
Quelques exemples de technologies sans fil

équipe Privatics - Inria Rhône-Alpes

vincent.roca@inria.fr

1 octobre 2025

Vue d'ensemble

1. technologies IEEE-802.11* (Wifi)
2. **BLE, le "bluetooth low energy"**
3. réseaux LTE/LTE Advanced et 4G
4. réseaux satellites

Partie 2 :

Bluetooth Low Energy (BLE)

Introduction à BLE

- une déclinaison faible consommation de Bluetooth

- mais **pas de compatibilité Bluetooth (historique) / BLE** mais une cohabitation possible

- cible les objets connectés et IoT avec faible conso énergétique

- inclus dans les spécifications Bluetooth 4.0 en 2010

- des produits commerciaux dès 2012

- nouvelle version en 2016 : Bluetooth 5

- Bluetooth 5.4: février 2023



- performances

- portée théorique 100 m, en pratique 2-5 m

- économie d'énergie

- de 1W (Bluetooth) à 0,01 / 0,5 W (BLE)

- débits théoriques : 125 kbps, 1 ou 2 Mbps

La couche physique de BLE

- 40 canaux de 2MHz dans la bande ISM 2.4 GHz
 - 3 canaux « advertising channels », 37 canaux de données
- variante FSK (mod. de fréquence) sur chaque canal
 - "Gaussian Frequency-Shift Keying" pour réduire la largeur de spectre occupée par le signal modulé (transitions plus progressives)
- utilise FHSS (frequency hopping)

Des transmissions par "burst"

- on transmet une fois connecté à un équipement
 - chacun peut transmettre un faible nombre de paquets (ex. 6)
 - chaque paquet fait au max 20 octets
 - puis passe en mode IDLE pendant 7.5ms à 4s
 - réduit drastiquement la consommation énergétique !
 - ex. avec 7.5ms :
 - $\text{débit}_{\text{max}} = 1\ 000 / 7.5 * 8 * 20 = 21,3 \text{ kbps}$
- mode broadcast (Advertising) également disponible
 - transmission périodique sans se soucier de qui écoute
 - principe de base pour les applis de traçage numérique Covid
 - ROBERT/TousAntiCovid
 - Google/Apple Exposure Notification (GAEN)
 - détourne la technologie BLE pour estimer une distance...

Vue d'ensemble

1. technologies IEEE-802.11* (Wifi)
2. BLE, le "bluetooth low energy"
3. **réseaux LTE/LTE Advanced et 4G**
4. réseaux satellites

Partie 3 :

Réseaux LTE/LTE Advanced et 4G

Nombreux transparents inspirés/empruntés à wikipedia, "LTE introduction" (Ericsson), et Moray Rumney (Agilent)... Merci.

Introduction



- une migration depuis 3G en Europe

- UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

- atteint 250 Kbps

- HSPA (High Speed Packet Access), évolution d'UMTS

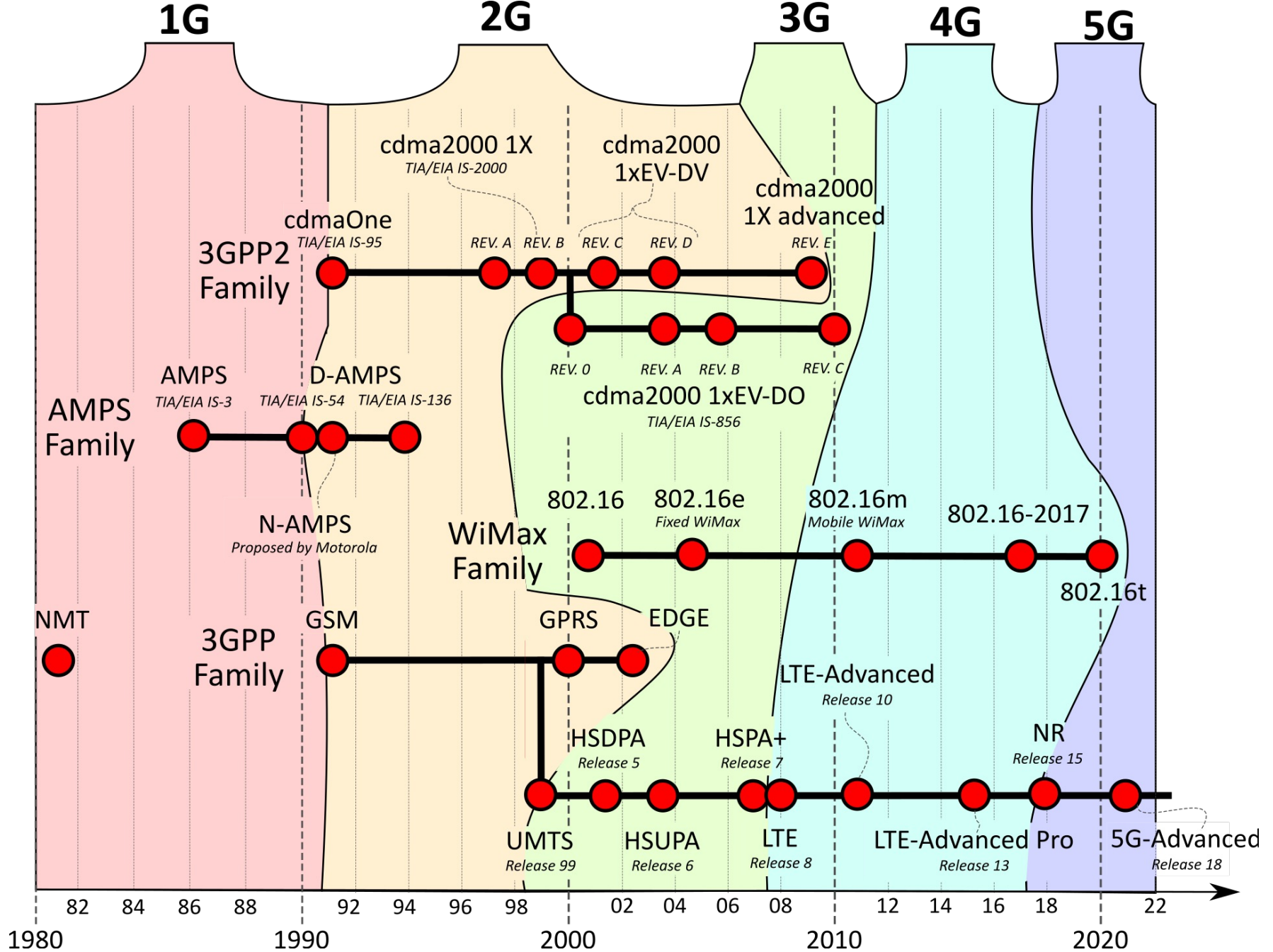
- atteint 14,4 Mbps (théorique) en downlink, et 5,8 Mbps en uplink

- une migration depuis CDMA2000 aux US

- A propos de CDMA, LTE et Qualcomm

- « La famille des technologies CDMA, normalisée par l'organisme 3GPP2 a été développée de bout en bout par la société américaine Qualcomm. En tant que propriétaire des droits, Qualcomm réalisait une grande part de son chiffre d'affaires avec ses licences CDMA tout en investissant en parallèle sur les normes concurrentes telle le LTE), **quitte à en ralentir la finalisation en multipliant les développements.** »

- source: <https://fr.wikipedia.org/wiki/CDMA2000>



Introduction... (suite)

● LTE (Long Term Evolution) (2007)

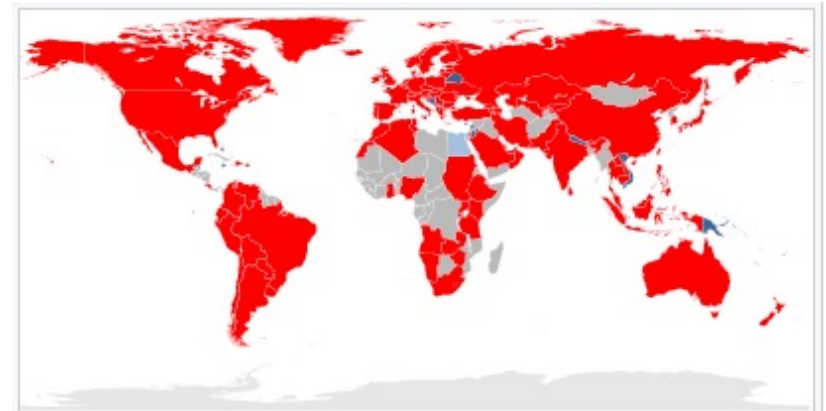


- travaux démarrés en 2004 par le 3GPP
- déploiement commercial depuis décembre 2009 (Suède)
- qualifié 3,9G car ne respecte pas tout le cahier des charges
 - commercialisé comme 4G car apporte des gains significatifs

● LTE Advanced (2011)



- véritable 4G, conforme au cahier des charges
- évolution de LTE

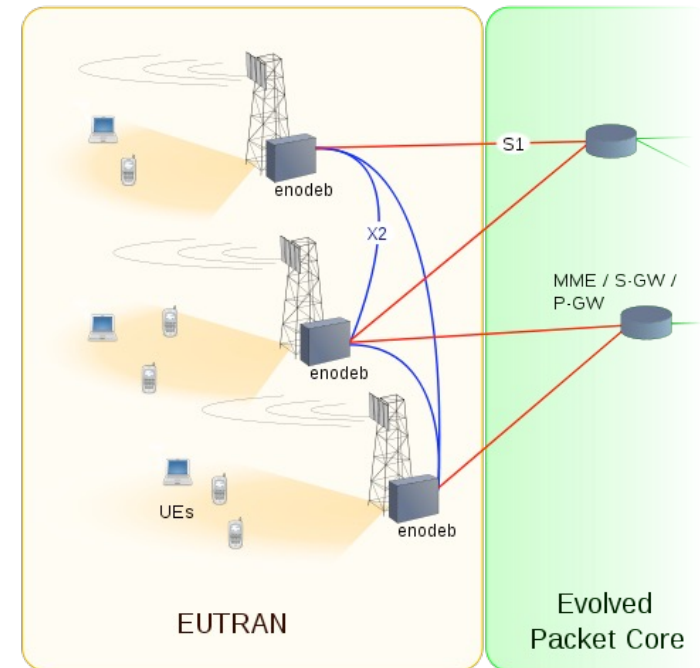


Pays équipés début 2018 de réseaux mobiles LTE :

- réseaux commerciaux.
- réseaux en cours de déploiement.
- réseaux en test.

Architecture

- **eUTRAN** (evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) : **réseau d'accès terrestre**
 - **eNode B** : station de base, connectée avec voisins et EPC
 - support IPv6 natif ou double stack
- **EPC** (evolved Packet Core) : **réseau de cœur de l'opérateur**
 - réseau **full-IP** (signalisation, données, voix)
 - IP de bout en bout permet une interconnexion facile avec Internet et une réduction des latences de communication



Architecture... (2)

- eUTRAN : taille des cellules adaptée

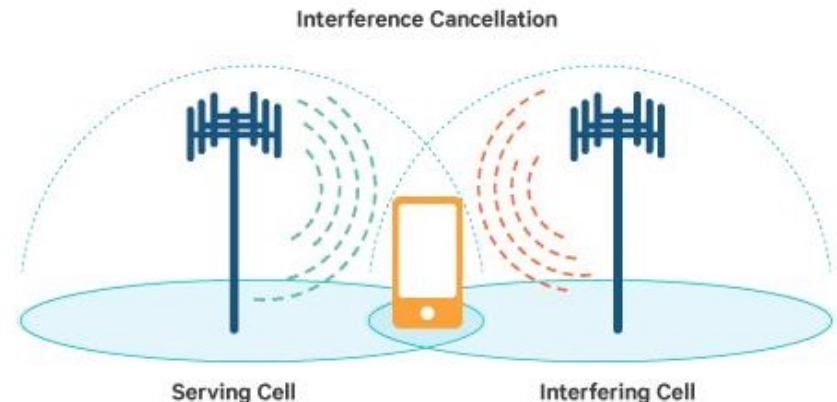
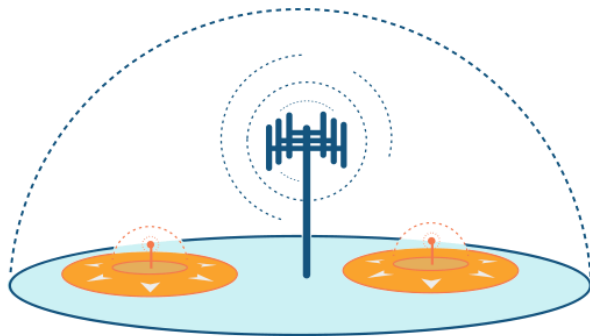
- en zone rurale (basse fréquence), cellules de taille 5 km (perf. optimales) à 100 km (perf. raisonnables)
- en zone urbaine (haute fréquences, par ex. 2,6 GHz), cellules de taille 1 km ou moins

- eUTRAN : le réseau d'accès peut être hétérogène

- macro, pico et femto cellules peuvent cohabiter
- meilleure densité d'utilisateurs

- eUTRAN : amélioration du signal en bordure

- suppression d'interférences en bordure de cellule



Modulations

- repose sur OFDM pour le flux **descendant**
 - Unité de base : « ressource block », constitué de 12 sous-porteuses (15kHz chaque) et 7 symboles OFDM (durée 0.5ms)

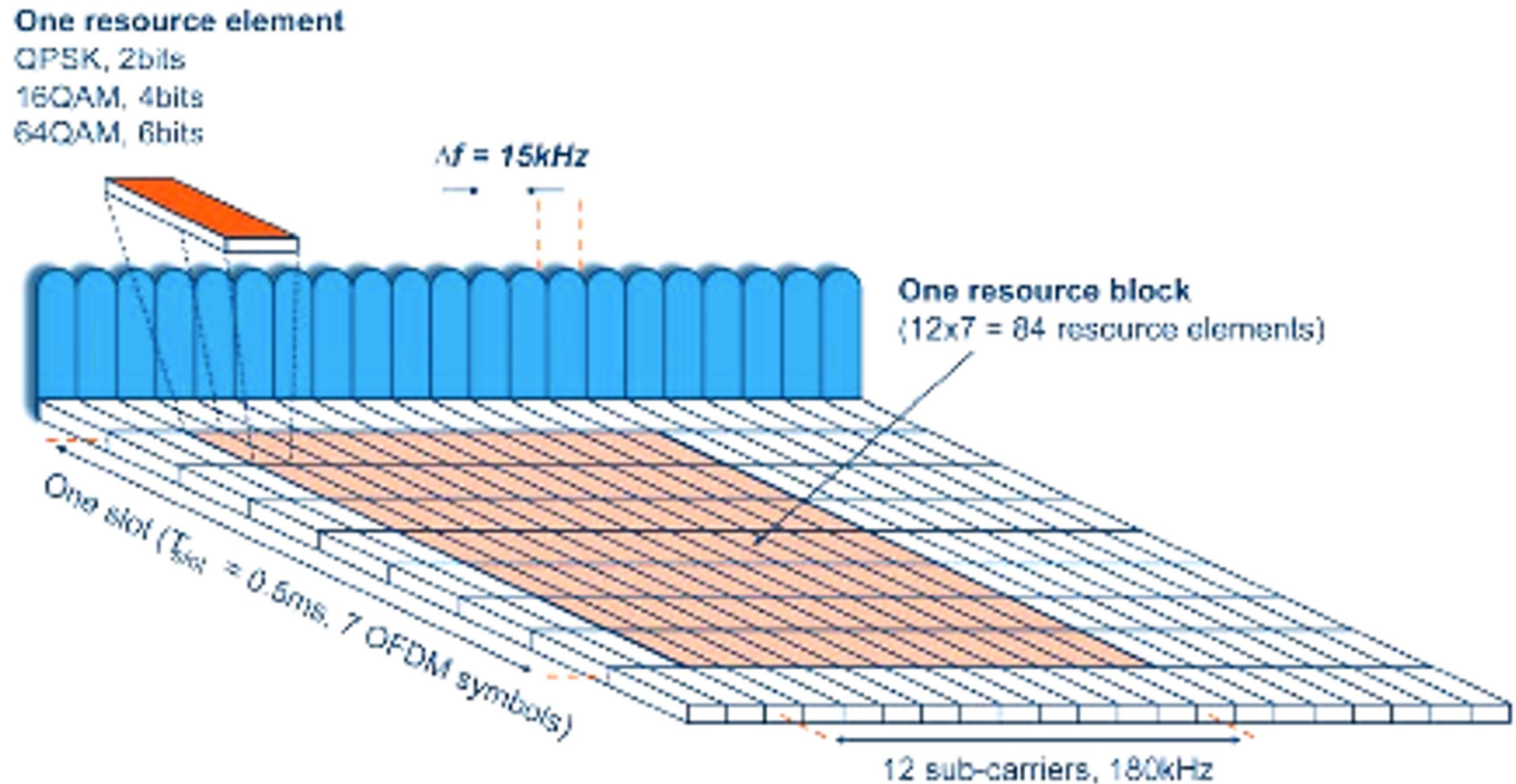


Figure 4: The LTE downlink physical resource based on OFDM

Modulations... (2)

- repose sur OFDM pour le flux descendant

- Un terminal a un nombre de « ressource blocks » qui dépend des besoins en débit et des ressources radio disponibles
- allocation redéfinie chaque TTI (transm. time interval) = 1ms pour un terminal
- les ressource blocks ne sont pas nécessairement contigus
- débit max (cas de LTE) :
 - une bande passante de 20 MHz (limite de LTE) contient 1200 sous porteuses (15 kHz), (il en faut 12 par ressource blocks)
 - une seconde contient 2000 slots (0.5 ms)
 - soit $1200 / 12 * 2000 = 200\ 000$ ressource blocks / sec. à répartir entre terminaux, pour une antenne simple donnée

Bandes de fréquences

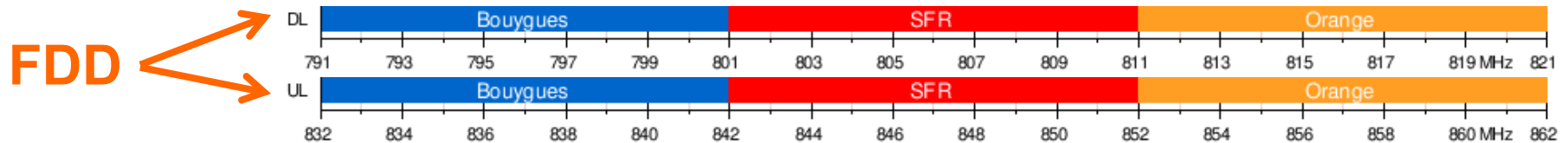
- > 30 bandes qui s'étalent de 450 MHz à 3,8 GHz

- au niveau mondial, disponibilité variable suivant le pays

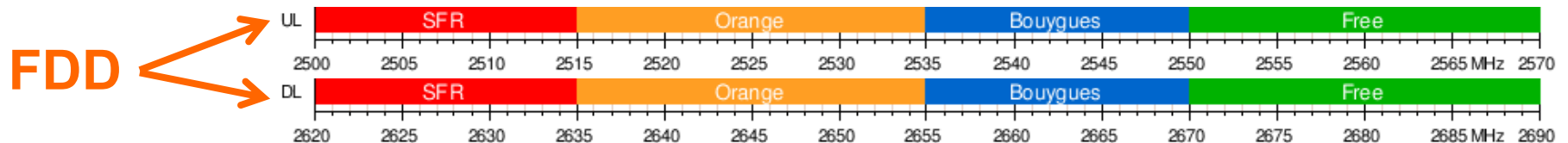
- en France

○ bande des 800 MHz (zones rurales), 4G

- libérée par la TV analogique



○ bande des 2600 MHz (centres urbains), 4G



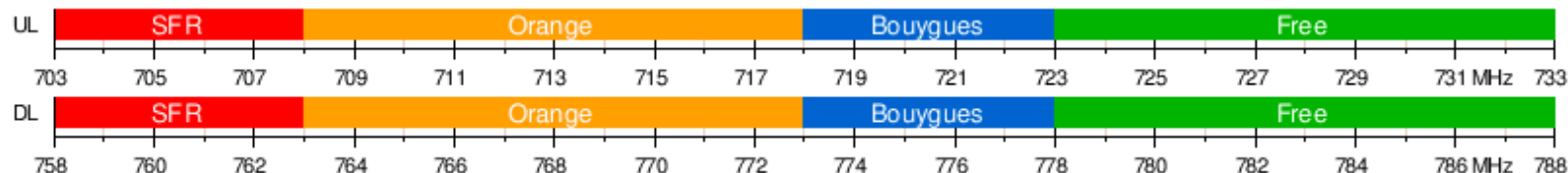
- tarifs 683 M€ (Bouygues), 891 M€ (Orange), 1 065 M€ (SFR)

○ bande 1800 MHz, partage 2G-4G

Bandes de fréquences... (2)

● en France...

○ bande des 700 MHz, 4G



- la licence est associée à des obligations de couverture minimale

Échéance	17 janvier 2022	17 janvier 2027	8 décembre 2030
Population métropolitaine		98 %	99,6 %
Zone prioritaire	50 %	92 %	97,7 %
Population de chaque département		90 %	95 %
Axes routiers prioritaires			100 %
Communes du programme "zones blanches"		100 %	
Lignes de train (couverture nationale)	60 %	80 %	90 %
Lignes de train (couverture régionale)		60 %	80 %

Performances et caractéristiques

- désormais voix sur IP (VoLTE, Voice over LTE)
 - signalisation basée sur IMS et SIP
 - compression d'entête pour réduire les latences (RoHC)
 - si non disponible, le téléphone bascule en 2G ou 3G
 - suspension des communications 4G durant l'appel
 - nécessite une procédure spéciale lors du roaming entre zones supportant ou non VoLTE/4G
 - à terme VoLTE permet d'arrêter 2G et 3G sur les zones couvertes par la 4G
 - meilleur codec audio
 - AMR-WB, sur la bande 50 Hz – 7 kHz (au lieu de 300 Hz – 3,4 kHz), de 6,60 à 23,85 kbit/s

Performances et caractéristiques... (2)

- **passage LTE \Rightarrow LTE advanced**

- **agrégation de porteuses (jusqu'à 100 MHz)**
- **meilleur MIMO (2, 4 ou 8 antennes)**
- **meilleure modulation (jusqu'à 256-QAM)**
- **techniques d'optimisation en bordure de cellule**

- **les performances s'améliorent progressivement suivant les versions...**

Performances et caractéristiques (2)

LTE

LTE-advanced

Catégories des terminaux LTE et LTE Adv (3GPP rel.11) ^{A1}												
Catégorie		1	2	3	4	5	6 ^{A1}	7	8 ^{A2}	9	10	
Débit crête (Mbit/s)	Descendant	10	50	100	150	300	300	300		450	450	
	Montant	5	25	50	50	75	50	100		50	100	
Caractéristiques fonctionnelles minimales ^{A3}												
Largeur de la bande de fréquence de chaque porteuse		1,4 à 20 MHz										
Nombre minimal de porteuses radio agrégées dans le sens descendant		1					1, 2 ou 3			2, 3 ou +		
Nombre de porteuses radio agrégées dans le sens montant		1					1	2		1	2	
Modulations	Descendante	QPSK, 16QAM, 64QAM										
	Montante	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM			QPSK, 16QAM		

Performances et caractéristiques (3)

LTE-advanced

Nouvelles catégories de terminaux LTE Adv (3GPP rel.12) ^{B 12}							
Catégorie		11	12	13 ^{B 1}	14 ^{B 2}	15	16
Débit crête (Mbit/s)	Descendant	600	600	390	3900	750	1000
	Montant	50	100	150	NA ^{B 3}	NA	NA
Caractéristiques fonctionnelles minimales ^{B 4}							
Largeur de la bande de fréquence de chaque porteuse		1,4 à 20 MHz					
Nombre de porteuses radio agrégées dans le sens descendant		3 (256QAM) ou +		2 (256QAM)	5 (256QAM)	4 ou +	5
Nombre de porteuses radio agrégées dans le sens montant		1	2	2	Non applicable		
Modulations sur chaque sous-porteuse	Descendante	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM					
	Montante	QPSK, 16QAM,		64QAM	Non applicables		

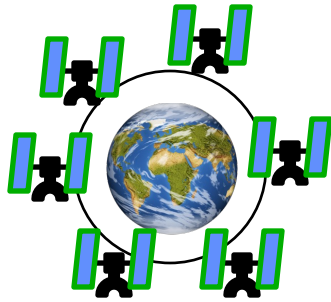
Vue d'ensemble

1. technologies IEEE-802.11* (Wifi)
2. BLE, le "bluetooth low energy"
3. réseaux LTE/LTE Advanced et 4G
4. **réseaux satellites**

Réseaux satellite

- wide area coverage but expensive infrastructure
- low capacity if the goal is to transmit **individual** programs
 - large coverage, so bandwidth is shared between many users
 - e.g. satellite-based Internet access... but there are tricks
- ...but high capacity if the goal is to **broadcast** the same content
 - e.g. DVB-* systems
- two types
 - Geostationary orbit systems (GEOS):
 - 3 satellites are sufficient, but lower capacity for given spectrum
 - Low-earth-orbit system (LEOS):
 - many satellites in lower orbit, lower latency, higher capacity, less expensive satellites

Réseaux satellite (2)



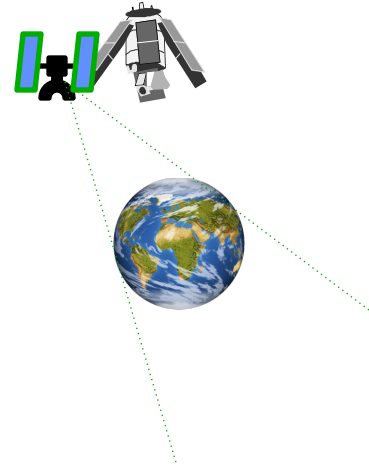
Low Earth Orbits

Height: 700-2000 km

Rotation Period: 90 min

Time in Line of Sight (LOS): 15 min

Earth/Sat./Earth latency < 0.1 sec



Geostationary Orbits

Height: 35,780 km

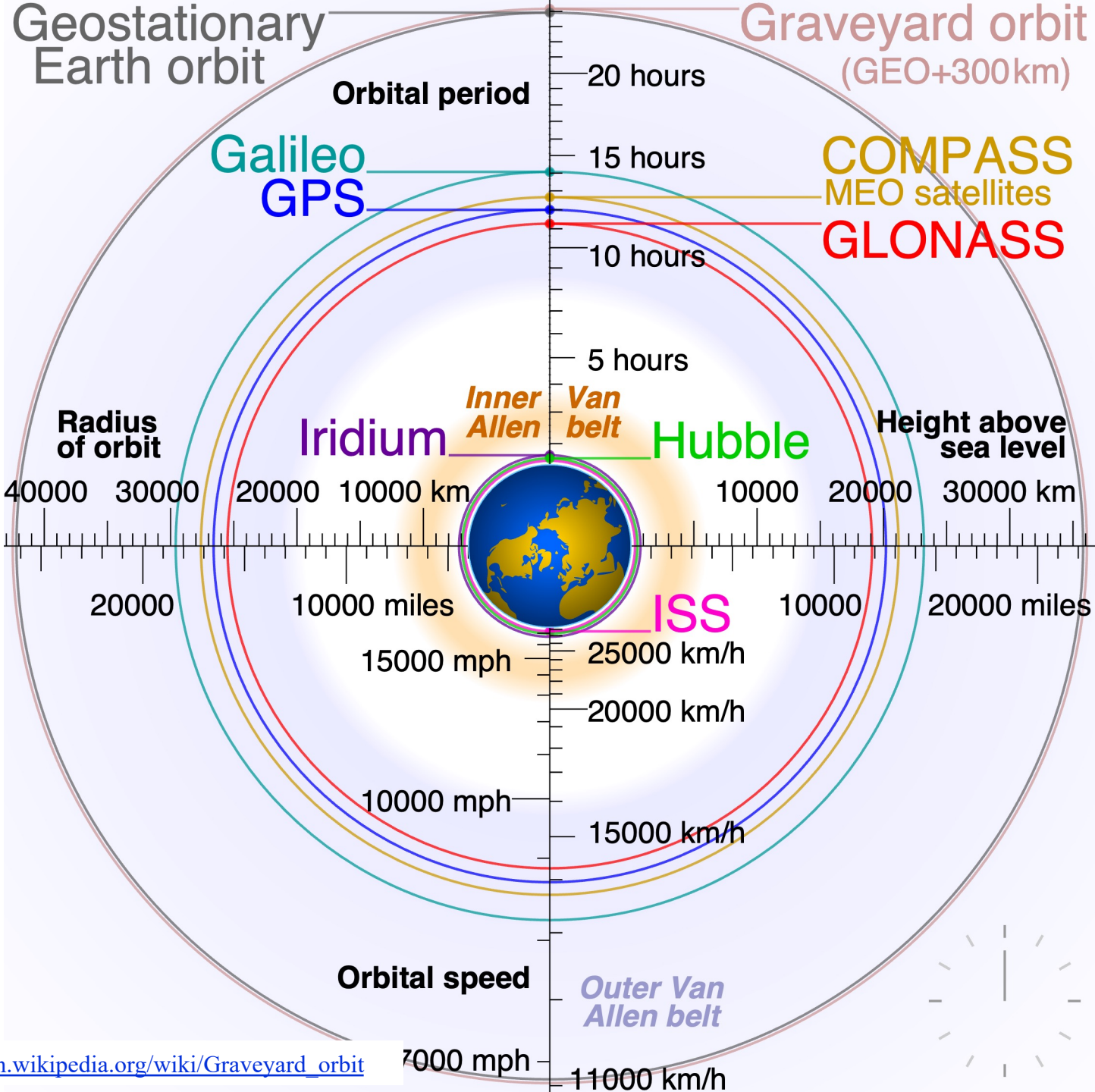
Rotation Period: 24 hours

Time in Line of Sight (LOS): 24 hours

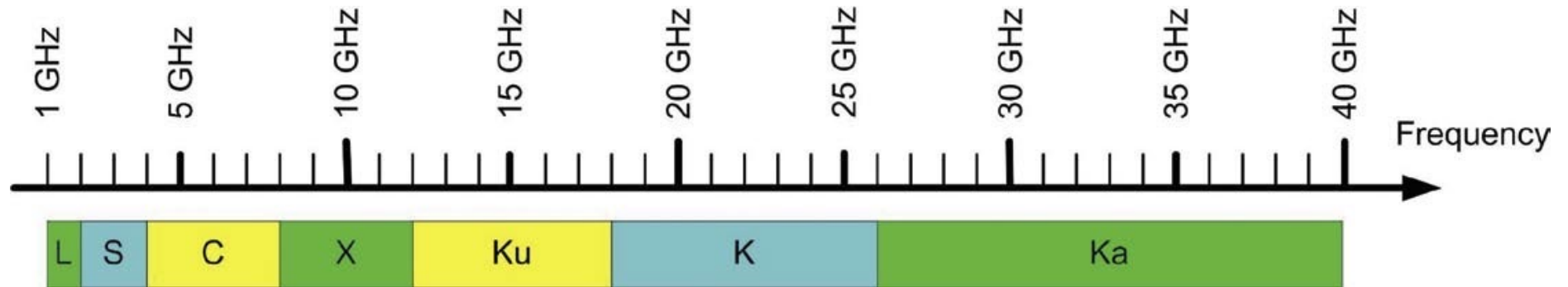
Earth/Sat/Earth Latency 0.25 sec

Réseaux satellite (3)





Réseaux satellite (5)



- C-band (approx. 4 GHz downlink, 6 GHz uplink)
 - low capacity and high terrestrial interference
- Ku-band (approx. 12 GHz downlink, 14 GHz uplink)
 - higher capacity, less crowded, but rain interference is the main issue
- Ka-band (approx. 19 GHz downlink, 29 GHz uplink)
 - much greater bandwidth, preferred for high speed Internet via satellite, with more pronounced rain interference problem

Constellations satellitaires

● anciennes constellations

- Iridium (phone, 66 LEOS, Boeing)
- GlobalStar (phone, 48 LEOS, Qualcomm Inc., Loral Corp.)
- ICO (phone, 10 MEOS, Hughes)
- SkyBridge (broadband, 80 LEOS, Alcatel)
- Eutelsat (video/radio, 15 GEOS, Eutelsat)

● nouvelles constellations en orbite basse

- Starlink (Internet, >7000 (09-2024) LEOs, SpaceX)
- Eutelsat/OneWeb (Internet, 650 LEOs (2025), objectif qq 1000)
- Kuiper (Internet, qq 1000 LEOs, Amazon)

Constellations satellitaires (2)

● Example: Iridium (anciennes technologies)

- new generation satellites launched (Jan. 2017–Jan. 2019)
- 66 operational LEO satellites + 9 spare ones, at 780 km height
- relies on TDMA/FDMA around 1.6 GHz and approx. 10 MHz bw
 - 1100 phone calls at 2.4 kbps per satellite
- each satellite is continuously linked to 4 adjacent ones
 - creates a full mesh to hand off traffic and ensure continuous connection, with ground communications only when needed
- handoffs:
 - as a satellite travels over the horizon: every 50s
 - if a satellite disappears behind an obstacle: try another sat.

[...] Iridium Certus® enables voice and data services, including remote communications, personnel tracking, and over-the-horizon, beyond line-of-sight, and on-the-move communications at a range of speeds at your command. U.S. government and military customers can rely on the secure, low-latency connectivity of Iridium Certus® through the dedicated U.S. government Gateway and secure infrastructure.



Iridium 9575A (U.S. Government Only)

[Where to Buy](#)

Constellations satellitaires (3)

- Tooway : Internet « haut débit » par satellites (Eutelsat / ViaSat)



- Commercialisé par BigBlu Broadband (Oct. 2020)
- ... mais pas certain que ce soit encore le cas (2025) !



BIGBLU : INTERNET PAR SATELLITE EN TRÈS HAUT DÉBIT DÈS 31,99€/MOIS



OFFRE BRONZE

16 MB/S

31,99€/MOIS

10 GB de
données
prioritaires

OFFRE SILVER

30 MB/S

41,99€/MOIS

50 GB de
données
prioritaires

OFFRE GOLD

50 MB/S

74,99€/MOIS

100 GB de
données
prioritaires



Constellations satellitaires (5)

● StarLink (SpaceX)

- **Constellation > 7000 satellites (09-2024)**
- **viser connexion HD Internet (mondial)**
- **orbite basse, latence < 35 ms**
- **336 – 1325 km d'altitude**
- <https://www.youtube.com/watch?v=Dpu7ayTnYpE> (3:11 – 8:11)



La constellation Starlink doit comporter à terme 12 000 satellites répartis sur trois niveaux d'ici le milieu des années 2020 :

- 1 600 doivent être placés à une altitude de 550 kilomètres,
- 2 800 satellites émettant dans les bandes Ku et Ka doivent circuler à une altitude de 1 150 km, et
- environ 7 500 satellites émettant en bande V sont placés à une altitude de 340 km.

La bande V (40 à 75 GHz) qui est située immédiatement après la bande Ka (12 à 40 GHz) n'a jusque-là pas été utilisée par les satellites de télécommunications et son usage est donc expérimental. Cette gamme de fréquence est considérée comme prometteuse car elle permet de très grands débits, mais elle est sensible aux fluctuations météorologiques (pluie, mauvais temps), ce qui impose des solutions de contournement.

Source Wikipedia : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Starlink>

Constellations satellitaires (6)

● Eutelsat/OneWeb

- constellation 650 LEO (faible latence)
- 1200 km d'altitude
- pas ciblé grand public, mais entreprises / gouvernement / maritime / aérien / transport
- hautement stratégique (déploiement en Ukraine)...
- l'état FR prend le contrôle d'Eutelsat (2025)

