fin de la technologie GSM en France prévue pour fin 2025 !

→ **GPRS**⁶ (≈ 2001) : norme dérivée du GSM, qui ajoute la transmission par paquets⁷ et permet un débit de données plus élevé.

Aussi qualifiée **2,5G** ou **2G+**. Considéré aujourd'hui comme excessivement lent et dépassé, c'est pourtant le premier à permettre l'échange de datas (ainsi que des SMS⁸, appels et MMS⁹). En pratique, même les simples communications ont du mal à être de qualité.

Débit maximum théorique de données descendantes (téléchargement) : 171,2 kb/s (en pratique, environ 50 kb/s en moyenne).



→ **EDGE**¹⁰ (≈ 2004) : norme dérivée du GSM permettant un débit de données plus élevé.

Aussi qualifiée **2,75G** ou **2G+**. C'est la pré-3G.

Usages limités aux appels, et messages et mails sans photos...

Débit maximum théorique de données descendantes (téléchargement) : 384 kb/s (en pratique, environ 100 kb/s en moyenne).

Bande de fréquences : identiques à celle du GPRS.

- **3G** : les normes 2G étaient basées essentiellement sur le service voix (oui, un téléphone servait... à téléphoner). Ce modèle disparaît avec l'avènement de la 3G qui permet l'accès au web ou le visionnage de vidéos.

Apparue vers 2004 en France¹¹, la téléphonie mobile de troisième génération a été mise en place et a nécessité le déploiement d'un nouveau réseau physique.

→ **UMTS**¹² : le Japon est le premier pays à l'adopter en 2002, suivi par la Norvège.

Arrivée en France en 2004.

En 2007, Orange France ne couvrait en 3G que 65 % de la population (fin 2009, 87 % de la population). Fin 2012, les taux de couverture 3G sont supérieurs à 98 % pour Orange et SFR et de plus de 94 % pour Bouygues Telecom.

6 General Packet Radio Service

7 Comme le protocole TCP/IP.

8 Short Message Service : permet l'envoi de messages écrits de 160 caractères maximum.

9 Multimedia Messaging Service : service de messagerie multimédia, apparu en 2002 en France.

10 Enhanced Data rates for GSM Evolution

11 Initialement prévue pour le début des années 2000, a été reportée en raison de son coût et de la mauvaise conjoncture économique.

12 Universal Mobile Telecommunications System

Les abonnés sont alors en mesure de surfer sur le web, d'accéder à leur emails, d'envoyer des photos et des vidéos, grâce à un débit convenable.

Débit maximum théorique de données descendantes (téléchargement) : 1,920 Mb/s (en pratique, environ 384 kb/s en moyenne pour une utilisation piétonne, et 144 kb/s pour une utilisation mobile en mouvement rapide – comme dans une voiture ou un train – et en zones éloignées d'une antenne).

Bande de fréquences : 900 MHz et 2 100 MHz.

Fin de la technologie UMTS en France prévue pour fin 2028 !



→ HSDPA¹³ : version améliorée de la 3G. Arrivée en France en 2006.

Aussi qualifiée 3G+ ou 3,5G.

Débit théorique maximal de 14,4 Mb/s (≈ 3,6 Mb/s en pratique).

La vitesse de chargement d'une vidéo de qualité est alors acceptable.



→ HSPA+ : version améliorée de la HSPA. Arrivée en France en 2010.

Aussi qualifiée 3,75G.

Débit théorique maximal de 21 Mb/s (≈ 5 Mb/s en pratique).

En doublant la connexion (le mobile se connecte deux fois à l'antenne pour bénéficier de deux fois plus de débit, c'est la technologie *Dual Carrier*), on obtient un débit maximal de 42 Mb/s. De même, 84 Mb/s en mode multi antennes MIMO 2x2.

On peut recevoir et envoyer des données volumineuses sans trop se poser de questions.

On commence à atteindre une vitesse confortable.

- 4G (≈ 2012) : une des particularités de la 4G est d'avoir un « cœur de réseau » basé sur IP et de ne plus offrir de mode commuté (établissement d'un circuit pour transmettre un appel « voix »), ce qui signifie que les communications téléphoniques utilisent la voix sur IP (paquets) : pour simplifier, avec la 4G, tout passe directement par Internet !

→ LTE¹⁴ : le Japon est le premier pays à l'adopter en 2009, suivi par la Suède et la Norvège.

Arrivée en France en 2013.

Aussi qualifiée 3,9G avant d'être acceptée comme 4G.

Débit théorique maximal de 150 Mb/s (≈ 30 Mb/s en pratique).

Bande de fréquences : 700/800 MHz, 1 800 MHz, 2 100 MHz et 2 600 MHz.

→ LTE-Advanced : arrivée en France 2014, mais déploiement progressif jusqu'à 2021.

Aussi qualifiée 4G+. Permet de cumuler plusieurs fréquences, dont les différentes connexions s'additionnent. Bien sûr, il faut être dans une zone bien couverte, avec un téléphone compatible et un forfait adapté.

Débit théorique maximal de 600 Mb/s, voire 1 Gb/s (≈ 80 Mb/s en pratique).

13 High Speed Downlink Packet Access

14 Long Term Evolution

DOCUMENT 4 Trafic selon les fréquences

En France, l'ARCEP distribue les licences aux opérateurs. Prenons l'exemple de la 4G. Sur la bande des 800 MHz (une fréquence basse), Orange, SFR et Bouygues Telecom possèdent 10 MHz de largeur de bande chacun, ce qui correspond à un débit théorique de 75 Mb/s maximum. Sur la bande des 2 600 MHz, Orange et Free ont 20 MHz de largeur de bande, ils peuvent donc proposer jusqu'à 150 Mb/s chacun.

Avec l'augmentation des clients, une nouvelle technologie est née : **la 4G+**. Un smartphone équipé peut capter les trois fréquences 4G et cumuler les trois débits. Supposons un opérateur disposant de 10 MHz de largeur de bande sur le 800 MHz, 20 MHz sur le 1 800 MHz et 15 MHz sur le 2 600 MHz. Soit $75 \text{ Mb/s} + 150 \text{ Mb/s} + 112,5 \text{ Mb/s} = 337,5 \text{ Mb/s}$. Le client pourra donc profiter théoriquement d'un débit allant jusqu'à 337,5 Mb/s.

La 5G, annoncée pour la décennie 2020, promet des débits jusqu'à 10 Gb/s. En comparaison, les débits actuels des réseaux Ethernet vont de 10 Mb/s à 1 Gb/s et pour le Wi-Fi, de 11 Mb/s à 450 Mb/s.

ET LA 5G ?

D'après certains, « le réseau 5G constitue le futur de la téléphonie mobile, puisqu'il permettra aux abonnés de profiter de l'ultra haut débit, tout en limitant la consommation d'énergie des smartphones. Son débit maximal devrait être de 1 Gbit/s pour les téléchargements. Aujourd'hui, le réseau 5G est encore en test, même s'il est utilisé lors d'opérations militaires. Pour l'instant, cette technologie reste très onéreuse, et l'on estime qu'elle ne sera proposée au grand public qu'en 2020. Pour en bénéficier, vous devrez alors investir dans un smartphone compatible. »

Mais tout cela pose de nombreux problèmes écologiques et sanitaires...



À regarder (≈ 2 min) :
youtu.be/whWyG50qusc

Pages suivantes, quelques extraits tirés de l'ARCEP¹⁵ et l'ANFR¹⁶ →

¹⁵ L'Agence nationale des fréquences contrôle l'utilisation des fréquences radioélectriques et assure une bonne cohabitation de leurs usages par l'ensemble des utilisateurs. Elle s'assure également du respect des limites d'exposition du public aux ondes.

¹⁶ Autorité administrative chargée de la régulation des communications électroniques et des Postes et la distribution de la presse en France. C'est par exemple l'ARCEP qui est en charge des procédures d'attribution des fréquences, et du respect des obligations des opérateurs en termes de couverture mobile.



Débit

La 5G promet des débits jusqu'à **10 fois supérieurs** à ceux de la 4G, qui permettent des connexions en ultra haut débit : vidéo et divertissement, gaming, réalité augmentée et réalité virtuelle.



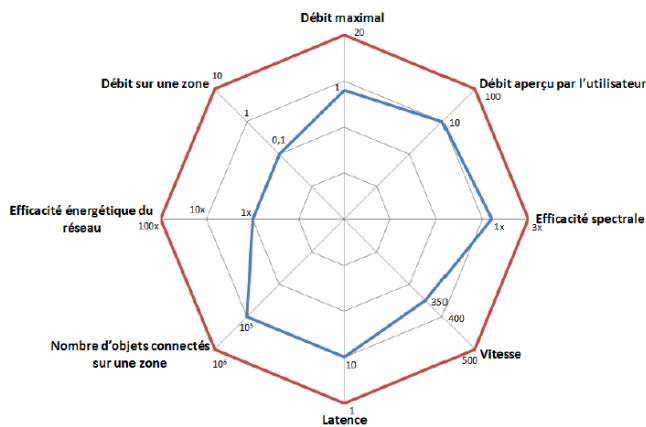
Latence

Divisée par 10, la latence (temps de réponse) ouvre des perspectives notamment pour les usages professionnels : voitures autonomes, pilotage à distance, téléchirurgie, automatisation industrielle...



Densité

La 5G offre une densité de connexion qui permet de **multiplier par 10** le nombre d'objets connectés simultanément au réseau, pour favoriser des usages tels que la traçabilité des produits, l'optimisation énergétique...



Performances/Génération	4G	5G
Débit maximal (Gbit/s)	1	20
Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
Efficacité spectrale	1x	3x
Vitesse (km/h)	350	500
Latence (ms)	10	1
Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km ²)	10 ⁵	10 ⁶
Efficacité énergétique du réseau	1x	100x
Débit sur une zone (Mbit/s/m ²)	0.1	10

Techniquement comment ça marche ?

La 5G est souvent présentée comme une unique technologie alors qu'elle est en réalité **l'assemblage d'innovations diverses** :

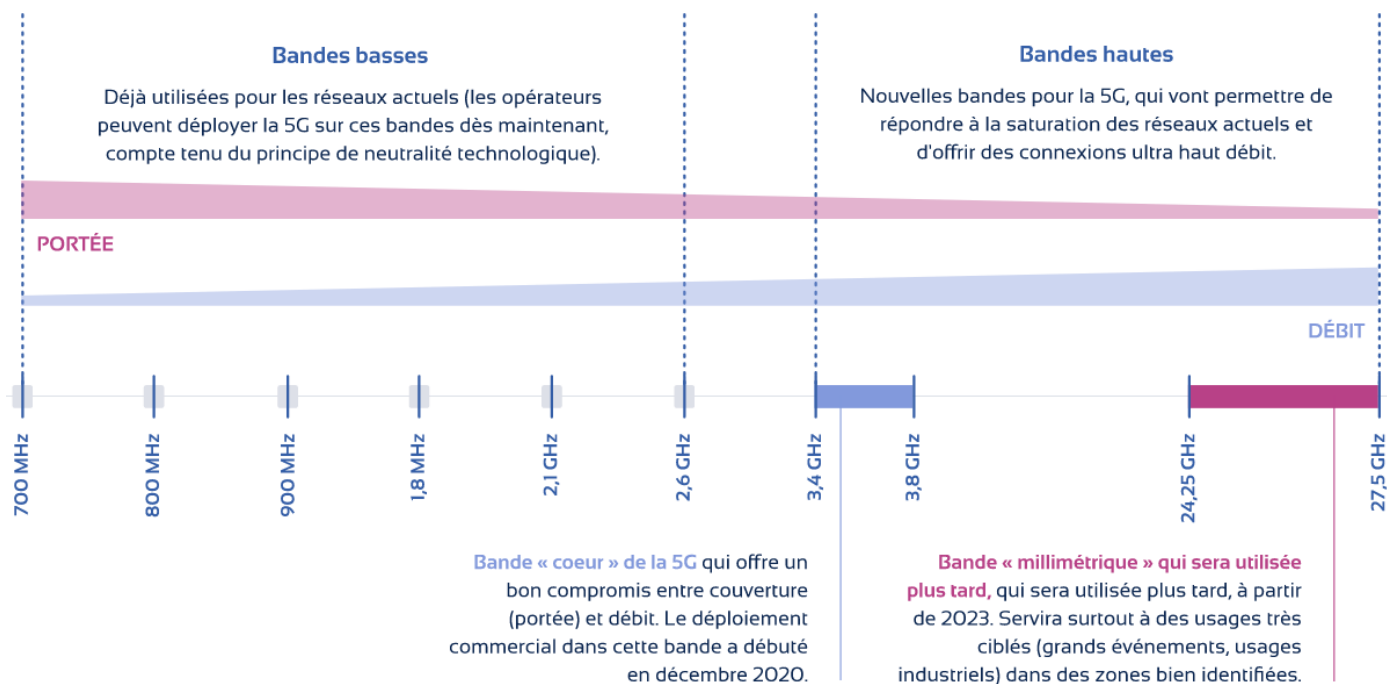
> Les bandes de fréquences de la 5G

Les réseaux mobiles, comme la radio, utilisent des ondes pour transporter des données. Ces ondes sont découpées en bandes de fréquences, qui nécessitent une autorisation de l'État pour être utilisées. Les différentes bandes de fréquences ont une portée et un débit différents : la 5G utilisera tout un ensemble de fréquences, attribuées récemment ou depuis plus longtemps :

Dans un premier temps, la 5G utilisera **les bandes de fréquences qui sont déjà utilisées** (notamment les bandes 700 MHz, 2,1 GHz ou 1800 MHz) ainsi que la bande de fréquences 3,5 GHz qui vient d'être attribuée aux opérateurs mobiles par l'Arcep le 12 novembre 2020. Cette bande offre un bon compromis entre couverture et amélioration du débit.

Dans un second temps, la 5G pourrait utiliser une autre bande, la bande 26 GHz (dite bande millimétrique). Cette bande n'est pas encore attribuée. Elle pourra permettre **des débits très importants en zone très dense** et pourra particulièrement être utilisée pour la communication entre objets connectés.

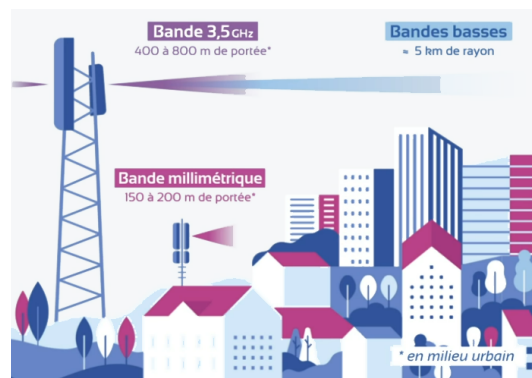
Remarque : les « ondes millimétriques » sont déjà utilisées par certains services comme les radars de vitesse, les systèmes d'anti-collision des véhicules, les portiques de sécurité des aéroports, etc.



Les fréquences de la 5G en Europe

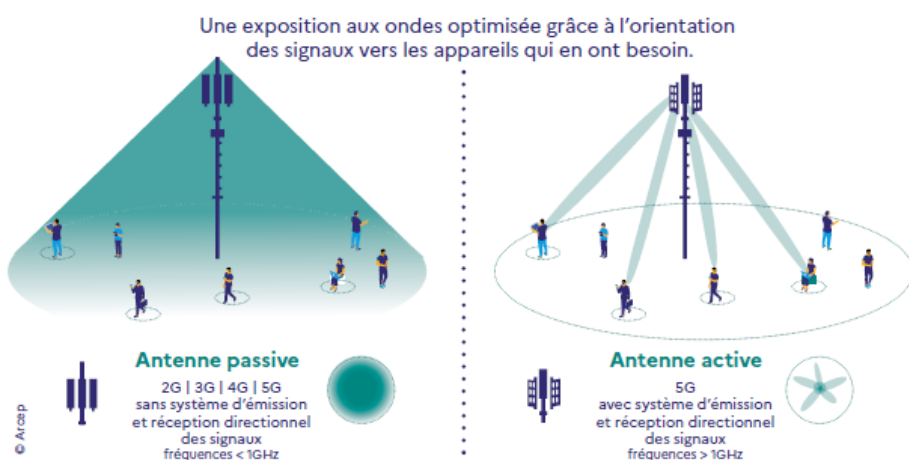
A moyen terme, les antennes 5G utiliseront trois bandes de fréquences, aux propriétés physiques différentes. D'autres bandes sont à l'étude.

	PÉNÉTRATION À L'INTÉRIEUR	PORTÉE	DÉBIT
La bande 700 MHz : déjà attribuée aux opérateurs (depuis fin 2015), qui peuvent d'ores et déjà y déployer la 4G, et pleinement disponible mi-2019.	++	++	--
La bande 3400 – 3800 MHz : en cours de réorganisation pour permettre l'attribution d'une grande partie pour la 5G, elle offre un bon ratio couverture/débit et est souvent identifiée, en Europe, comme la bande « cœur 5G » .	-	+	+
La bande 26 GHz : bande « millimétrique », avec des fréquences très élevées jusqu'à présent utilisées pour les liaisons satellitaires ou d'infrastructure, elle permettra des débits très importants dans des cellules de petite taille .	--	--	++



Plus une fréquence est basse, plus elle se diffuse loin et mieux elle pénètre les bâtiments (murs, etc.).

> Des antennes-actives innovantes



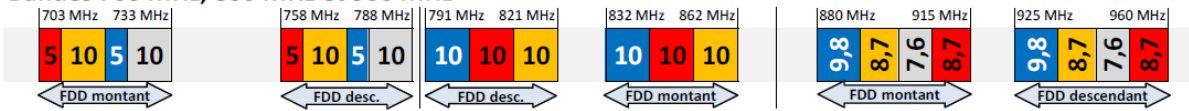
L'ensemble de ces innovations combinées permettront d'atteindre des débits jusqu'à 10 fois plus grands qu'en 4G et de réduire par 10 le temps de réponse (latence).

Les attributions de fréquences aux opérateurs de réseaux mobiles ouverts au public

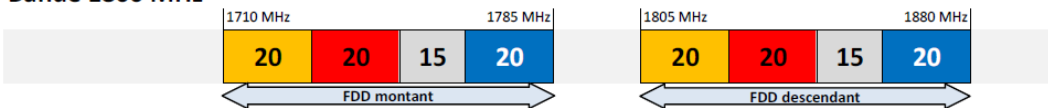
Bandes 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz,
1800 MHz, 2,1 GHz, 2,6 GHz et 3,4-3,8 GHz

Du 21 août 2021 au 8 février 2025

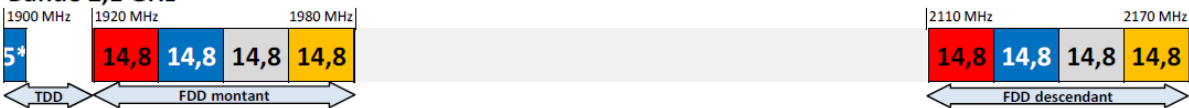
Bandes 700 MHz, 800 MHz et 900 MHz



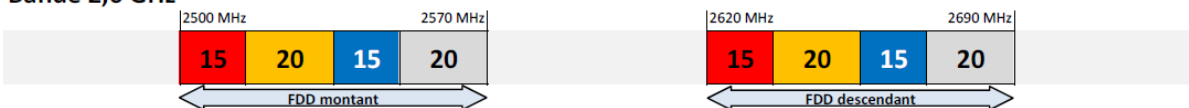
Bande 1800 MHz



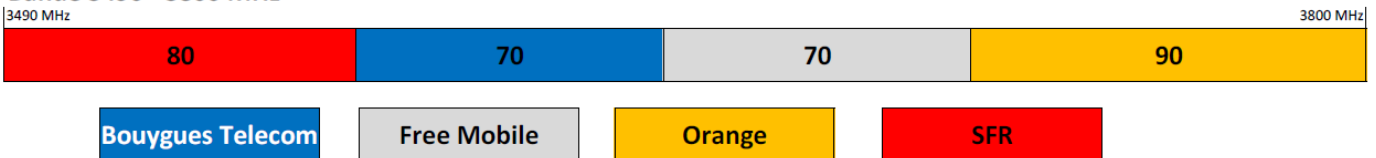
Bande 2,1 GHz



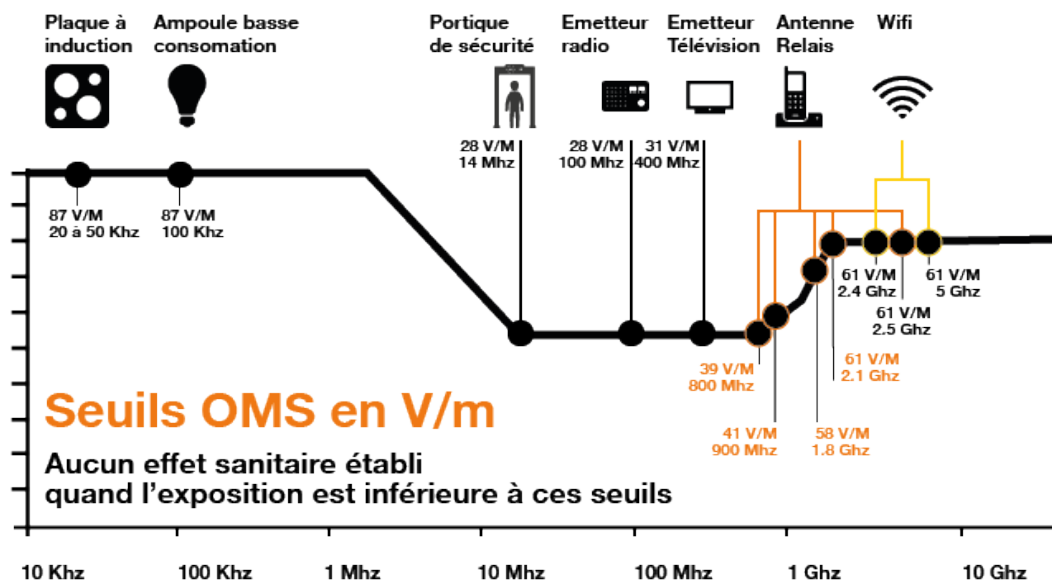
Bande 2,6 GHz



Bande 3490 - 3800 MHz



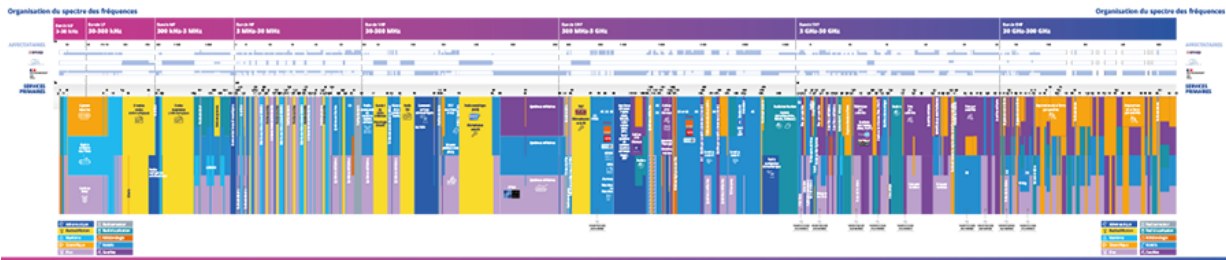
* jusqu'au 11 décembre 2022



Source : radio-waves.orange.com/fr/reseaux-et-antennes/5_g

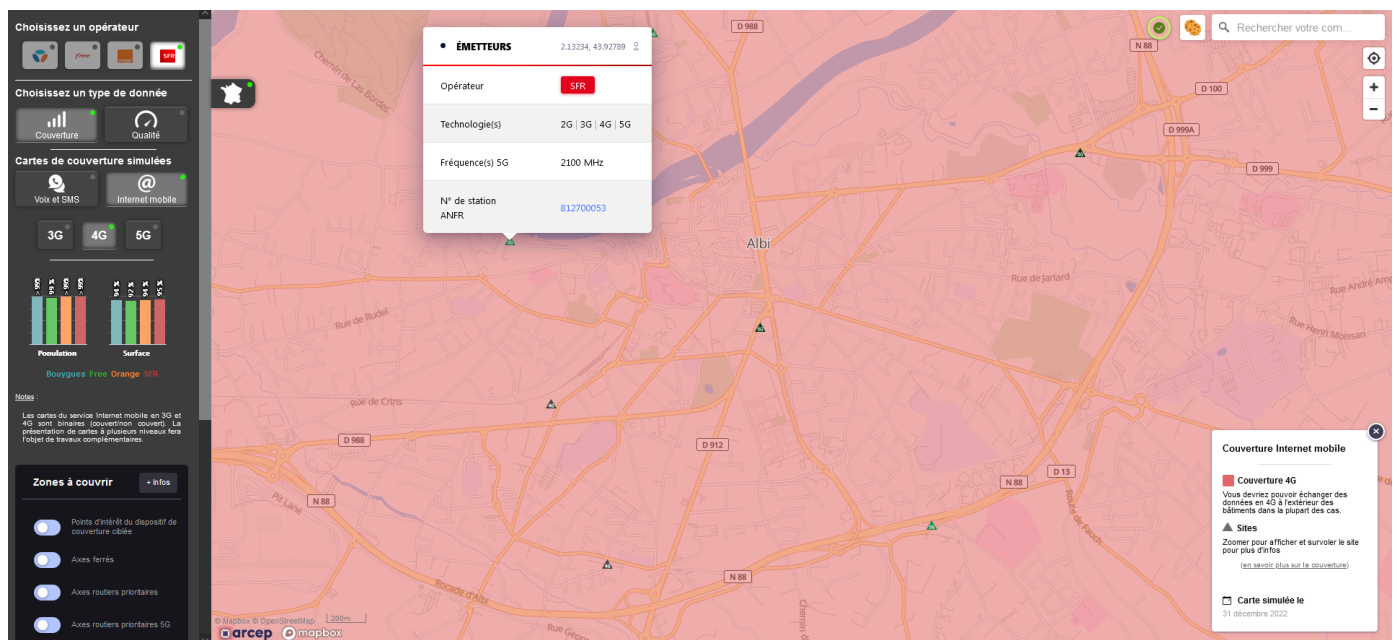
Compléments pour les curieux

→ La frise des bandes de fréquences par l'ANFR, par classe de service (maritime, mobile, aéronautique, radioamateur, etc.) : anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/ANFR/ANFR-spectre-frequences-juin-2020.pdf



et sa version interactive : solar-web.anfr.fr/mashup-ui/page/spectre

→ Outil cartographique de l'ARCEP qui permet de comparer les opérateurs mobiles : monreseau-mobile.arcep.fr



→ Un bon dossier sur la 5G, par l'ANFR : 5g.anfr.fr

→ Aspects techniques de la 5G (imbrication entre 4G et 5G) par l'ARCEP : arcep.fr

