

GDR CIS – Politiques environnementales du numérique

Fonctionnement et déploiement des réseaux 5G

Bastien Béchadergue

Université de Versailles Saint-Quentin

IUT de Vélizy / Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles

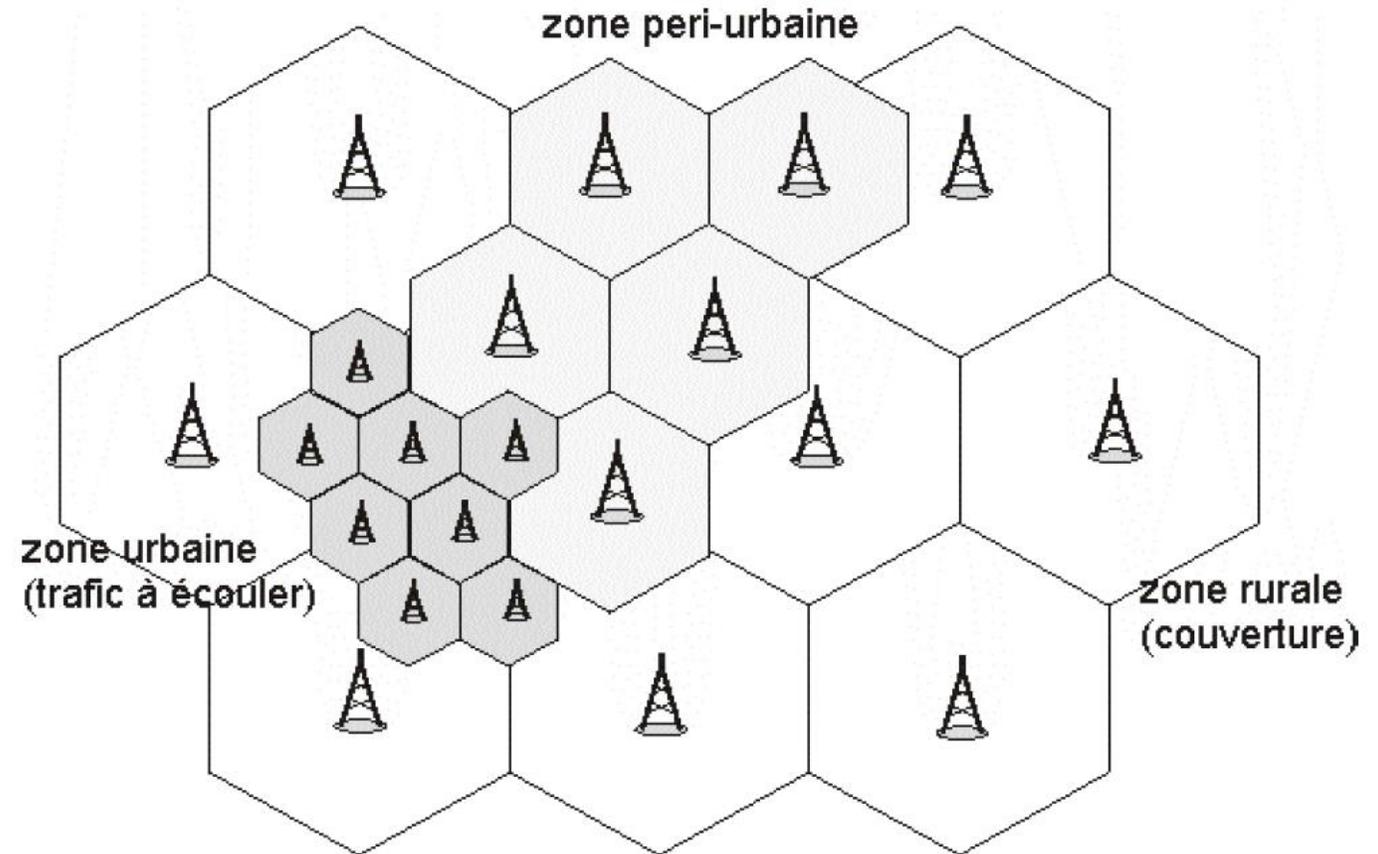
bastien.bechadergue@uvsq.fr

1. Quelques notions fondamentales
2. De la 1G à la 5G, un rapide historique
3. L'écosystème de normalisation de la 5G
4. Nouveautés techniques de la 5G
5. Déploiement et usages actuels de la 5G
6. Quels futurs cas d'usage pour la 5G ?

1. Quelques notions fondamentales
2. De la 1G à la 5G, un rapide historique
3. L'écosystème de normalisation de la 5G
4. Nouveautés techniques de la 5G
5. Déploiement et usages actuels de la 5G
6. Quels futurs cas d'usage pour la 5G ?

Un réseau cellulaire, c'est quoi ?

- ✓ Un **réseau cellulaire** est un **réseau de communication** offrant un ensemble de **services** (téléphonie, messages, données...) en situation de **mobilité**.
- ✓ Il repose sur la notion fondamentale de **cellule** (concept défini au sein des *Bell Labs* au début des années 1970).
- ✓ Une cellule est une **zone géographique délimitée** (zone de couverture), contrôlée par une **station de base**, dans laquelle des **ressources** (fréquences, temps...) sont partagées pour desservir des **équipements utilisateurs**.



La face visible des réseaux cellulaires

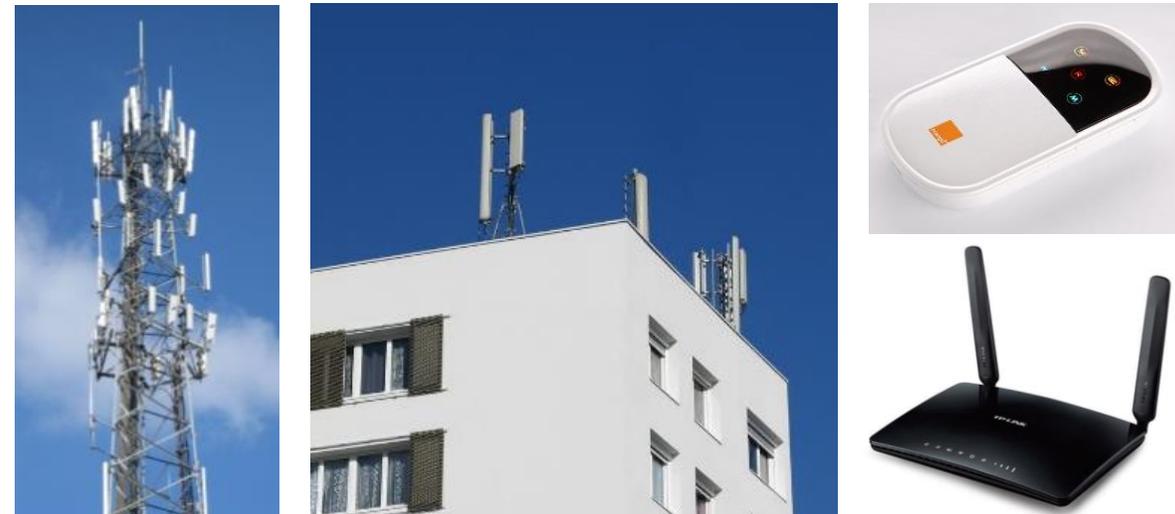
Equipement utilisateur

- ✓ Equipement muni d'une ou plusieurs antennes émettrices/réceptrices avec lequel un utilisateur peut communiquer avec une station de base et donc se connecter à un réseau mobile.



Station de base

- ✓ Equipement muni d'une ou plusieurs antennes émettrices/réceptrices avec lequel communiquent les équipements utilisateurs pour accéder au réseau mobile.
- ✓ Porte d'entrée/sortie du réseau d'accès radio ou *Radio Access Network (RAN)*.



Cellules en environnement urbain

ANFR
AGENCE NATIONALE DES FRÉQUENCES

Identifiant, E-mail Mot de passe OK S'inscrire
Mot de passe oublié ?

Paris

Configurer l'affichage

Informations disponibles

SUPPORT 691522

Détail du support :

N° identification : 691522
Description du support : Immeuble / 41m / Copropriété, Syndic, SCI
Adresse : 121-125 AV LEDRU ROLLIN
Code Postal / Commune : 75011 PARIS-11E--ARRONDISSEMENT

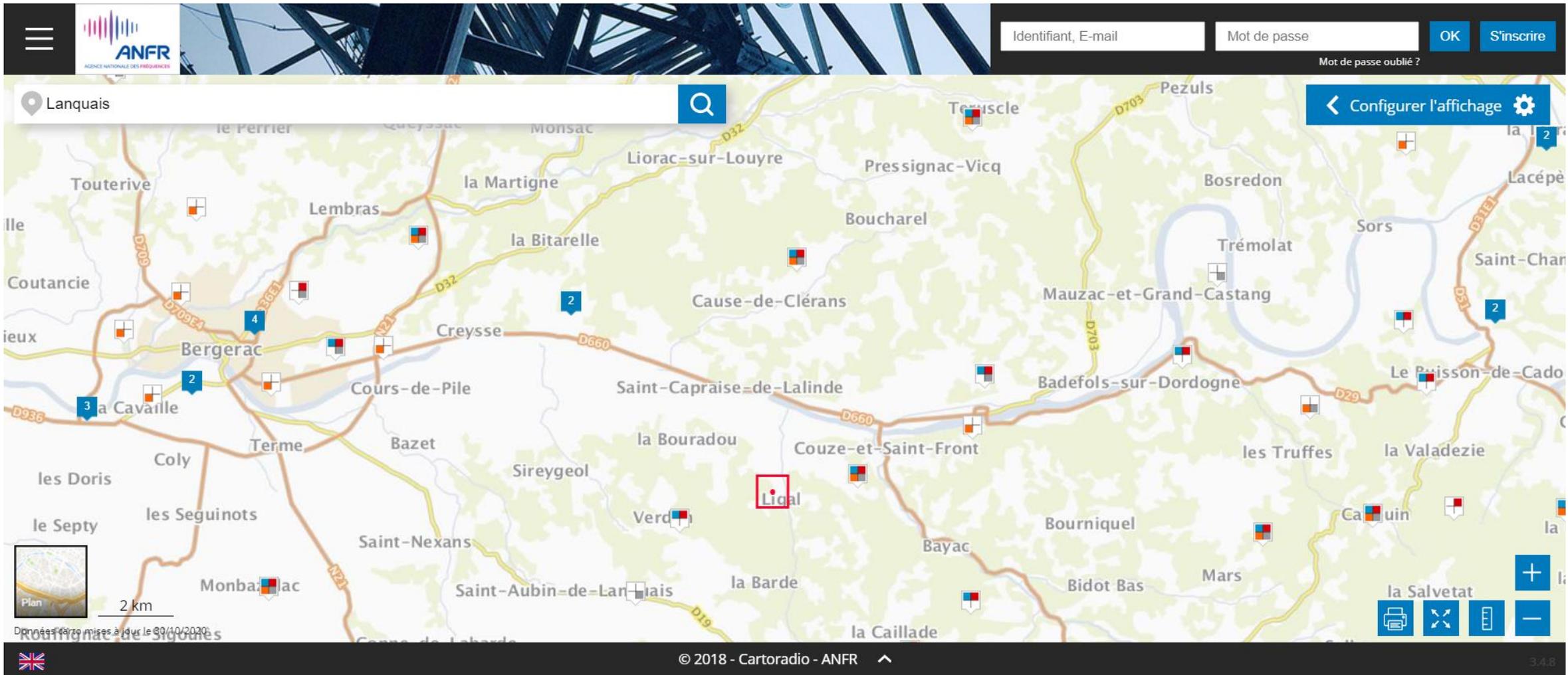
Téléphonie

2G/3G/4G orange™ 2G/3G/4G

SFR 2G/3G/4G

© 2018 - Cartoradio - ANFR

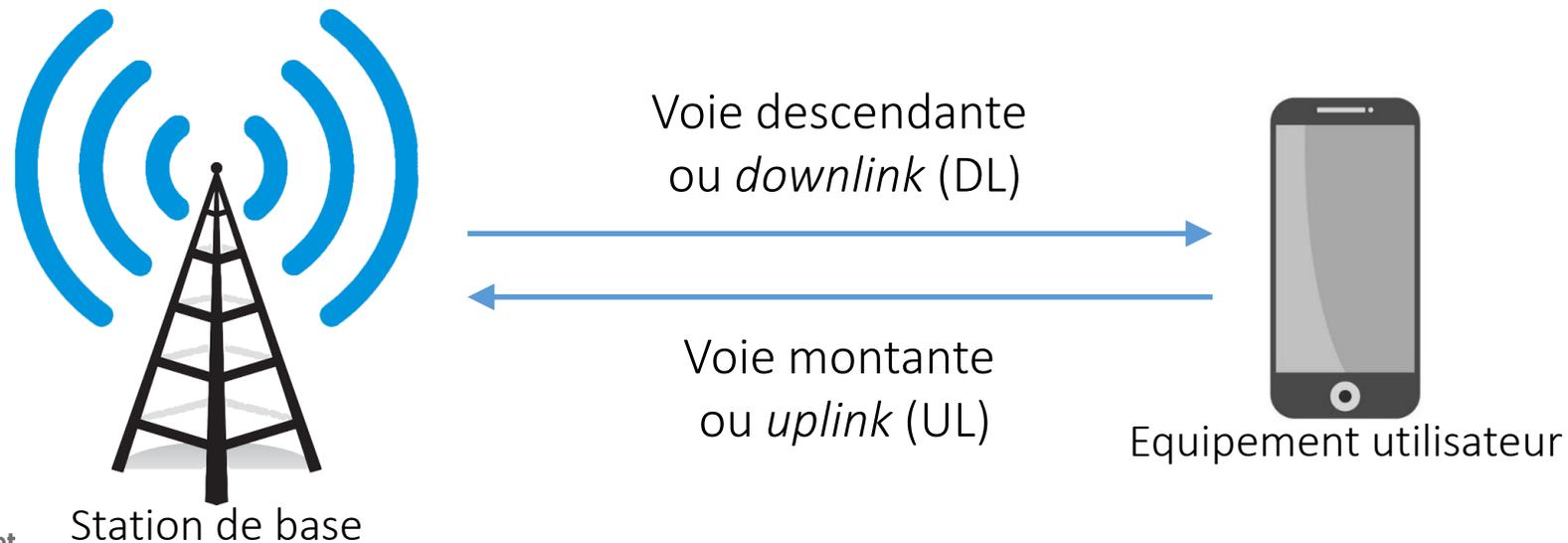
Cellules en environnement rural



Source : <https://www.cartoradio.fr/index.html#/cartographie/stations>

Downlink, uplink, ressources et capacité

- ✓ Station de base = cellules = zones de couverture → **deux sens de communication** : *downlink* et *uplink*.
- ✓ Deux principales **ressources** de communication :
 - La **fréquence** : utilisation de bandes de fréquences différentes.
 - Le **temps** : utilisation de « tours de paroles » synchronisés.
- ✓ L'ensemble des ressources détermine la **capacité** de la cellule, qui est le **trafic total maximal** que la cellule peut écouler.
- ✓ Dans une cellule, les **ressources** sont **partagées**.



Partage des ressources

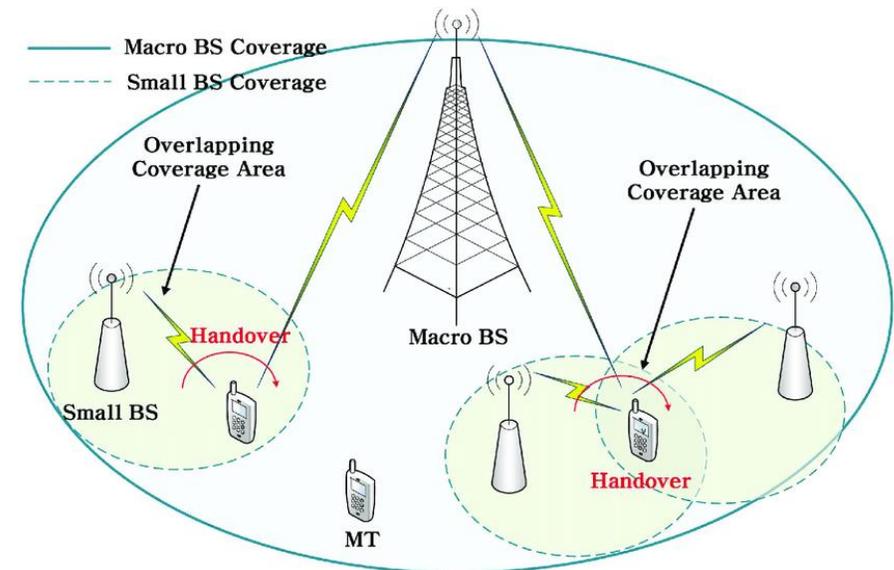
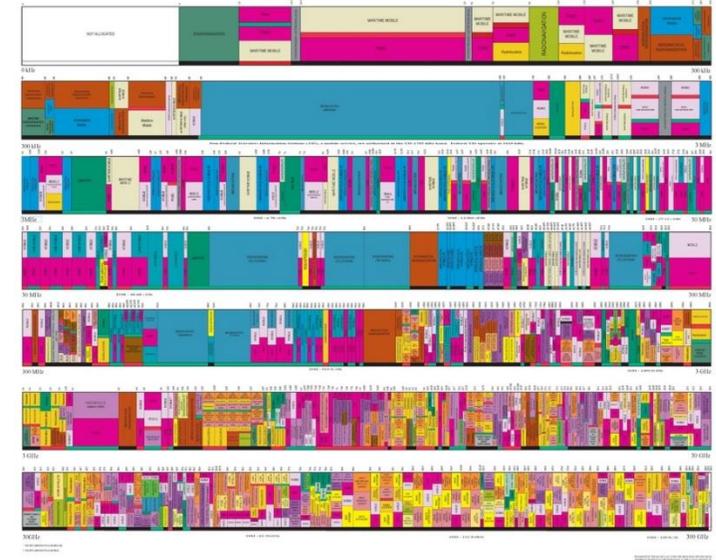
✓ Problèmes :

- Lorsque ressources fixes, si nombre d'équipements utilisateurs dans cellule ↗, alors qualité de service (débit/utilisateur...) ↘.
- Accroissement des besoins porté par de nouveaux usages.
- Généralisation de l'accès aux réseaux cellulaires.

✓ Solutions :

- Augmenter les ressources **disponibles** → Allocation de nouvelles bandes de fréquence courante mais coûteux.
- Optimiser l'**utilisation** des ressources (efficacité spectrale) → énormes progrès réalisés : de 0,16 bits/s/Hz en GSM à 4,17 bits/s/Hz en 4G.
- Augmenter le **nombre** de cellules et réduire leur **taille** (*spatial reuse*) → de < 100 m à 100 km de rayon en 4G.

UNITED STATES FREQUENCY ALLOCATIONS THE RADIO SPECTRUM



Débits usuels actuels

Usage	Débit recommandé
Navigation web basique	< 100 kbps
Visioconférence	80 kbps (audio) à 3 Mbps (vidéo)
Visionnage et stream vidéo SD (360p/480p)	0,7 à 3 Mbps
Visionnage vidéo HD (720p/1080p)	5 Mbps
Stream vidéo (1080p/60 fps)	5,6 à 11 Mbps
Visionnage vidéo UHD (4K)	25 Mbps
Stream vidéo UHD (4K/60 fps)	24,4 à 61,5 Mbps

1. Quelques notions fondamentales
- 2. De la 1G à la 5G, un rapide historique**
3. L'écosystème de normalisation de la 5G
4. Nouveautés techniques de la 5G
5. Déploiement et usages actuels de la 5G
6. Quels futurs cas d'usage pour la 5G ?

Réseaux mobiles de 1^{ère} génération (1G)

- ✓ Dans les années 1980, les télécommunications sont relativement **cloisonnées** dans chaque pays.
- ✓ Conséquence : 1^{ère} génération = **plusieurs technologies analogiques** introduites dans différents pays :
 - NTT (Japon, 1979), NMT (Scandinavie, 1981), AMPS (Etats-Unis, 1983), TACS (Royaume-Uni et Japon, 1982), Radiocom 2000 (France, 1986), C-NETZ (Allemagne, 1985)...
 - Pas de compatibilité entre technologies → pas d'itinérance (*roaming*) international.
 - Modulation en fréquence sur la bande 200 MHz – 400 MHz, peu d'utilisateurs/cellules supportés.
 - Terminaux volumineux et chers → peu d'utilisateurs (ex : 60 000 en 1988 pour Radiocomm 2000).
- ✓ Conclusion : Reconnaissance de la nécessité de **normes internationales** en téléphonie mobile.



Radiocom 2000 (1986)



Mobiles de 1^{ère} génération



IBM Simon, le premier smartphone (1992)

Réseaux mobiles de 2^{ème} génération (2G)

- ✓ Plusieurs technologies, numériques cette fois-ci, sont proposées : GSM (Europe, 1991), PDC (Japon, 1991) et IS-95 (Etats-Unis, 1995).
- ✓ Mais **GSM** rencontre le plus large succès, ce qui est dû :
 - A une démarche européenne de **normalisation** → déploiement dans plusieurs pays avec *roaming*.
 - A l'utilisation de techniques de traitement **numérique** du signal → amélioration de la **capacité** par cellule (jusqu'à 50 appels simultanés), possibilité d'envoi de **SMS**.
 - A la **réduction** drastique des **coûts** et de l'**encombrement** des terminaux.
 - Conséquence : 90% de la population mondiale couverte en 2012 !
- ✓ Evolution du GSM vers **GPRS** (Release 97, 1998) puis **EDGE** (Release 98, 1999) → amélioration de la capacité, échange de **données** jusqu'à 240 kbps.



Nokia 9000 Communicator (1996)



Nokia 3310 (2000)



Blackberry 7100 (2004)



iPhone 2G (2007)

Réseaux mobiles de 3^{ème} génération (3G)

- ✓ Publication des spécifications **IMT-2000** pour la 3G par l'ITU en 1999 puis **propositions par des organisations** diverses de solutions.
- ✓ 1^{er} temps, l'**UMTS (3G)** :
 - Volonté d'une norme mondiale (notamment des acteurs du GSM) → création du **3GPP**.
 - Publication en 2000 de la norme UMTS (Release 99).
 - Amélioration des techniques du **réseau d'accès radio** et du **cœur de réseau** → débit max. de 384 kbps.
- ✓ 2^{ème} temps, les évolutions **HSPA (3.5G)** et **HSPA+ (3.75G)**:
 - **HSPA** composée de **HSDPA** (Release 5, 2002) pour le DL et **HSUPA** (Release 6, 2004) pour l'UL.
 - Nouvelles améliorations (commutation par paquets, modulations, codage...) → 14,5 Mbps en DL et 5,8 Mbps en UL.
 - Mais toujours pas suffisant dans certaines zones (ex : Japon, USA) → nouvelles améliorations introduites dans **HSPA+** (Release 7, 2007 et Release 8, 2008) → **42 Mbps en DL** et **11,5 Mbps un UL**).



Promotion des smartphones et tablettes



Promotion des clés 3G

Réseaux mobiles de 4^{ème} génération (4G)

- ✓ Publication des spécifications **IMT-Advanced** pour la 4G en 2008 par l'ITU.
- ✓ **3GPP** propose en 2008 la **LTE** (Release 8), non compatible (3.9G), puis en 2011 la **LTE-A** (Release 10), en constante évolution depuis (jusqu'à Release 14 en 2017). Aujourd'hui, **4G = LTE-A** ou **WiMAX** (portée par l'IEEE).
- ✓ Débits théoriques **entre 100 Mbps et 1 Gbps** mais débits pratiques moins élevés → **~25 Mbps** en moyenne en France en 2017 (source : opensignal.com)

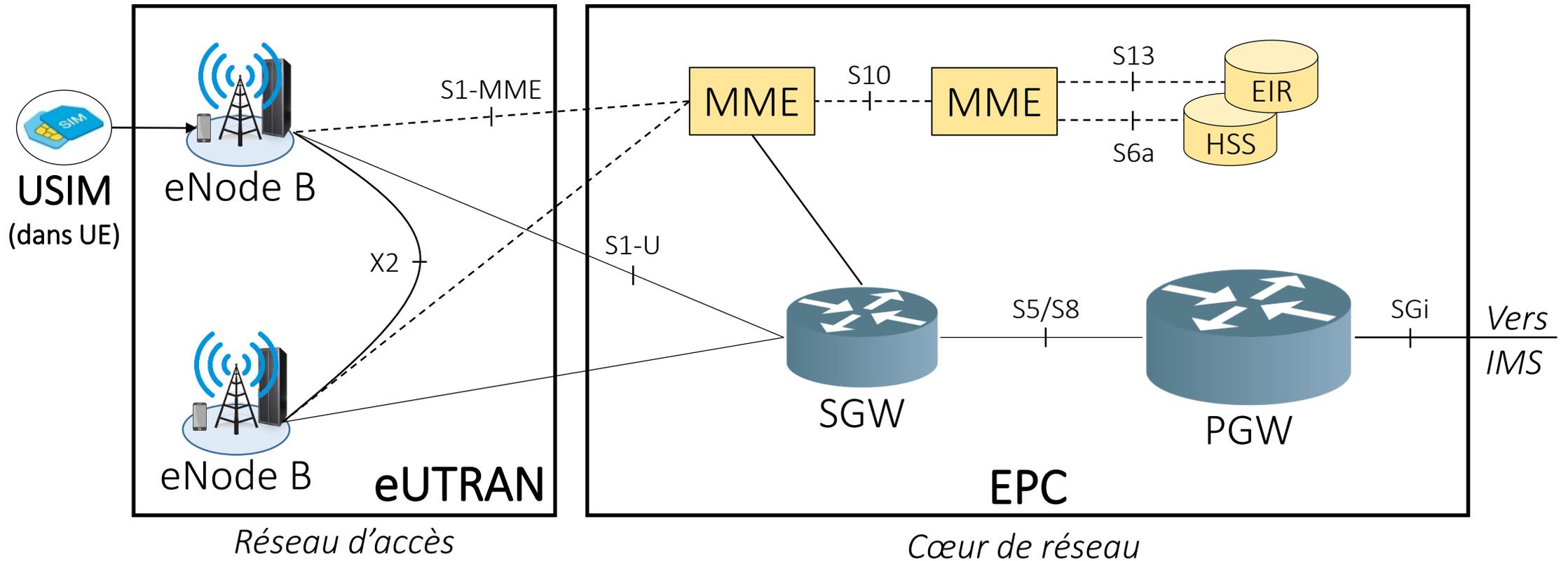


Massification des smartphones et tablettes

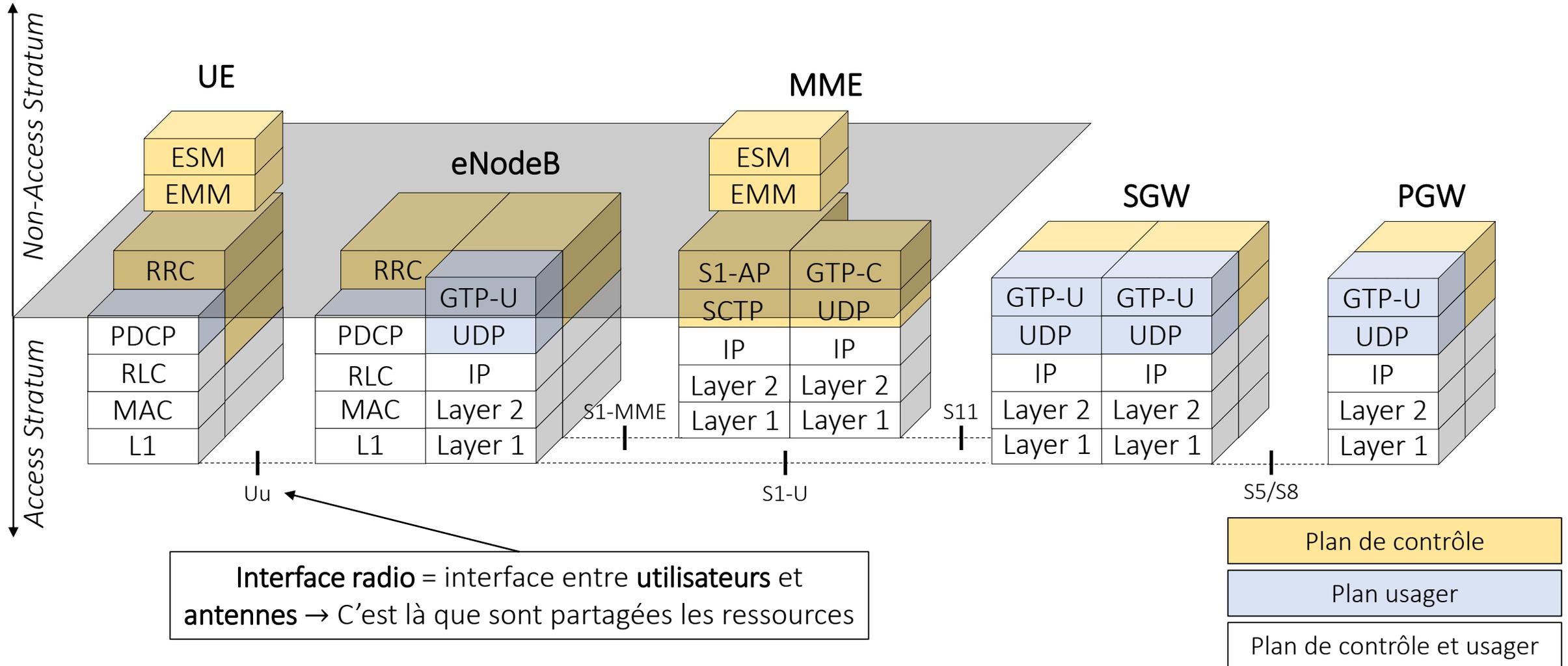
		LTE	IMT-advanced	LTE-advanced
Débits crêtes maximums	DL	300Mb/s	1Gb/s	1Gb/s
	UL	75Mb/s		500Mb/s
Bandes de fréquence		1,4 à 20MHz	→ 40MHz	→ 100MHz
Latence	données	10ms	10ms	10ms (RTT)
	session	100ms	100ms	50ms
Efficacité spectrale DL / UL	Max	5,0 / 2,5 b/s/Hz	15 / 6,75 b/s/Hz	30 / 15 b/s/Hz
	Moyen	1,8 / 0,8 b/s/Hz	2,2 / 1,4 b/s/Hz	2,6 / 2,0 b/s/Hz
	En limite	0,04 / 0,02 b/s/Hz	0,06 / 0,03 b/s/Hz	0,009 / 0,07 b/s/Hz

Caractéristiques attendues de la LTE et de la LTE-A

Architecture d'un réseau LTE

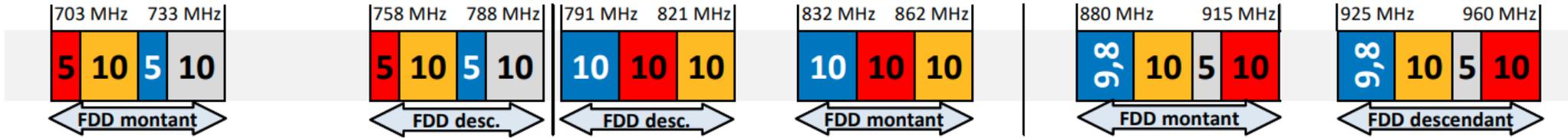


Couches protocolaires LTE

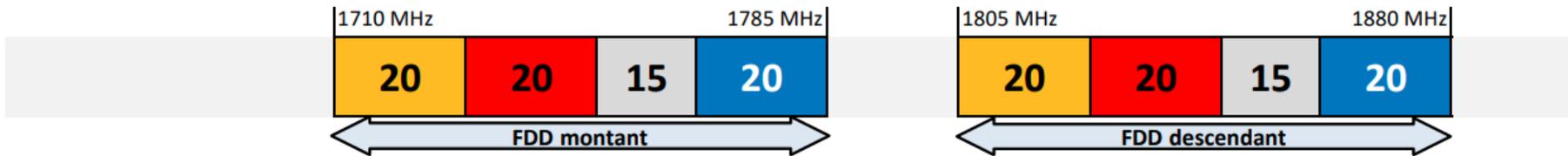


Les bandes de fréquences des opérateurs (avant 09/2020)

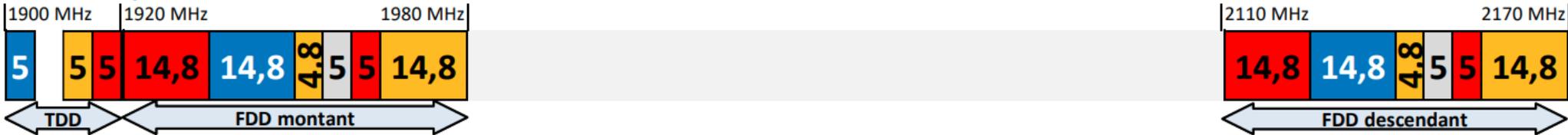
Bandes 700 MHz, 800 MHz et 900 MHz



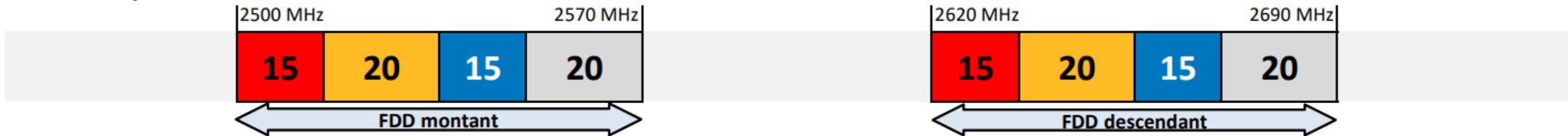
Bande 1800 MHz

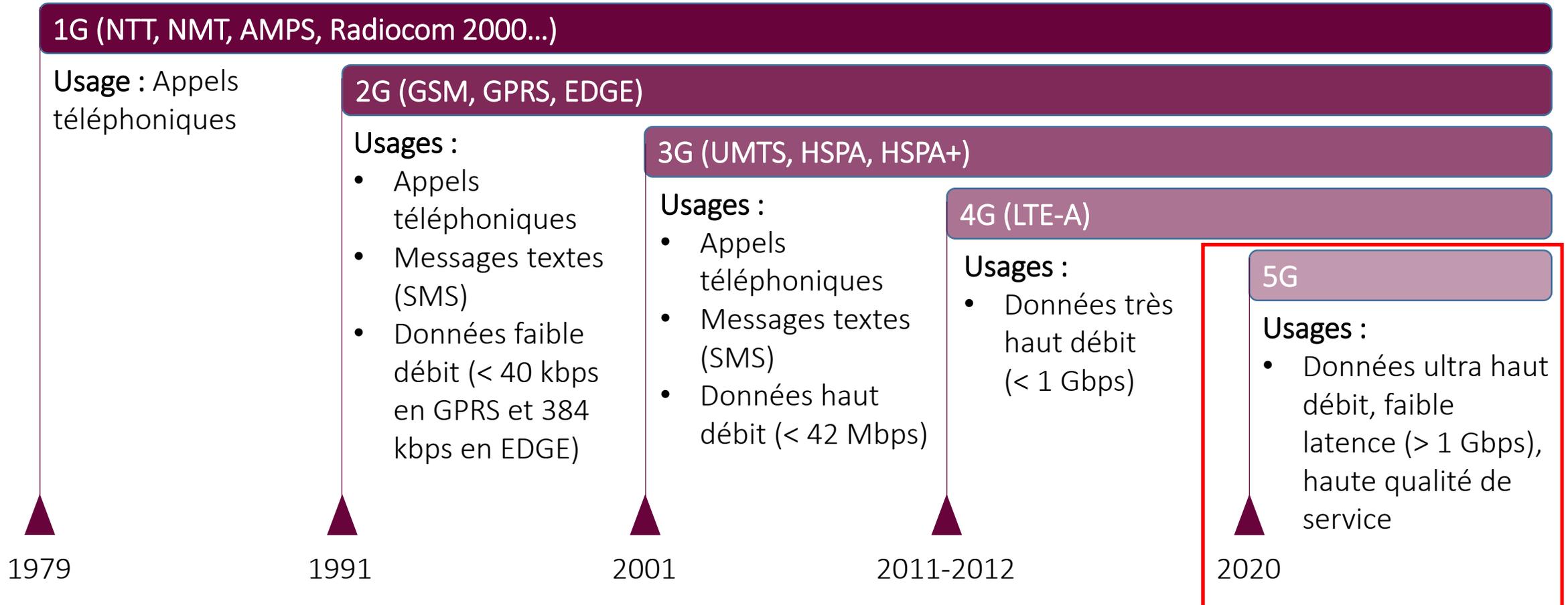


Bande 2,1 GHz



Bande 2,6 GHz





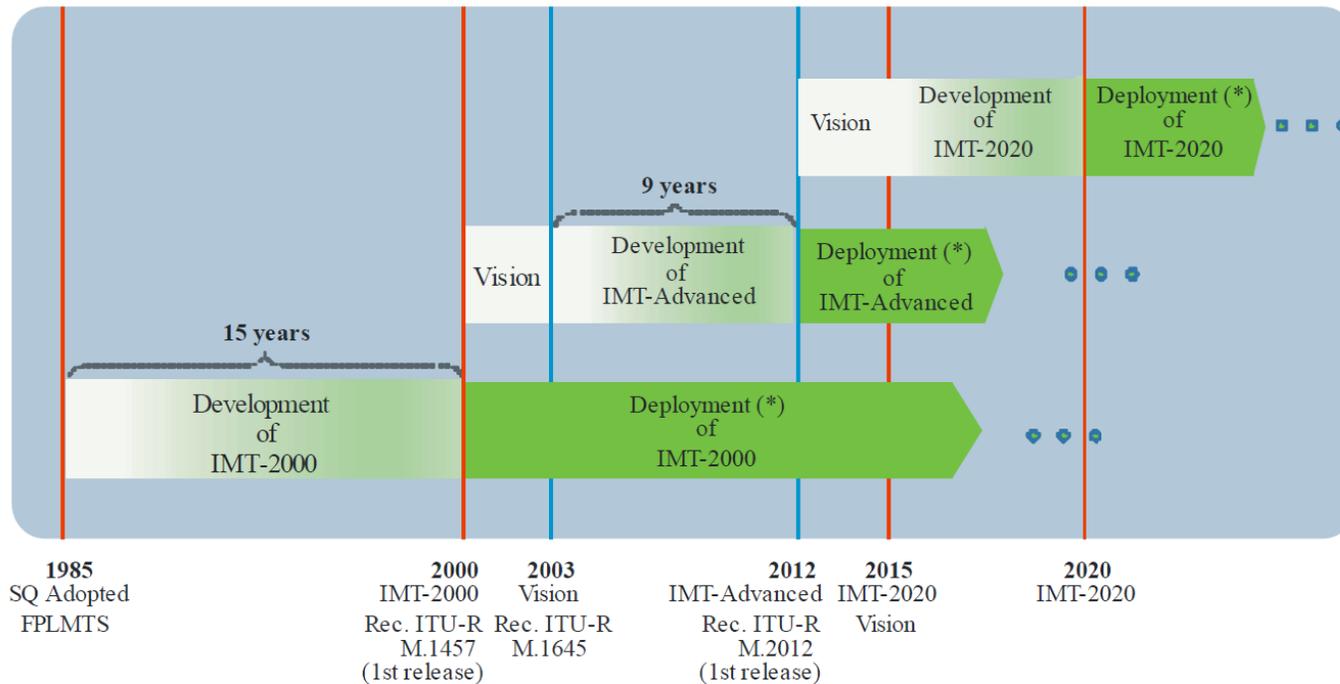
1. Quelques notions fondamentales
2. De la 1G à la 5G, un rapide historique
- 3. L'écosystème de normalisation de la 5G**
4. Nouveautés techniques de la 5G
5. Déploiement et usages actuels de la 5G
6. Quels futurs cas d'usage pour la 5G ?

Les spécifications IMT-2020 de l'ITU

- ✓ Publication par l'ITU en 2015 des spécifications IMT-2020 pour la 5G, avec pour objectif un déploiement à partir de 2020.

FIGURE 1

Overview of timeline for IMT development and deployment

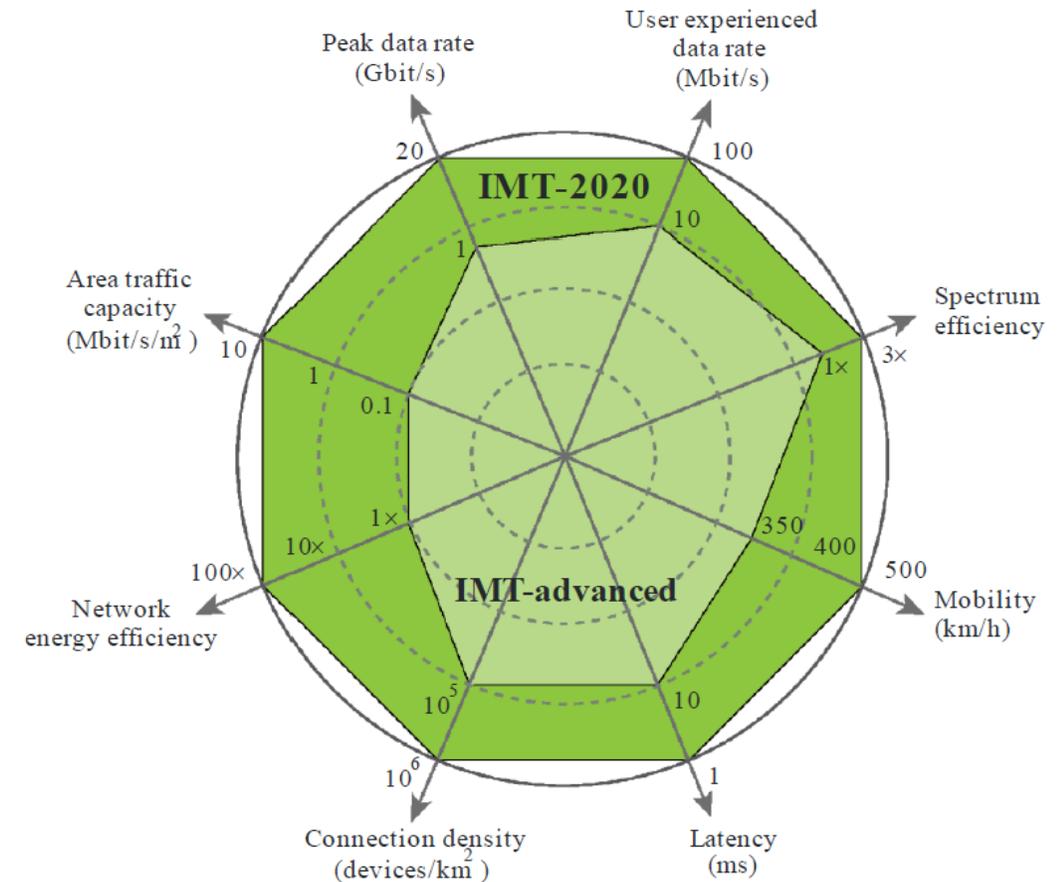


(*) Deployment timing may vary across countries.

M.2083-01

FIGURE 3

Enhancement of key capabilities from IMT-Advanced to IMT-2020



M.2083-03

Efficacité énergétique

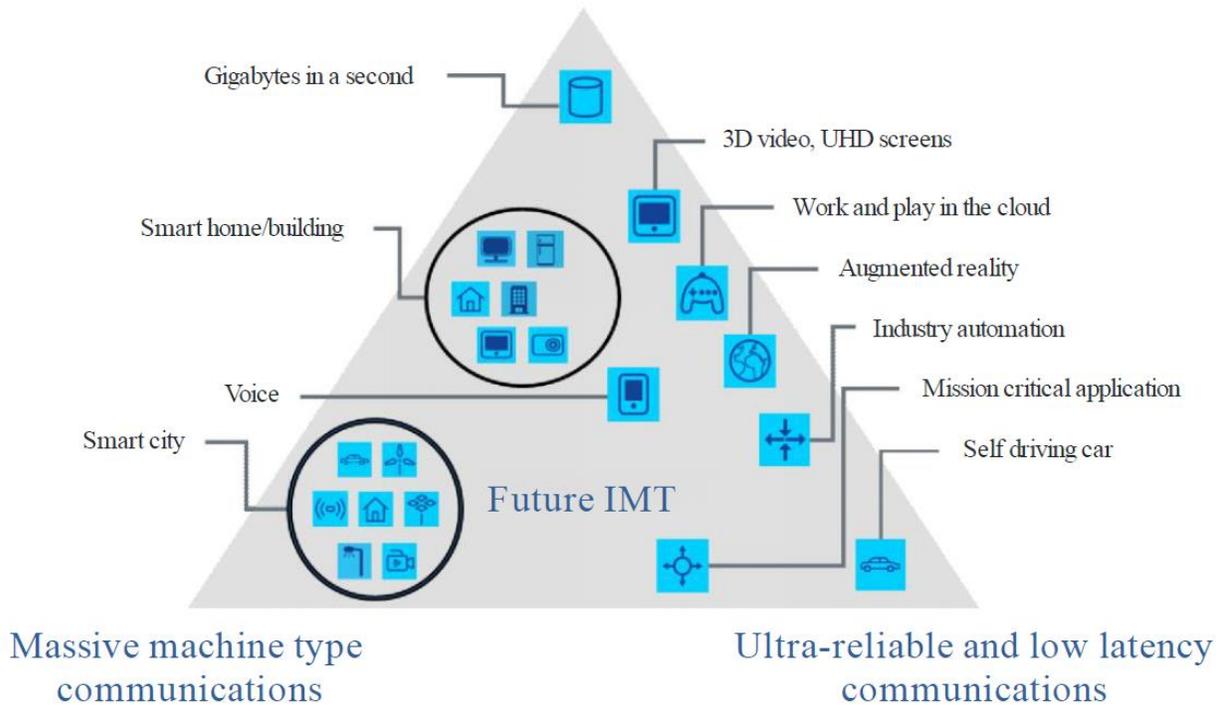
L'efficacité énergétique comporte deux aspects:

- côté réseau, l'efficacité énergétique correspond à la quantité de bits d'information reçue ou transmise par les utilisateurs, par unité de consommation d'énergie du réseau d'accès radioélectrique (RAN) (en bit/joule);
- côté dispositif, l'efficacité énergétique correspond à la quantité de bits d'information par unité de consommation d'énergie du module de communication (en bit/joule).

Cas d'usage envisagés par l'IMT-2020

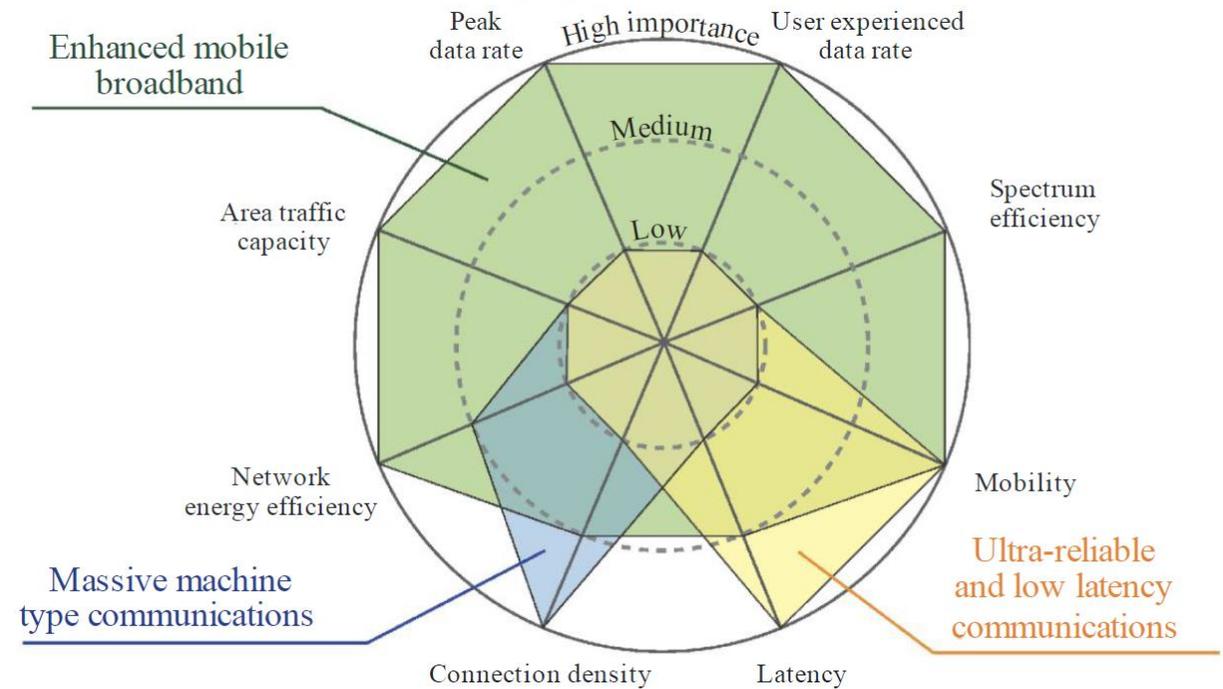
✓ Trois catégories de cas d'usage : eMBB (ex : smartphone), mMTC (ex : IoT), URLLC (ex : voiture connectée).

FIGURE 2
Usage scenarios of IMT for 2020 and beyond
Enhanced mobile broadband



M.2083-02

FIGURE 4
The importance of key capabilities in different usage scenarios

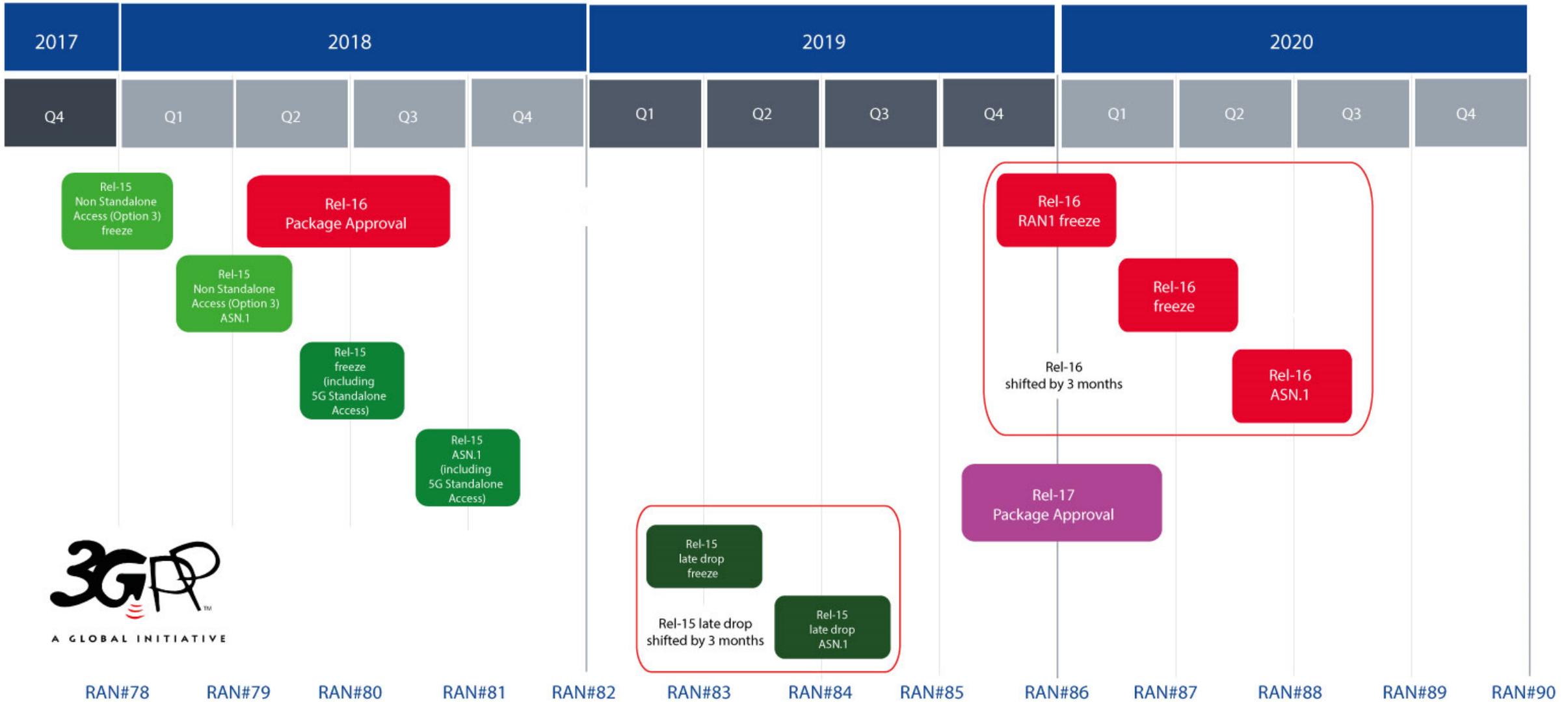


M.2083-04

Solutions techniques identifiées par l'IMT-2020

- ✓ Plusieurs tendances technologiques sont identifiées par l'ITU comme pouvant répondre aux spécifications IMT-2020 :
 - Améliorations de l'interface radio :
 - Utilisation de **modulations** et techniques d'**accès multiple** plus **efficaces**,
 - Utilisation d'antennes multiples (**MIMO**),
 - Utilisation d'antennes actives avec **beamforming** (orientation reconfigurable du rayonnement).
 - Utilisation de nouvelles bandes de fréquences > 6 GHz avec des bandes plus large (> 100 MHz jusqu'à 1 GHz) → **Ondes millimétriques** (> 11 GHz).
 - Densification du réseau d'accès → **Small cells**.
 - Améliorations des **réseaux d'accès et cœur** :
 - Déploiement d'un cœur de réseau physique fixe pouvant être divisé, de manière logicielle, en plusieurs réseaux parallèles → **Software Defined Networking (SDN)** et **Network Function Virtualization (NFV)**.
 - Allocation des ressources radio dynamique à partir d'un cloud (**cloud RAN**)
 - Optimisation de la coordination entre cellules → **Self Organizing Network (SON)**.

Proposition technique du 3GPP

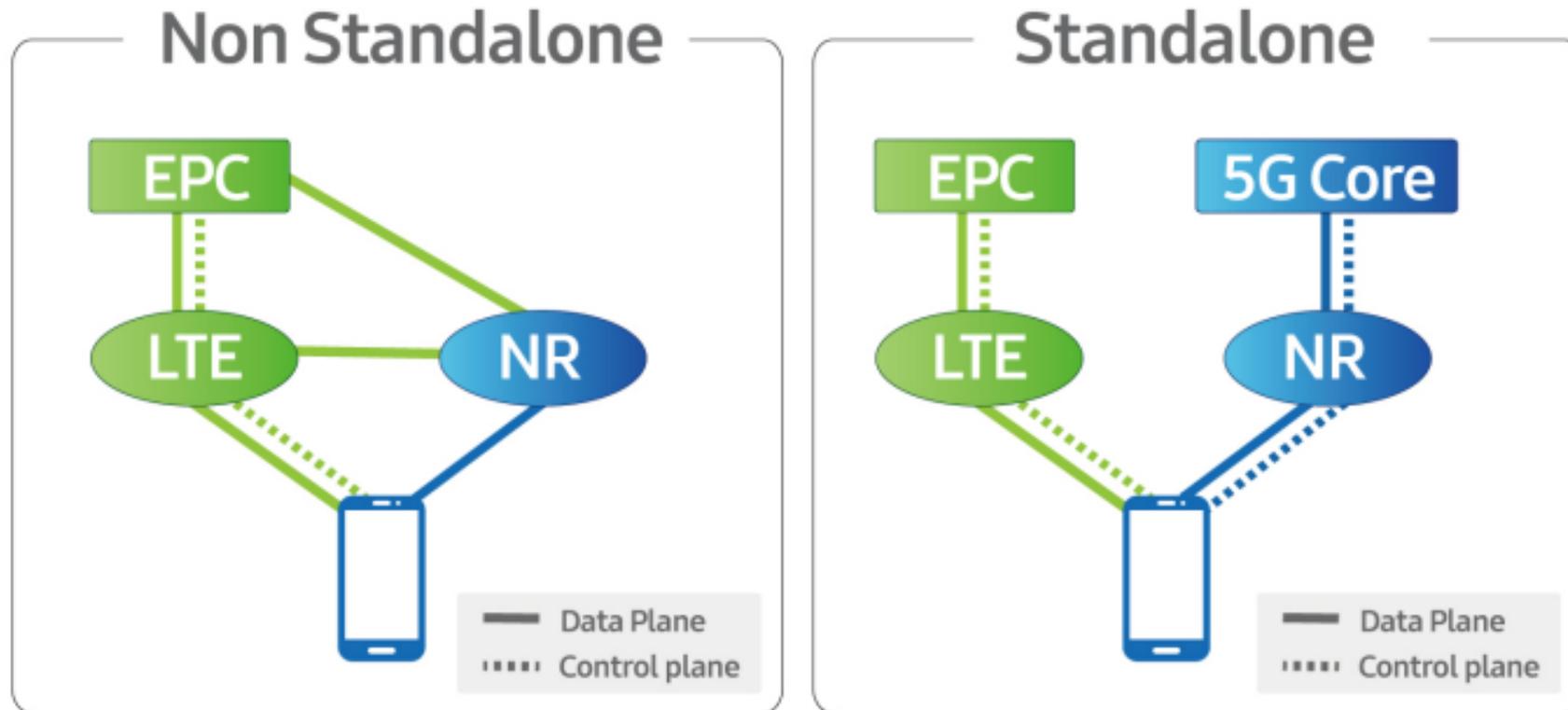


La GSMA pour la promotion des « bonnes pratiques »

- ✓ GSMA = Association d'**opérateurs** et de **constructeurs** de téléphonie mobiles.
- ✓ Publication en 2020 de documents précisant quelques **bonnes pratiques** dans le déploiement des réseaux 5G *Non Standalone* (NSA) et *Standalone* (SA), définis dans la Release 15.



5G NSA versus 5G SA



✓ Déploiement en plusieurs étapes :

- **Etape 1 :** Ajout de nouveaux sites radio 5G NR, rattachés au cœur de réseau 4G (EPC) → 5G NSA.
- **Etape 2 :** Déploiement du « vrai » cœur de réseau 5G (5GC), dédié aux verticales URLLC, mMTC → 5G SA.
- **Etape 3 :** Interconnexion des cœurs de réseau 4G et 5G pour cohabitation (eMBB sur 5GC).

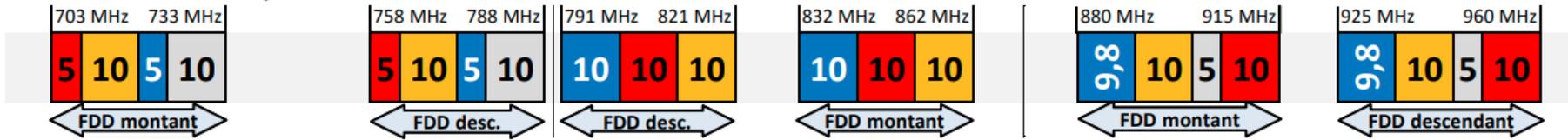
1. Quelques notions fondamentales
2. De la 1G à la 5G, un rapide historique
3. L'écosystème de normalisation de la 5G
- 4. Nouveautés techniques de la 5G**
5. Déploiement et usages actuels de la 5G
6. Quels futurs cas d'usage pour la 5G ?

Principales innovations de l'interface radio 5G NR

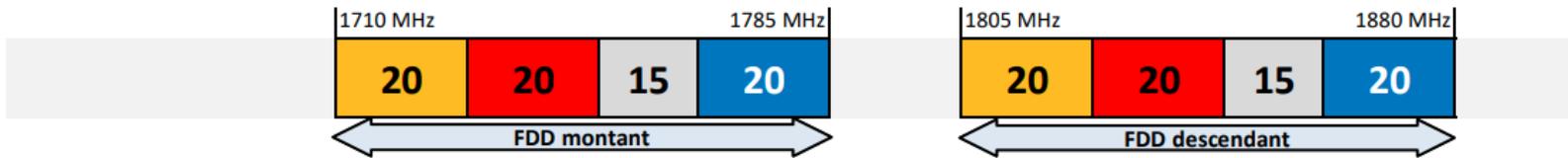
- ✓ L'interface radio 5G NR a été conçue pour être **plus flexible, plus évolutive et plus efficace** (efficacité énergétique et spectrale) que l'interface LTE.
- ✓ Plusieurs **mécanismes** ont été retenus, conformément aux recommandations de l'IMT-2020, dont les **deux principaux** sont :
 - L'utilisation de **plus de spectre** → **Nouvelles bandes de fréquences** basses et millimétriques.
 - Utilisation du **MIMO massif** à l'aide d'**antennes actives** avec *beamforming*.
- ✓ Pourquoi ces solutions ? Si on veut améliorer les performances d'un système de communication, le **théorème de Shannon** (définissant la capacité maximum théorique d'un tel système) montre :
 - Qu'il faut **augmenter la bande passante** → C'est le rôle des nouvelles **bandes de fréquences**.
 - Et/ou qu'il faut **améliorer le rapport signal à bruit** → C'est le rôle des **antennes actives**.

Les bandes de fréquences des opérateurs (après 09/2020)

Bandes 700 MHz, 800 MHz et 900 MHz



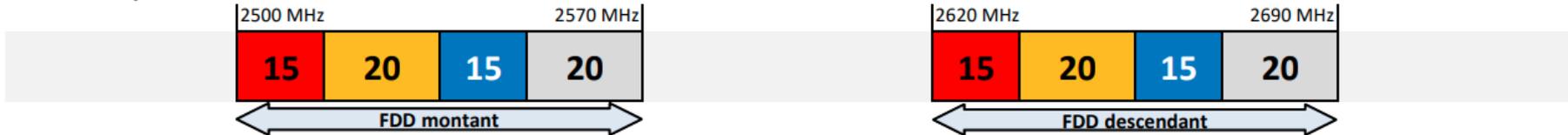
Bande 1800 MHz



Bande 2,1 GHz



Bande 2,6 GHz



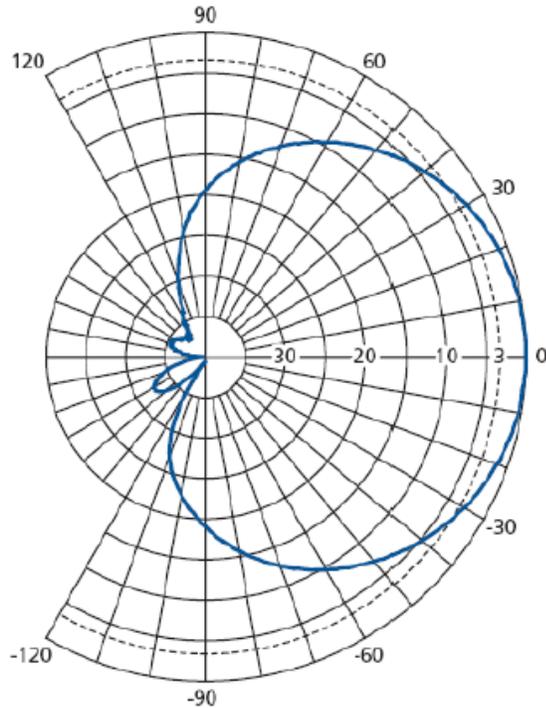
Bande 3490 - 3800 MHz



Spectre disponible x6 entre 2012 et 2020 !

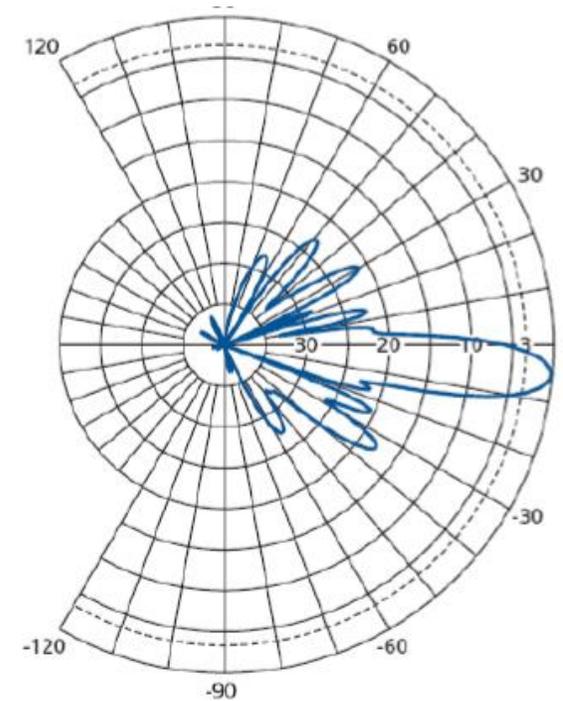
Antennes passives *versus* antennes actives

Antenne passive type LTE



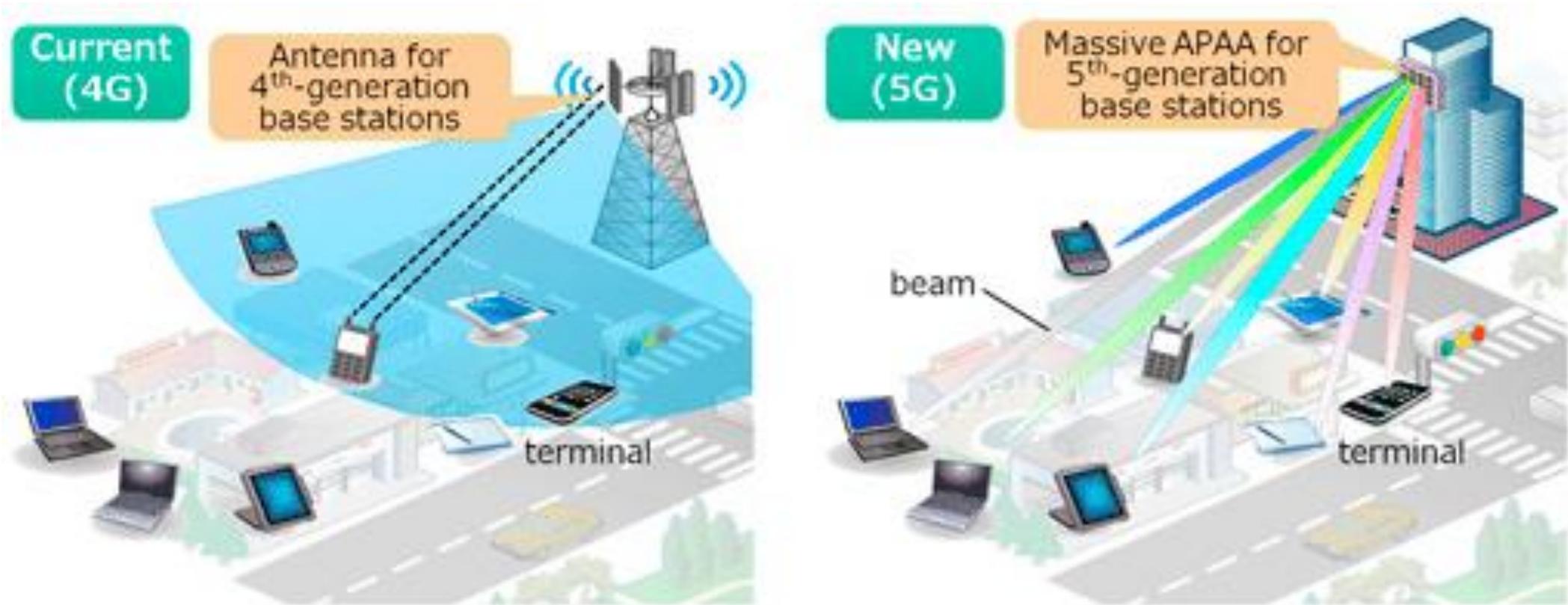
- Diagramme d'émission fixe, souvent large pour assurer une bonne couverture

Antenne active type 5G



- Diagramme d'émission modifiable en temps réel, pouvant être concentré vers un mobile ou élargi pour assurer une bonne couverture.

Beamforming et MIMO massif



- Une antenne 5G peut générer un **flux directif dédié à chaque terminal** desservi → Amélioration de la **qualité de service** (donc du débit/utilisateur), de l'**efficacité énergétique** (moins d'interférences) mais antennes plus consommatrices.

Performances de l'interface radio 5G NR observées

	3,5 GHz	Bandes < 3,5 GHz (« fausse 5G »)
Débit pic	DL : 1,3 Gbps UL : 90 Mbps	Légèrement > LTE
Débits moyens	DL : 100 Mbps UL : ~ LTE	
Latence	< LTE	Légèrement < LTE
Couverture	~ LTE	~ LTE
Capacité	~ LTE	~ LTE

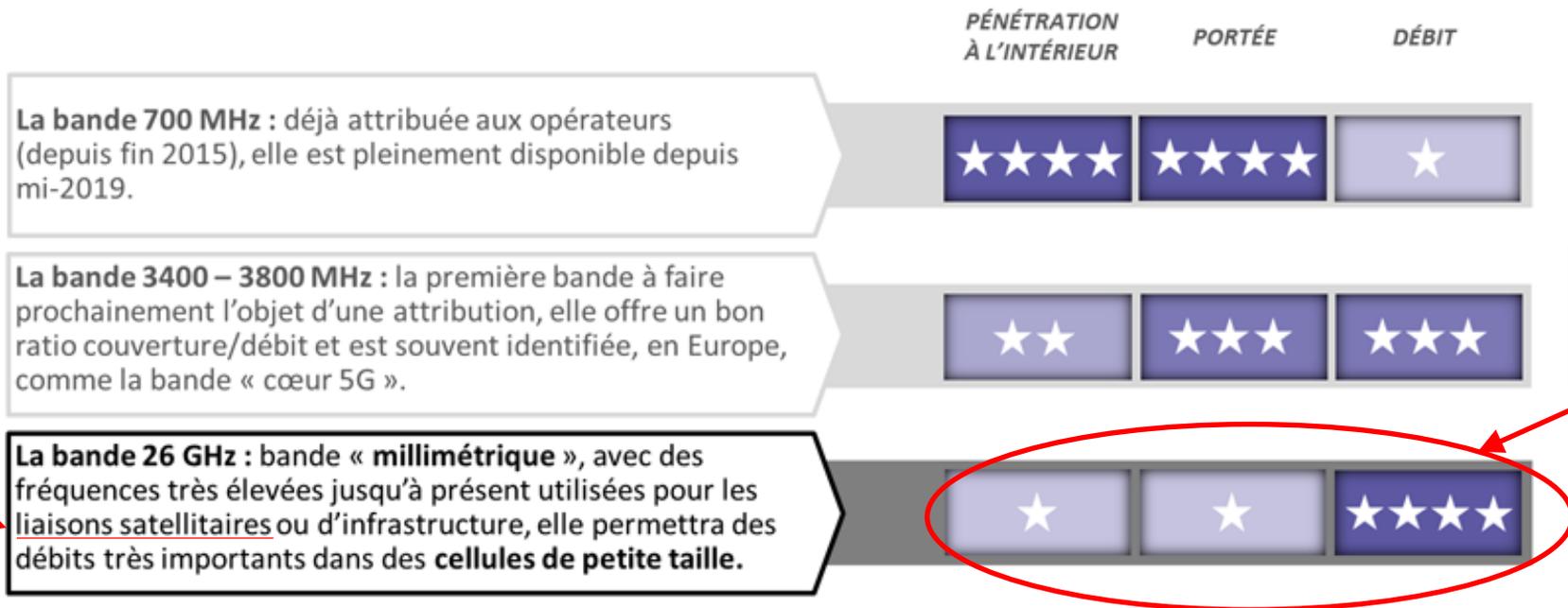


Remarque : Les ondes à 3,5 GHz sont plus atténuées lors de leur propagation que des ondes à plus basse fréquence ce qui induirait une perte de portée MAIS cette perte est compensée par le *beamforming* → Couverture en 5G NR à 3,5 MHz similaire à LTE à 2,6 GHz.

Vers une allocation de la bande millimétrique des 26 GHz (?)

- ✓ Le 31 janvier 2019, lancement par l'ARCEP d'un « appel conjoint à la création de **plateformes d'expérimentations 5G** dans la **bande de fréquences 26 GHz** », en vue d'une **allocation future**.
- ✓ **11 projets pilotes** retenus en octobre 2019 (liste : <https://www.arcep.fr/actualites/les-communiqués-de-presse/detail/n/5g-6.html>).
- ✓ Mais **opérateurs** pour le moment **réservés**.

Bandes 26 GHz utilisées par satellites météo → Crainte d'un brouillard d'ondes

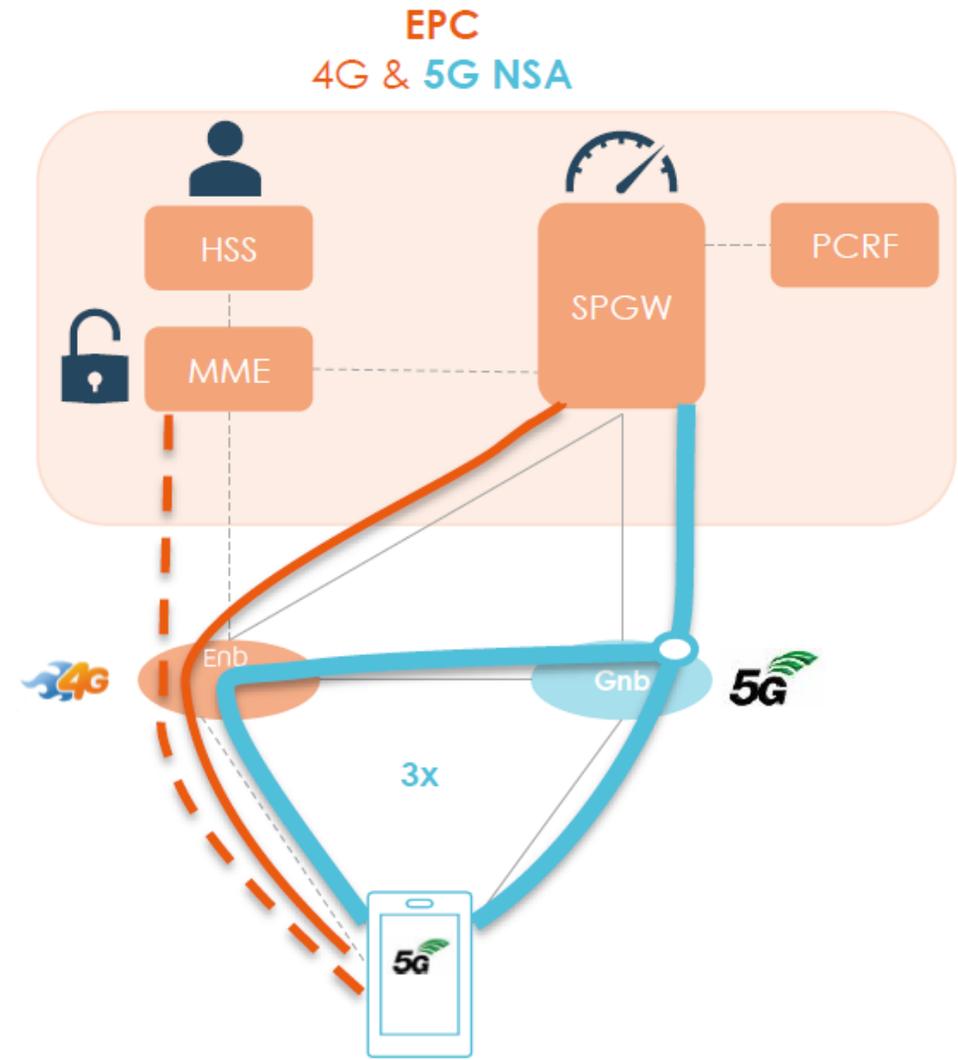


Ondes 26 GHz → small cells

Evolutions du cœur EPC nécessaires pour 5G NSA

✓ Au niveau des équipements du cœur de réseau, des mises à jour logicielles sont nécessaires pour déployer la 5G NSA :

- Implémentation du contrôle d'accès à la radio 5G dans le profil de souscription,
- Gestion de l'attachement au réseau 4G/5G et de la double connectivité 4G/5G,
- Mise à jour des SGW et PGW pour supporter les débits pics 5G NSA.



1. Quelques notions fondamentales
2. De la 1G à la 5G, un rapide historique
3. L'écosystème de normalisation de la 5G
4. Nouveautés techniques de la 5G
- 5. Déploiement et usages actuels de la 5G**
6. Quels futurs cas d'usage pour la 5G ?

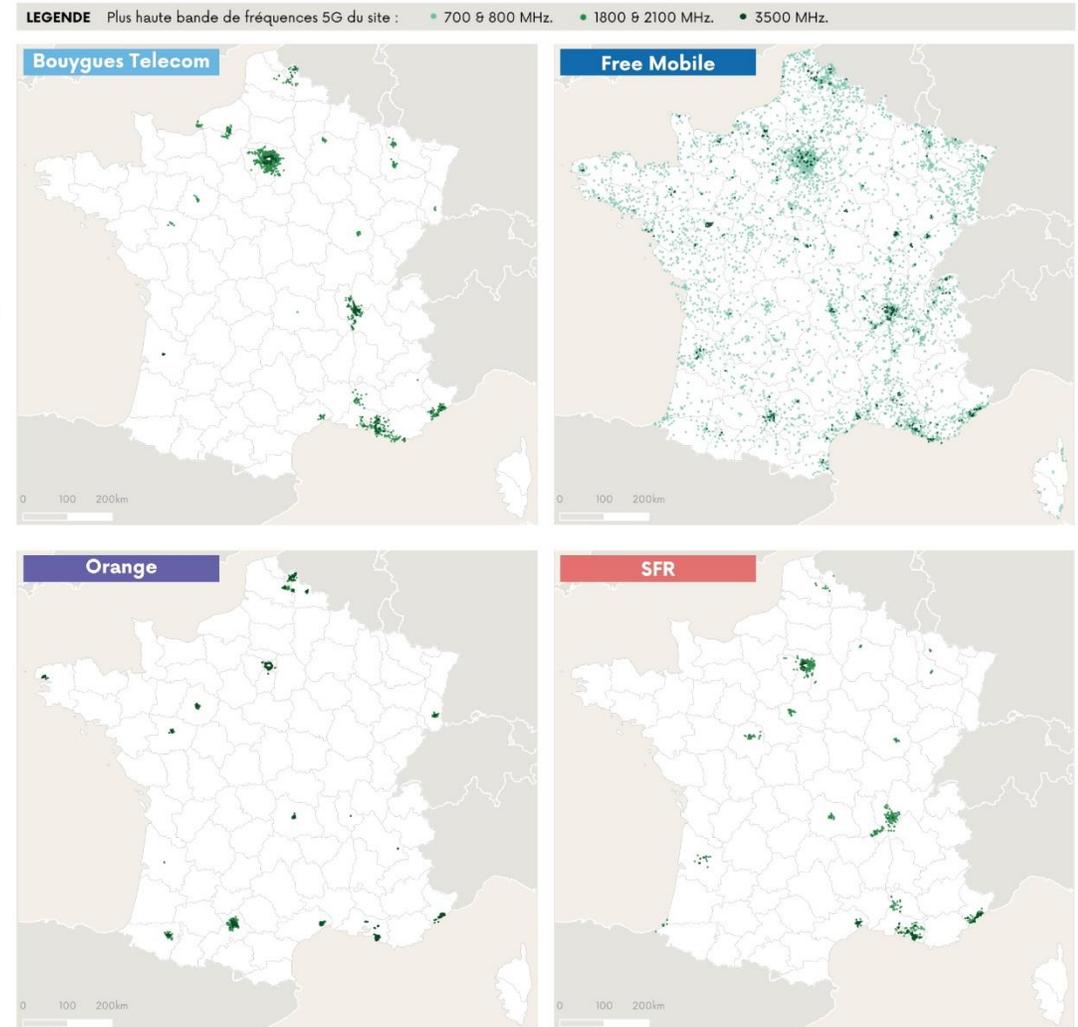
Calendrier de déploiement en France

- ✓ Déployer la 5G « version 2021 » signifie pour un opérateur :
 - Déployer de **nouveaux sites radio 3,5 GHz**,
 - **Upgrader des sites radios 2G/3G/4G** en site radio 5G NR (« fausse 5G »),
 - **Upgrader le cœur de réseau 4G (EPC)** pour support 5G NSA,
 - Pour certains opérateurs, **raccorder les sites radio au réseau de transport par fibre optique**.
- ✓ Déploiement de sites radio et des réseaux de transport par fibre = opérations les plus longues : **10 à 16 semaines** par site 5G 3,5 GHz.
- ✓ Déploiement du **cœur de réseau 5G** à l'horizon **2023**.
- ✓ L'allocation de la bande des 26 GHz ouvrira ensuite au déploiement de *small cells* mais intérêt technique et surtout économique toujours en discussion (gros investissements).

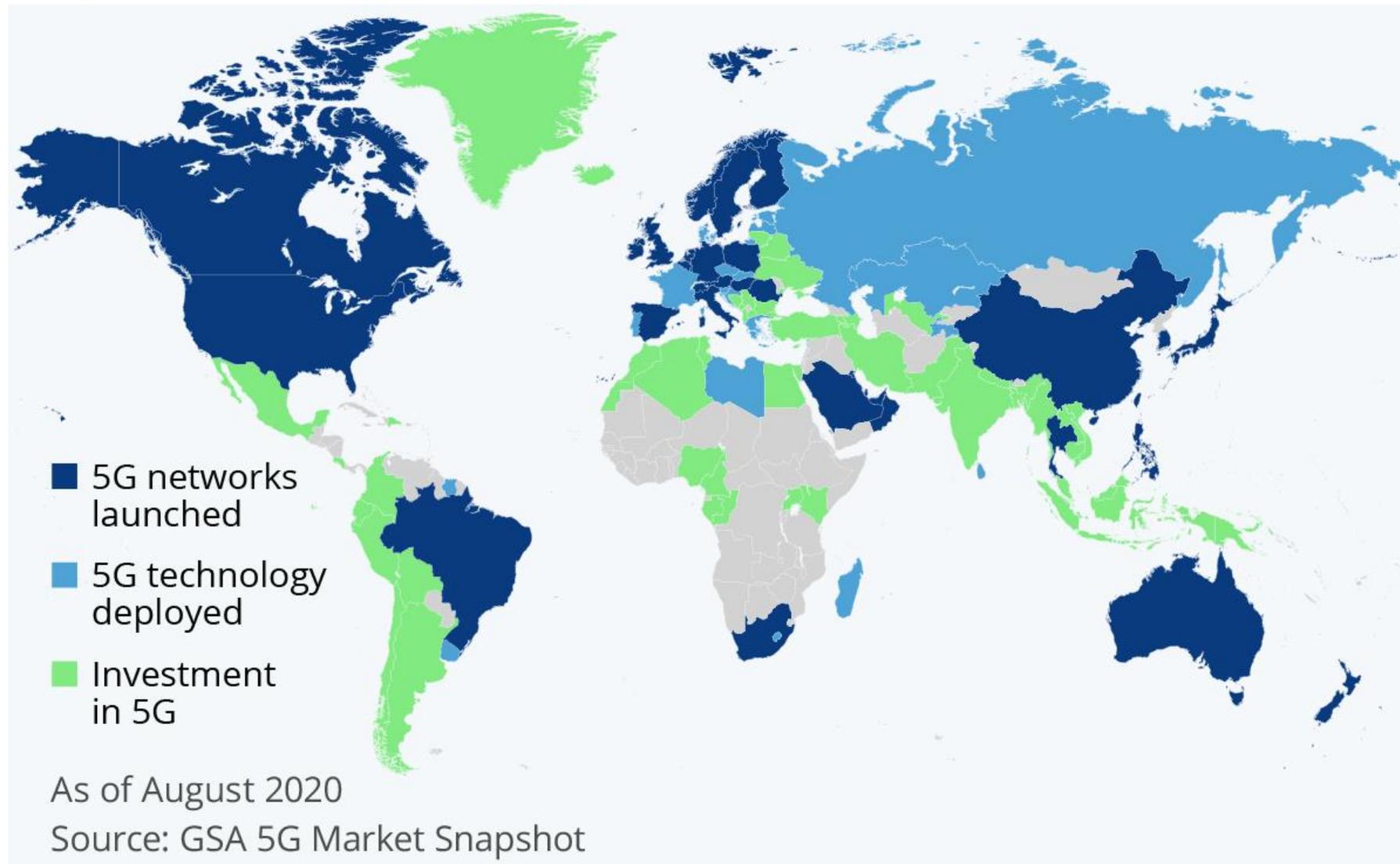
Avancement du déploiement (au 31/12/2020)

	Bouygues Telecom	Free Mobile	Orange	SFR
Nombre de sites 5G	1500	5640	742	793
Progression des sites depuis le 15/12/2020	+ 79	+ 357	+ 115	+ 500
dont sites équipés en bandes :				
700 & 800 MHz	0	5640	0	0
1800 & 2100 MHz	1459	0	187	641
3500 MHz	145	322	579	152

Source : <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-cartes/deploiement-5g/observatoire-du-deploiement-5g-janvier-2021.html>



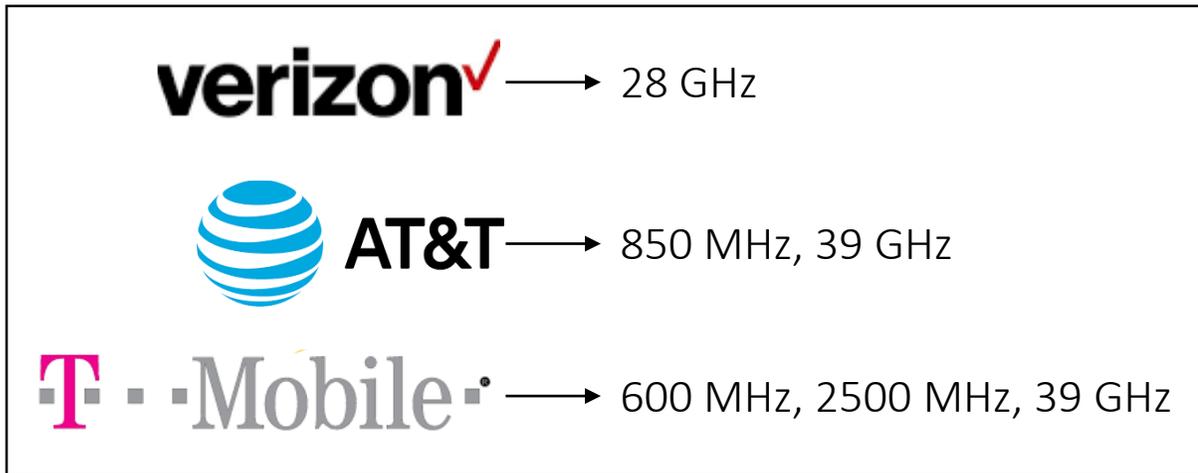
Déploiement de la 5G dans le monde



Lancements commerciaux :

- **2018** : Etats-Unis, Corée du Sud, Finlande
- **2019** : Chine, Royaume-Uni.
- **2020** : Europe, Japon.

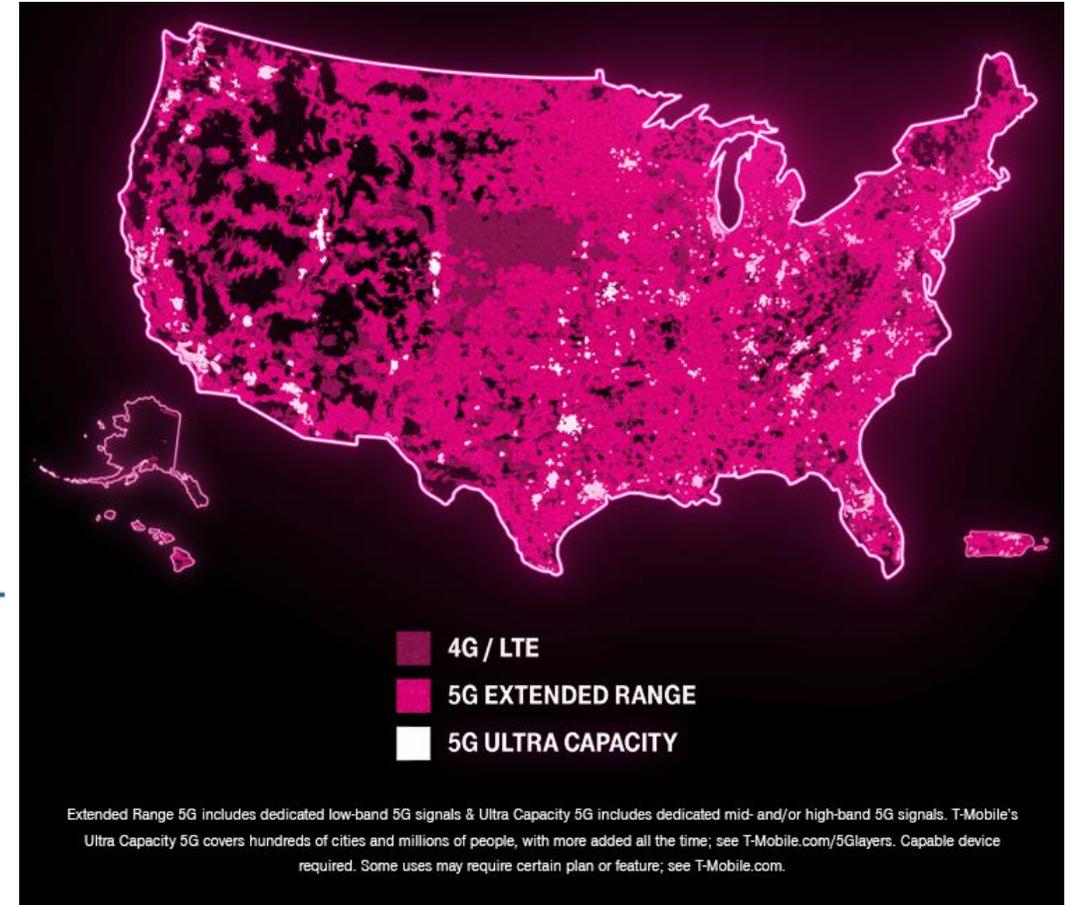
5G aux Etats-Unis



Bandes de fréquences 5G

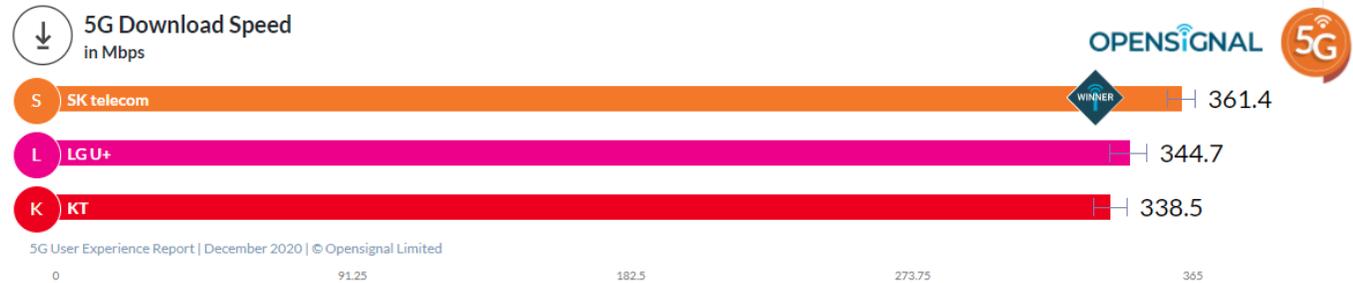


Débits 5G observés

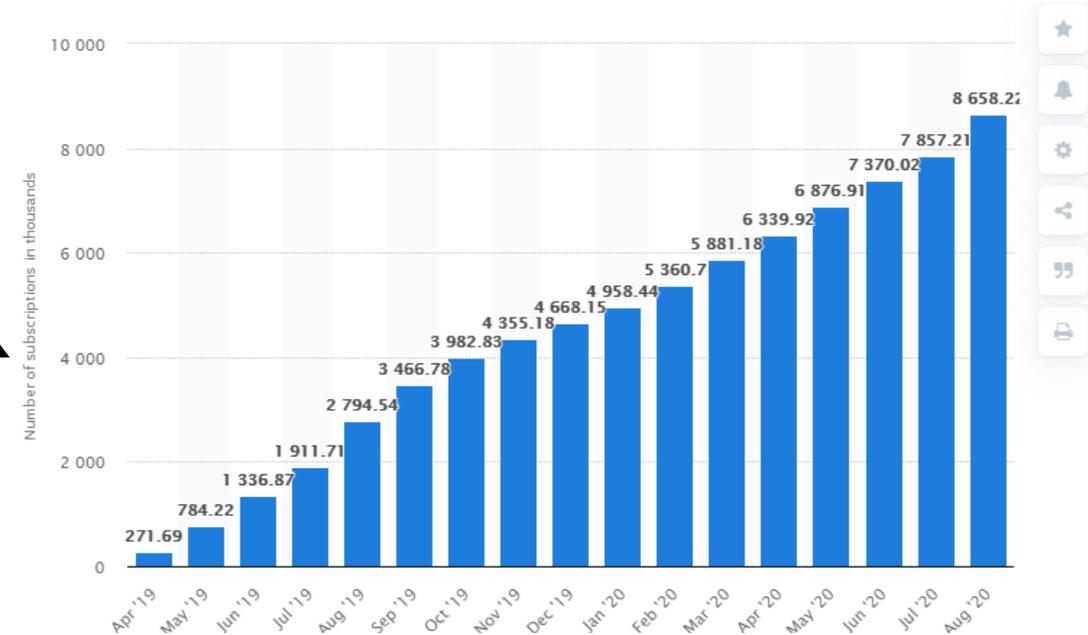


Couverture T-Mobile

5G en Corée du Sud



- ✓ Près de 90% de la population couverte fin 2019.
- ✓ Environ 12% des abonnés mobile sont abonnés 5G.
- ✓ Mais des utilisateurs déçus :
 - Prix,
 - Consommation batterie,
 - Qualité de service insuffisante *versus* LTE suffisante
 - ...



TELECOMMUNICATION

Poor 5G connectivity disappoints South Korean users

Over 560,000 consumers return to 4G as applications for dispute mediation rise

SOTARO SUZUKI, Nikkei staff writer

November 7, 2020 15:01 JST

Usages de la 5G aujourd'hui

- ✓ Aujourd'hui, la 5G sert les **mêmes cas d'usage** que la 4G, avec de **meilleures performances**.
- ✓ Aux Etats-Unis et en Asie, la 5G est aussi vue comme **substitut à la fibre** (moins le cas en Europe) → *Service Fixed Wireless Access*.



Data collection period July 1 - September 28, 2020

Note: in Canada, Hong Kong, Taiwan & Thailand 5G services are very new and have only launched in 2020.

Comparatif débit DL 4G/5G



Cas d'usage FWA

1. Quelques notions fondamentales
2. De la 1G à la 5G, un rapide historique
3. L'écosystème de normalisation de la 5G
4. Nouveautés techniques de la 5G
5. Déploiement et usages actuels de la 5G
6. **Quels futurs cas d'usage pour la 5G ?**

Qu'est-ce que nous apportera vraiment la 5G?

RÉPONSE COURTE: ON N'EN A QU'UNE IDÉE ASSEZ VAGUE 😊 !

LA 5G A L'AMBITION D'ÊTRE LA TECHNOLOGIE DES HUMAINS ET DES OBJETS

L'utilisation du smartphone en 5G ne sera qu'un scénario parmi d'autres

Des dizaines de cas d'usage plus ou moins exotiques sont aujourd'hui véhiculés

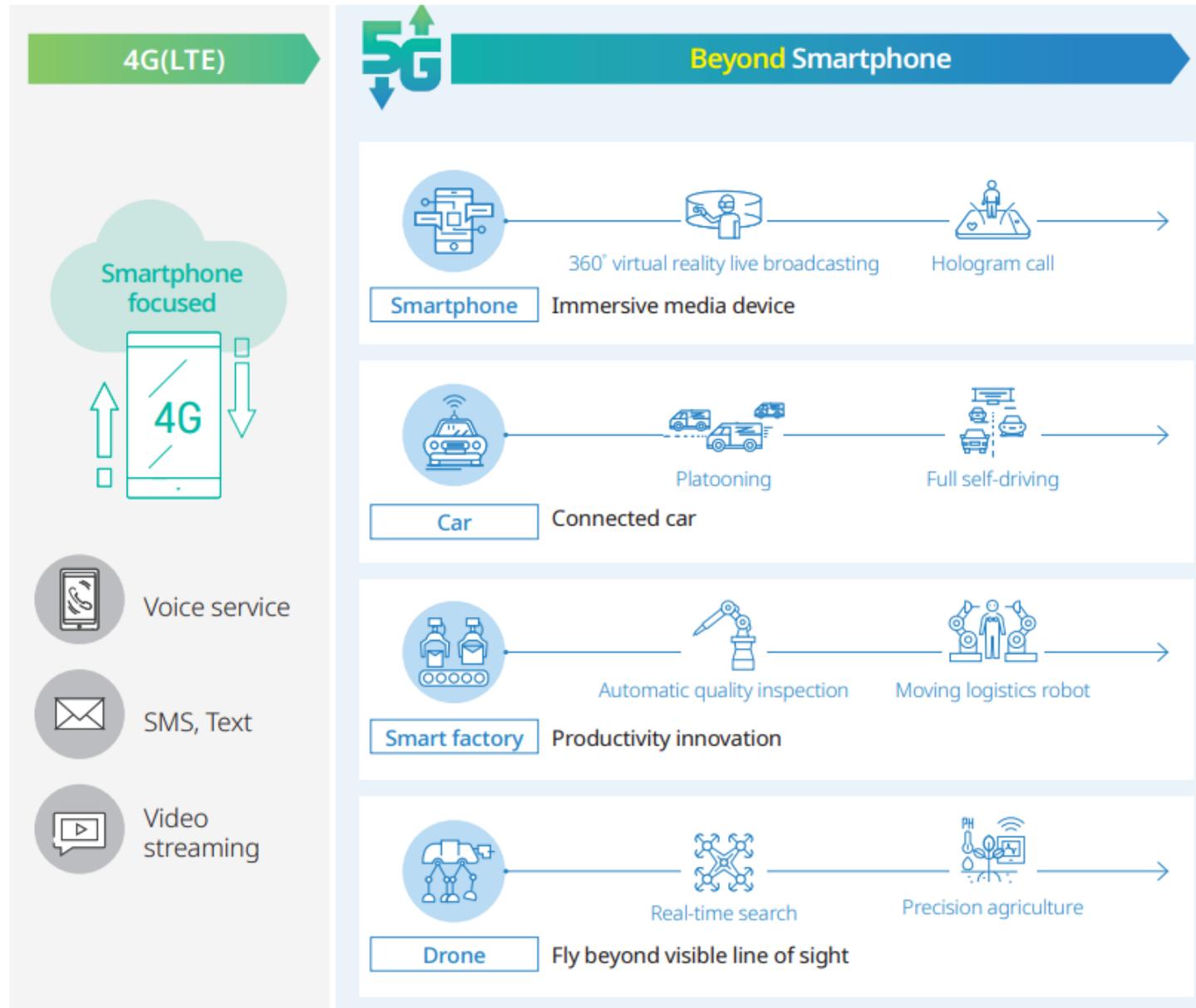
MALGRÉ TOUT, LA 5G RESTE AU DÉBUT DE SON DÉPLOIEMENT UNE TECHNOLOGIE POUR LES SMARTPHONES

La 5G nous permettra de « sauvegarder » le réseau LTE tel que l'on connaît aujourd'hui, en évitant à court terme qu'il soit submergé par la consommation de données de plus en plus gourmande

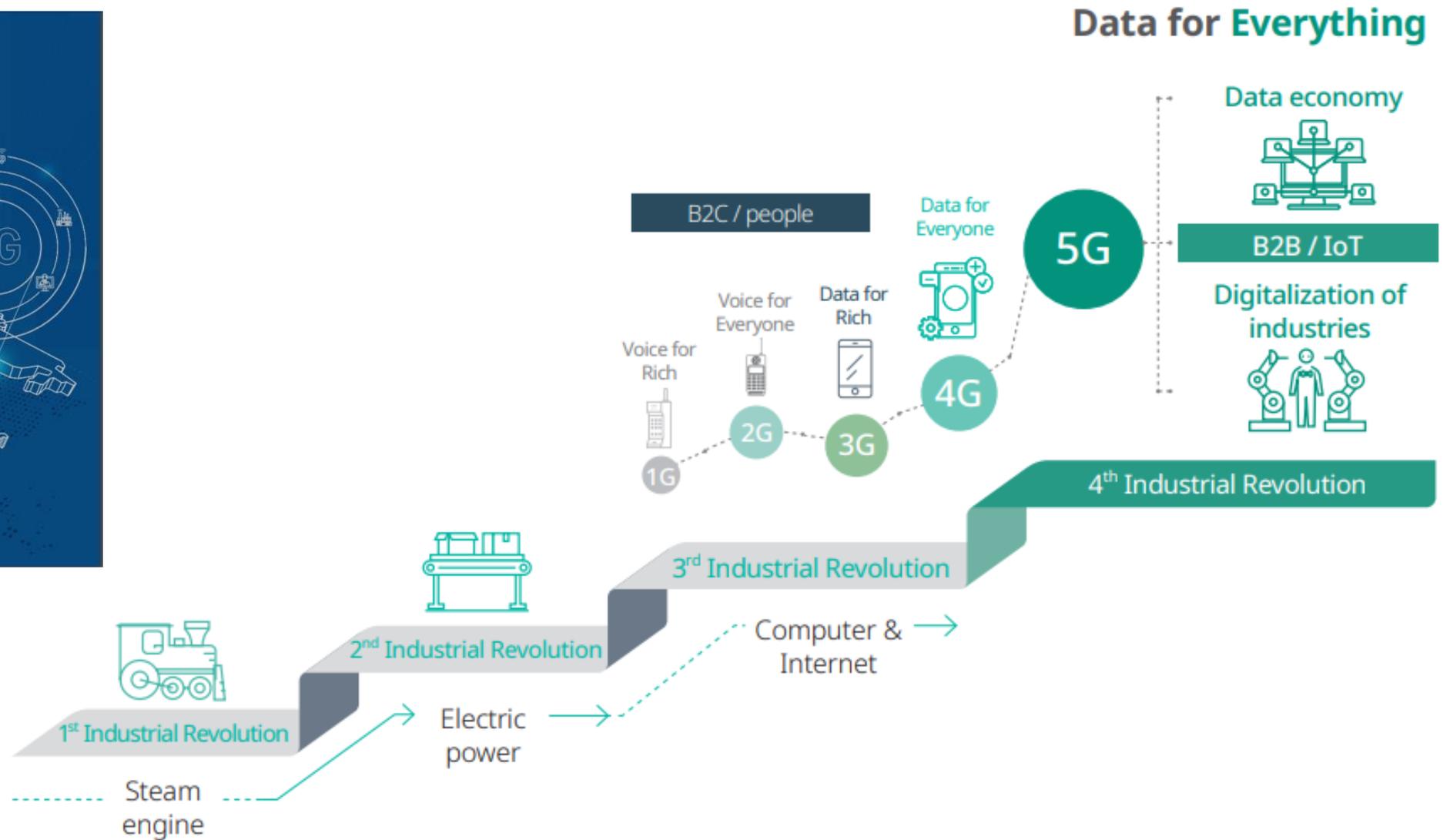
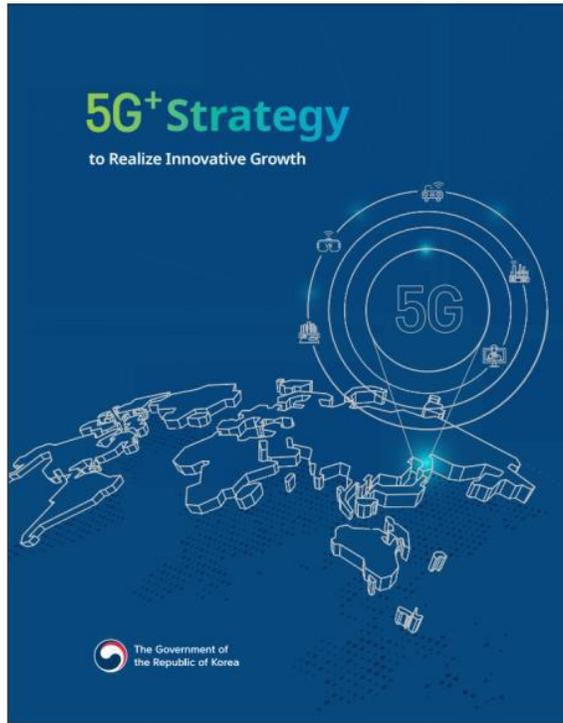
LA 5G EST UNE BOITE À OUTILS QUI PERMET DE QUASIMENT TOUT FAIRE À PLUS LONG TERME

Les cas d'usage qui s'imposeront vont dessiner l'écosystème et ce que la 5G sera d'ici 10 ans

La 5G dans le futur : Au-delà du smartphone



La 5G pour l'industrie 4.0 ?



5G et Industrie 4.0 : Quelques cas d'usage identifiés

47

Télé-opération d'engins



But : Mutualiser l'expertise d'un conducteur expérimenté.

Intérêt de la 5G : Faible latence.

Remarque : Idée similaire avec la télé-chirurgie. Cas d'usage risqué ?

Usine connectée



But : Connecter les machines et véhicules/drones autonomes.

Intérêt de la 5G : Stabilité et sécurité accrues (vs WiFi).

Remarque : Cas d'usage considéré comme réaliste.

Véhicules industriels connectés



But : Téléchargement de plans numériques par les véhicules en chantier.

Intérêt de la 5G : Connexion fluide.

Remarque : Cas d'usage considéré comme réaliste mais déjà réalisable en 4G.

Télé-opération d'engins



Usine connectée



Véhicules industriels connectés



5G : le coup de poker des industriels allemands

Au grand dam des opérateurs télécoms, l'Allemagne a réservé une partie de des fréquences 5G pour ses industriels. Ceux-ci pourront opérer leurs propres réseaux dans leurs usines. Un choix singulier observé chez ses voisins.

But :
cond
Intér
Rem

chirurgie. Cas d'usage risqué ?

Remarque : Cas d'usage considéré comme réaliste

Remarque : Cas d'usage considéré comme réaliste mais déjà réalisable en 4G.

Merci pour votre attention