

LA 5 G : 5^{ÈME} GÉNÉRATION DE RÉSEAUX

CELLULAIRES OU RÉSEAUX POUR MOBILES

Francis LEPAGE
Professeur Emérite Université de Lorraine

25 mars 2021



2 PLAN DE LA PRÉSENTATION

- Les réseaux cellulaires ou réseaux pour mobiles, définition et principe de fonctionnement
- Historique, les générations précédentes
- La 5G, motivations, apports
- Les principales évolutions techniques
- Les nouvelles fréquences, pourquoi et caractéristiques
- Les antennes et le massive MIMO
- Séparation des services et virtualisation
- La polémique sur les risques sanitaires
- La polémique sur la consommation électrique
- Le déploiement en France
- La sécurité des informations
- Conclusion

3

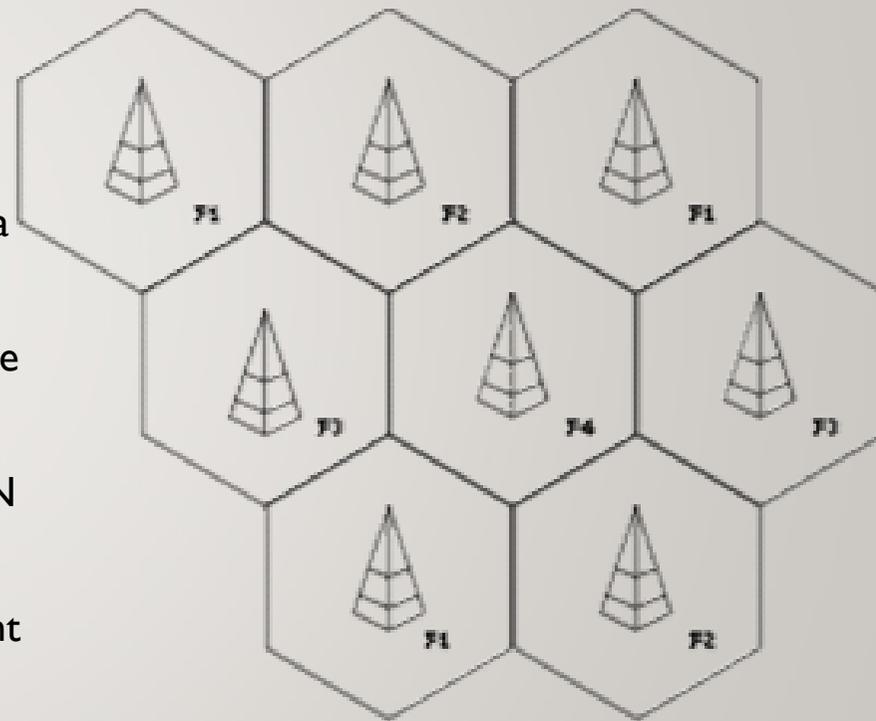
LES RÉSEAUX CELLULAIRES OU RÉSEAUX POUR MOBILES

- Un réseau pour mobile a pour objectif de rendre l'utilisateur du terminal (un simple téléphone au début, un smartphone maintenant) libre de se déplacer grâce à l'absence de fil de liaison
- Il utilise des ondes radioélectriques qui transportent le signal et donc les informations
- La zone de déplacement en restant connecté au réseau est grande, contrairement au téléphone sans fil domestique qui doit resté à proximité de sa base
- Il est architecturé sur une structure cellulaire. Cette structure transforme un inconvénient - l'atténuation du signal - en avantage – la réutilisation d'une bande de fréquence, ou d'un code temps-fréquence, à des endroits suffisamment éloignés
- Il est composé d'un réseau d'antennes-relais (ou stations de base), couvrant chacune une portion de territoire (cellule) et acheminant les communications sous-forme d'ondes radio vers et depuis les terminaux des utilisateurs.



4 PRINCIPE D'UN RÉSEAU CELLULAIRE

- Le signal à fréquences élevées (>500 MHz) s'atténue rapidement en se propageant même dans l'air libre
- Il faudrait donc une forte puissance d'émission pour aller d'un émetteur à un récepteur très éloigné, ce qui est incompatible avec la taille et le poids des batteries et la sécurité sanitaire
- On partage donc le territoire en cellules, chacune utilisant une bande de fréquences différente de ses voisines
- Une bande de fréquence peut être partagée au plus en un nombre N d'utilisateurs
- Cette bande de fréquences peut être réutilisée après un éloignement d'une cellule. Si j'ai M cellules utilisant la même fréquence sur un territoire, il y a **$M \times N$ utilisateurs** au plus simultanément sur cette bande de fréquences.



5 La première génération de réseaux pour mobiles

- Dans ce domaine les évolutions sont identifiées par un numéro de génération (un type de technologie), il y en a en gros une par décennie
- Réseau dit 1 G (1^{ère} génération)
- 1980 (Suède, Etats Unis) et 1986 (France, Radiocom 2000) : apparition des téléphones mobiles publics utilisant une architecture cellulaire
- Technologie analogique → consommation importante → grosse batterie → terminal transportable mais non portable
- Uniquement téléphonie
- Pas compatible d'un pays à l'autre.



6

LA 2^{ÈME} GÉNÉRATION : GSM ET GPRS

- Entente sur la **réservation de fréquences par continent**
- Développement de plusieurs réseaux distincts et non compatibles avec des communications numériques
- 1992 : Ouverture commerciale en France du **GSM**, système européen
- Réseau dit 2G
- **Technologie numérique** → consommation réduite, terminal portable
- Téléphonie et SMS, commutation de circuits
- **Evolution en 2001, réseau dit 2,5 G : réseau GPRS** apportant un service de transfert de données plus rapide et donc un accès Internet. En fait, l'évolution de la structure interne du réseau est importante par l'ajout d'un réseau à commutation de paquets
- Premiers smartphones en 1996 (Nokia) puis BlackBerry (1999).



7

LA 3^{ÈME} GÉNÉRATION

- 2004 : Ouverture commerciale en France du réseau 3G
 - Nouvelle bandes de fréquences allouées pour la 3G
 - Nouveau type de communication numérique, plus efficace et de meilleure qualité surtout en milieu urbain
 - Débit plus élevé pour les données que le GPRS
 - Amplification importante de l'usage mobile de l'Internet → besoin d'un terminal adapté, évolution des smartphones, **naissance de l' iPhone en 2007, version 3G en 2008**
 - Téléphonie et transfert de données : structure interne du GSM et du GPRS associés.



8

LA 4^{ÈME} GÉNÉRATION



- Nouveau type de communication numérique, encore plus efficace donc plus de débit
- Nouvelles bandes de fréquences allouées, notamment celles libérées par la conversion de la télévision analogique en TNT (Télévision Numérique Terrestre)
- Permet l'usage de la vidéo, le téléchargement rapide fichiers, de films,... sur Internet
- Pas de téléphonie en mode circuit, juste de la « voix sur IP » ou VoIP
- En général le smartphone choisit la 3 G ou la 2G pour téléphoner mais la VoIP va se répandre comme pour le téléphone fixe.



LA 5^{ÈME} GÉNÉRATION



- La 5^{ème} génération est arrivée en 2020, la commercialisation a débuté en France
- Elle a pour objectifs :
 - D'augmenter encore les débits
 - D'intégrer les objets connectés qui vont envahir notre quotidien (l'Internet des objets) : les voitures, les compteurs d'eau et d'électricité, les réfrigérateurs, les cuisinières, les fours, les assiettes, les bols, les couverts,....mais aussi les animaux, les personnes âgées, ...
- Elle pourrait faire disparaître le Wifi, mais cela dépendra de la stratégie des opérateurs (il semble que ce sera avec la 6G)
- De nouvelles bandes de fréquences ont été mises à sa disposition.



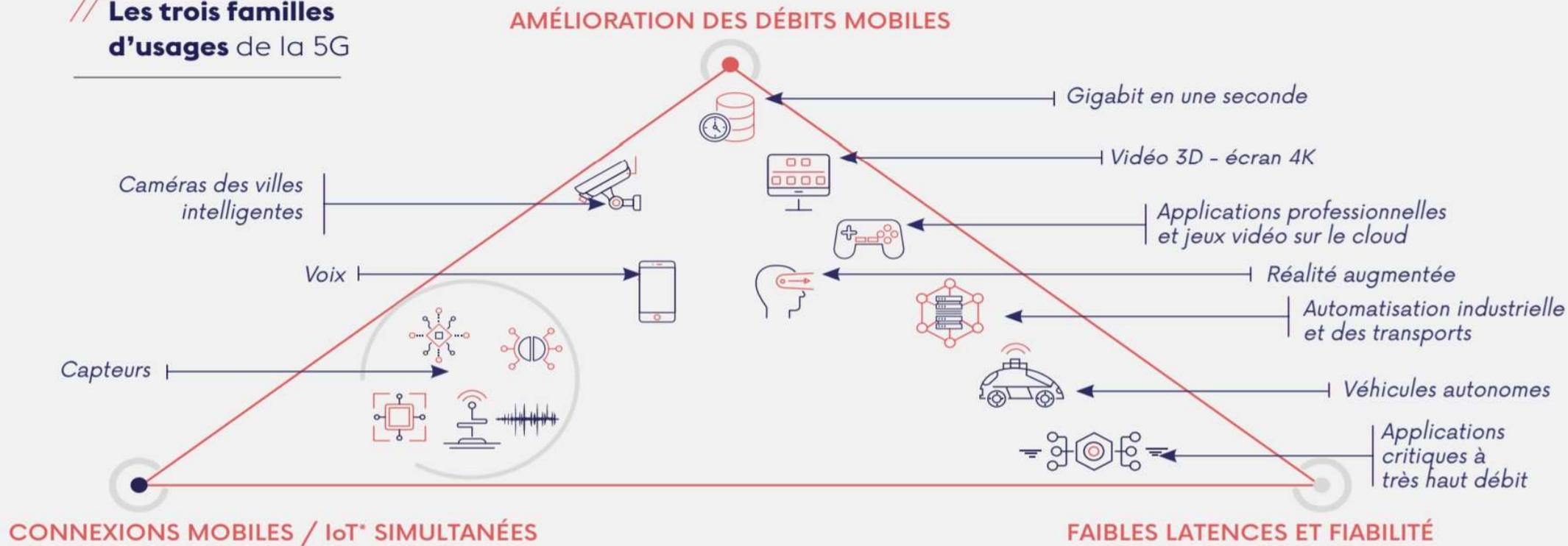
10 MOTIVATIONS DE LA 5 G

- Demande pour le streaming (la diffusion continue) en haute définition pour regarder des vidéos sur des terminaux mobiles (même si l'intérêt est discutable vu la taille de l'écran); donc augmentation du débit des communications
- Meilleure adaptation aux jeux vidéos par diminution de la latence
- Saturation de la 4G par endroit
- Apport de nouveaux services pour la connexion des objets : dans l'industrie, à domicile, dans et pour les véhicules. Donc une offre nouvelle et unifiée pour l'Internet des objets – IoT.



APPORTS DE LA 5G

// Les trois familles d'usages de la 5G



Crédit ARCEP

12 LES PRINCIPALES ÉVOLUTIONS TECHNIQUES

- Nouvelles bandes de fréquences utilisées
- Le massive MIMO, qui consiste à utiliser un grand nombre d'antennes en émission et en réception. Les stations de base seront dotées de plusieurs centaines de petites antennes
- Le « beam forming » ou ciblage du faisceau radioélectrique Ce concept nouveau en réseau cellulaire (il est déjà un peu utilisé en WiFi) est un gros challenge technique
- La séparation des différents services
- La virtualisation
- Nouvelle modulation du signal permettant une légère augmentation du débit sur une même bande de fréquences
- **La 5 G n'est pas une technologie disruptive, c'est une évolution naturelle de la 4 G.**

I3 POURQUOI FAUT-IL DE NOUVELLES BANDES DE FRÉQUENCES?

- Un **fondement scientifique** essentiel : le théorème de Shannon- Hartley :
- Dans des conditions de puissance et de perturbations identiques, la **capacité théorique** d'un canal radioélectrique, c'est-à-dire le débit maximal d'information qu'il peut transporter, **est proportionnelle à la largeur de bande de fréquences de ce canal** (fréquence la plus grande moins fréquence la plus basse)
- C'est de ce théorème que vient l'expression « bande passante »
- La formule exacte est : $C = W \log_2 (1 + S/B)$

Avec C en bits/s, W = largeur de bande en Hertz, S = puissance du signal, B = puissance du bruit

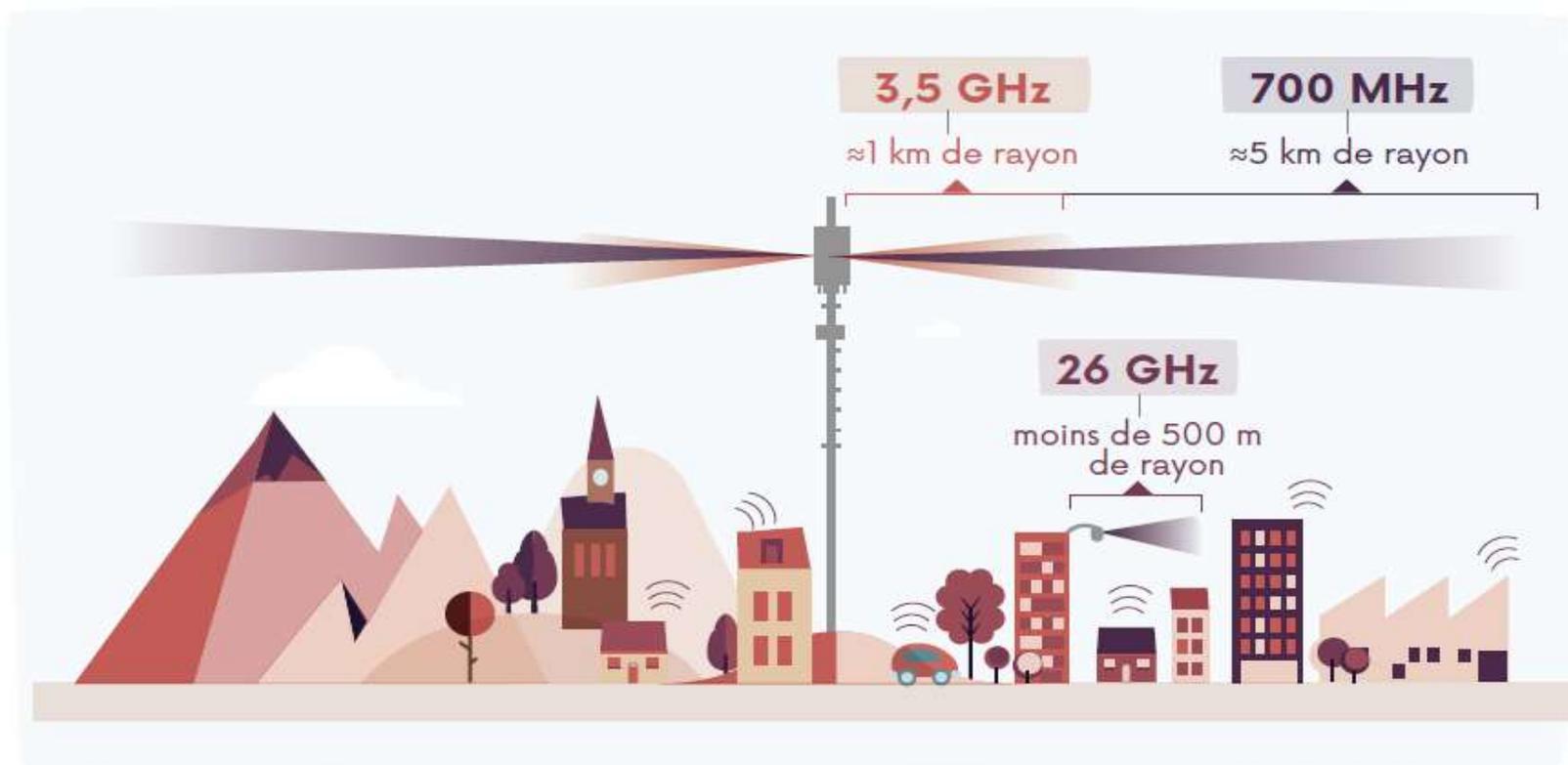
- **Conséquences** : La demande en débits augmentant, il faut utiliser de nouvelles bandes de fréquences quelle que soit la technologie. Ces fréquences étaient utilisées par d'autres (télévision, militaires,...). Et il faut des accords internationaux (au moins par continent)
- Le changement de technologie est une bonne occasion d'attribuer de nouvelles bandes de fréquences aux radiocommunications.

14 LES FRÉQUENCES UTILISÉES

- La bande des 3,5 (3,49 à 3,8) GHz a été attribuée en exclusivité à la 5G
- Les opérateurs peuvent également déployer de la 5G dans les bandes des (700 - 800 - 900 MHz et (1,8 - 2,1 – 2,6) GHz actuellement utilisées pour la 2G, la 3 G et la 4 G
- Plus tard, la bande des 26 GHz sera également attribuée à la 5G
- Propriétés des quatre bandes de fréquences utilisables par la 5G
 - Les bandes des 700 - 800 – 900 MHz sont celles qui assurent la meilleure couverture mobile : elles ont une grande portée, 2 km en zone urbaine et 8 Km en zone rurale, et une bonne pénétration à l'intérieur des bâtiments. En revanche les débits restent faibles car les largeurs de bande sont faibles
 - La bande des 26 GHz est celle qui offrira les meilleurs débits mais une portée limitée à 150 mètres
 - Les bandes des 1,8 - 2,1 - 2,6 GHz et celle des 3,5 GHz sont celles qui offrent le meilleur compromis entre débit et portée du signal et pénétration dans les bâtiments.

5G la portée des 3 bandes

Source : Arcep _ 2020



16 QUELQUES NOTIONS SUR LES ANTENNES

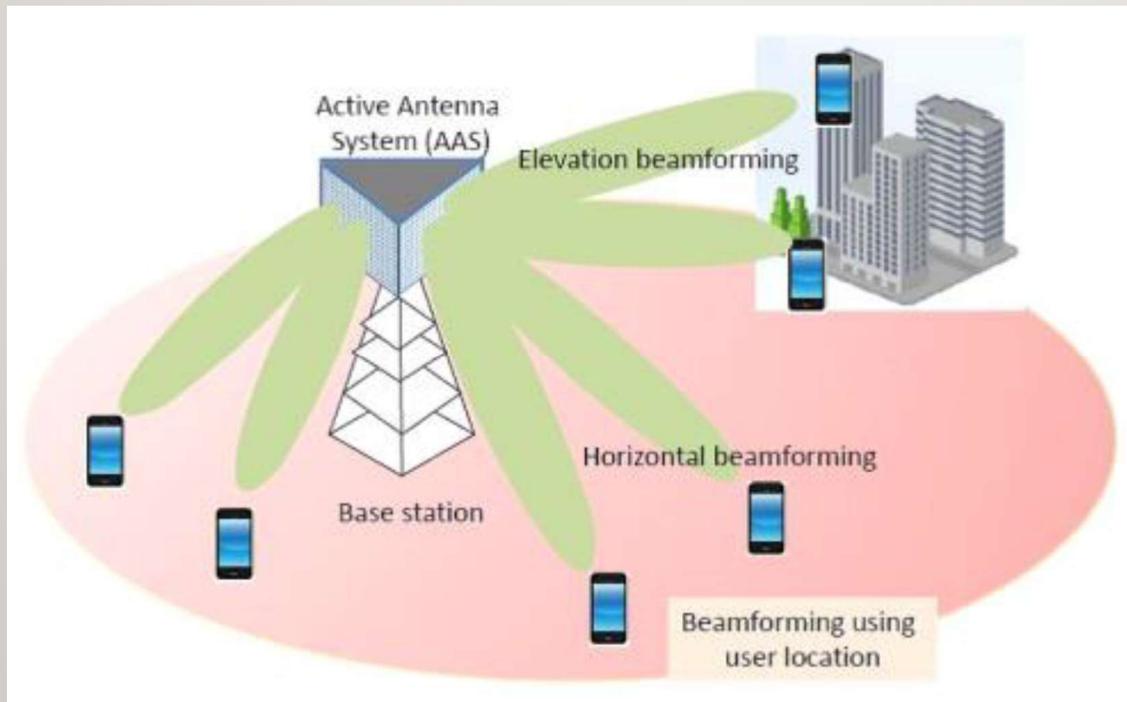
- Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager sous forme d'une onde
- Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur
- La même antenne est souvent utilisée en émission et en réception
- Diagramme de rayonnement : il représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. La partie de l'espace avec une puissance exploitable s'appelle le ou les lobes
- Il existe un grand nombre de formes et de caractéristiques d'antennes, donc plus ou moins adaptées aux différentes utilisations.

17 LE MASSIVE MIMO

- **Multiple-Input Multiple-Output** ou **MIMO** (« entrées multiples, sorties multiples » en français) est une technique de transfert radio de données utilisant plusieurs antennes tant au niveau de l'émetteur qu'au niveau du récepteur. Il faut une séparation physique des antennes
- Les gains ou fonctions apportés :
 - Diversité spatiale, qui améliore la qualité du signal reçu si les chemins sont multiples (déjà utilisée en 4G)
 - Multiplexage spatial (peu utilisé à ma connaissance)
 - L'orientation du faisceau en émission (nouveau en réseau cellulaire, voir diapo suivante)
- En 5G, les stations de base sont dotées de plusieurs dizaines de petites antennes (64 en émission et 64 en réception), les smartphones pourront en comporter jusqu'à 8x8, mais la petite taille du terminal est un obstacle au bon fonctionnement.

18 LE BEAM FORMING (FAISCEAU DIRECTIONNEL)

- Le réseau d'antennes (souvent appelé antenne active) permet de créer des lobes de diffusion à orientation commandée vers un terminal mobile. Une même fréquence ou un même code peut ainsi être utilisé plusieurs fois simultanément dans une cellule.



19 LA SÉPARATION DES SERVICES OU SLICING

- Trois classes de service seront proposées, adaptées aux différents besoins des utilisateurs et de leurs applications
 - L'EMBB (*Enhanced Mobile BroadBand*) : un service standard par rapport aux réseaux cellulaires actuels, mais avec une augmentation significative du débit.
 - L'URLLC (*Ultra Reliable Low Latence Communications*) : un service pour les applications ayant des contraintes temporelles, les communications se feront avec un temps de latence extrêmement réduit, et donc une réactivité supérieure.
 - Le MMTC (*Massive Machine Type Communications*) : ce service permettra d'uniformiser les communications pour l'Internet des objets, où de nombreux protocoles cohabitent actuellement.
- Ces trois classes de service arrivent avec un mécanisme de *slicing*, qui permet de découper en tranches la matrice de ressources de communication temps/fréquence. Chaque tranche fournira à ses utilisateurs la qualité de service souhaitée et, de plus, elles sont isolées les unes des autres pour éviter toute forme de perturbation entre elles.

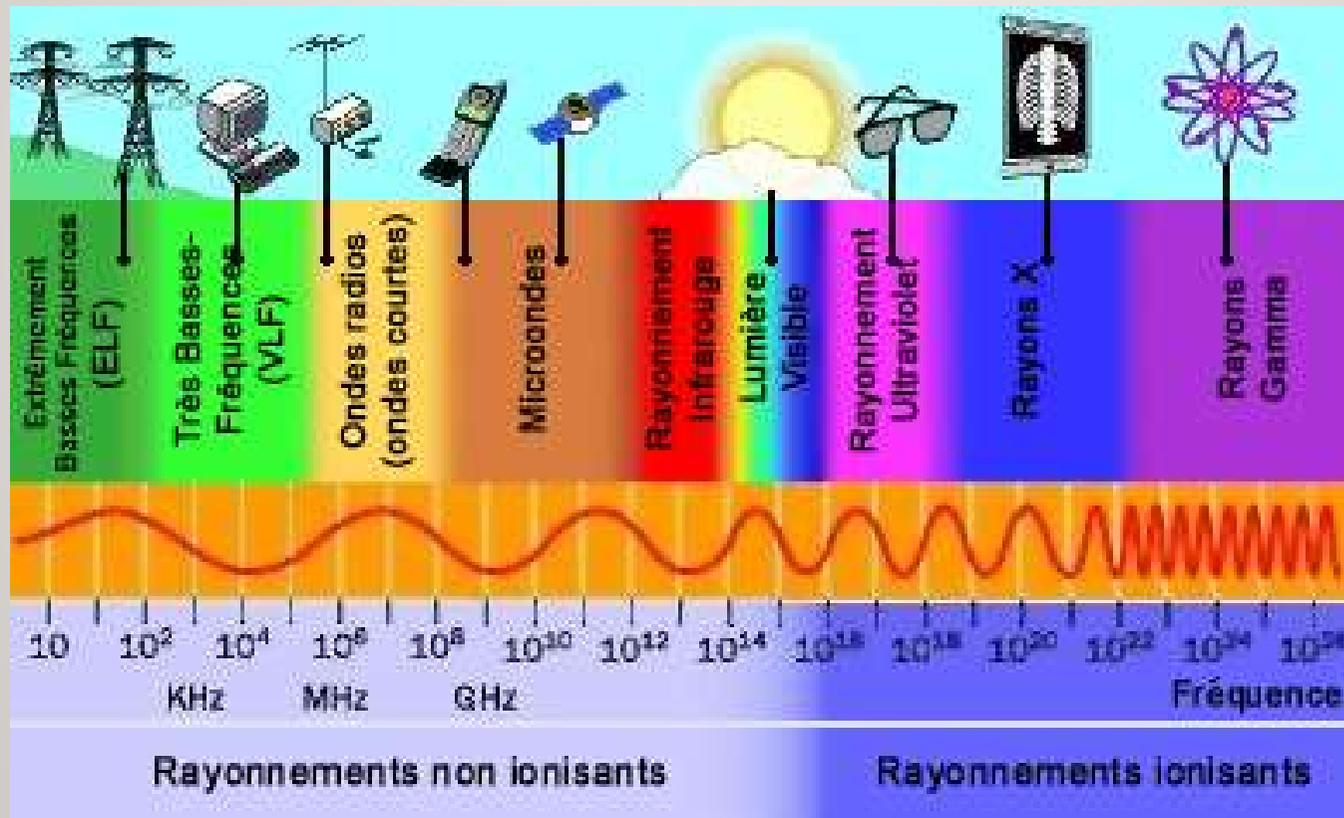
20 LA VIRTUALISATION

- La virtualisation consiste à rendre les réseaux programmables. Elle permet de faire des modifications sans avoir à intervenir sur leur infrastructure physique. Les réseaux deviennent ainsi plus souples à gérer, et il sera beaucoup plus facile d'y intégrer de nouveaux services
- Cette caractéristique concerne les opérateurs, elle n'a pas d'impact sur les utilisateurs

LA POLÉMIQUE SUR LES RISQUES SANITAIRES DES RÉSEAUX POUR MOBILES

EFFETS DES RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES SUR LES TISSUS BIOLOGIQUES

- Deux grandes catégories de rayonnements



22 LA POLÉMIQUE SUR LES RISQUES SANITAIRES DES RÉSEAUX POUR MOBILES

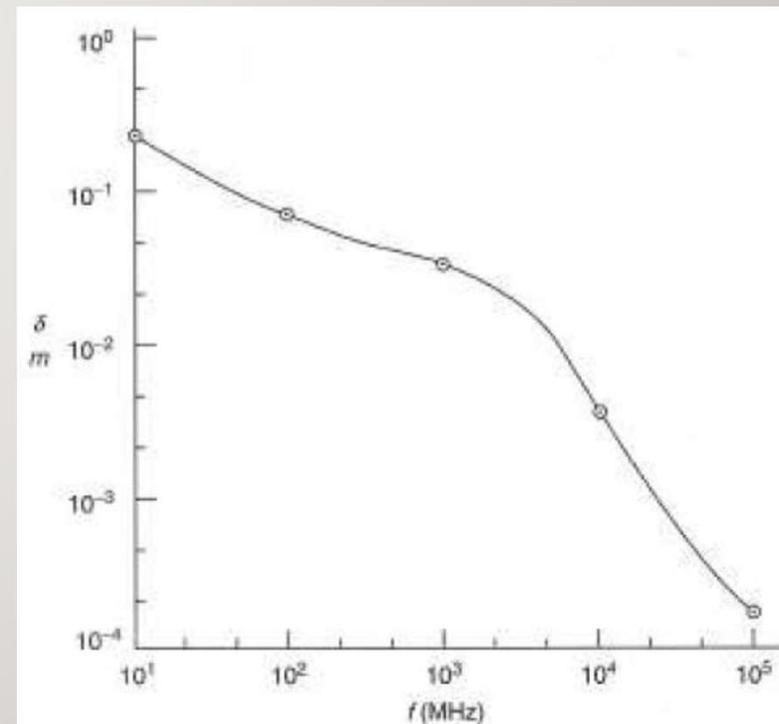
- Les polémiques sur les générations précédentes : des milliers d'études, de synthèses d'études
- Conclusion : seul le phénomène thermique est identifié comme un risque sanitaire, mais il est négligeable et compensé par l'organisme en **respectant les limites de puissance et de distance établies** par “the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ([ICNIRP](#))”
- Le terminal (son smartphone) est de loin la source du signal le plus puissant capté par le corps d'un usager en raison de sa proximité
- Attention à la confusion entre effet sur les tissus biologiques et risque sanitaire
- Des recommandations d'usage de bon sens.

23 LA POLÉMIQUE SUR LES RISQUES SANITAIRES DE LA 5G

Les polémiques spécifiques 5 G :

- concernent les nouvelles fréquences, plus élevées, dont on connaît moins bien les actions sur les tissus biologiques.
- Mais on sait que la pénétration est plus faible en hautes fréquences
- Les effets sont surfaciques et on remplace le DAS (exprimé en W/kg) par la densité Superficielle de Puissance exprimée en W/m²

Profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique dans un muscle
(Barnes et Greenebaum 2006)



24 LA POLÉMIQUE SUR LES RISQUES SANITAIRES DE LA 5G (SUITE)

- Ces fréquences étaient déjà utilisées (3,5 GHz pour le WiMax, 26 GHz pour les communications par satellite,...) et que des fréquences de valeurs proches sont ou vont être utilisées par le WiFi (5 et 60 GHz)
- Pour la bande 3,5 GHz, les propriétés observées sont proches de celles de la bande 2,6 GHz qui a été bien étudiée
- Pour la bande 26 GHz, la longueur d'onde passe dans l'ordre de grandeur centimétrique (mais les détracteurs disent millimétrique) : 1,1 cm.

25 LA POLÉMIQUE SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

- Le déploiement du réseau va bien entendu consommer de l'énergie
- La consommation spécifique est un peu moins élevée que celle des générations précédente
- La disparition de la 2G et de ses antennes devrait permettre quelques économies
- La 5G fait partie des évolutions des technologies de l'information, celles-ci consomment de plus en plus parce qu'elles sont de plus en plus utilisées.

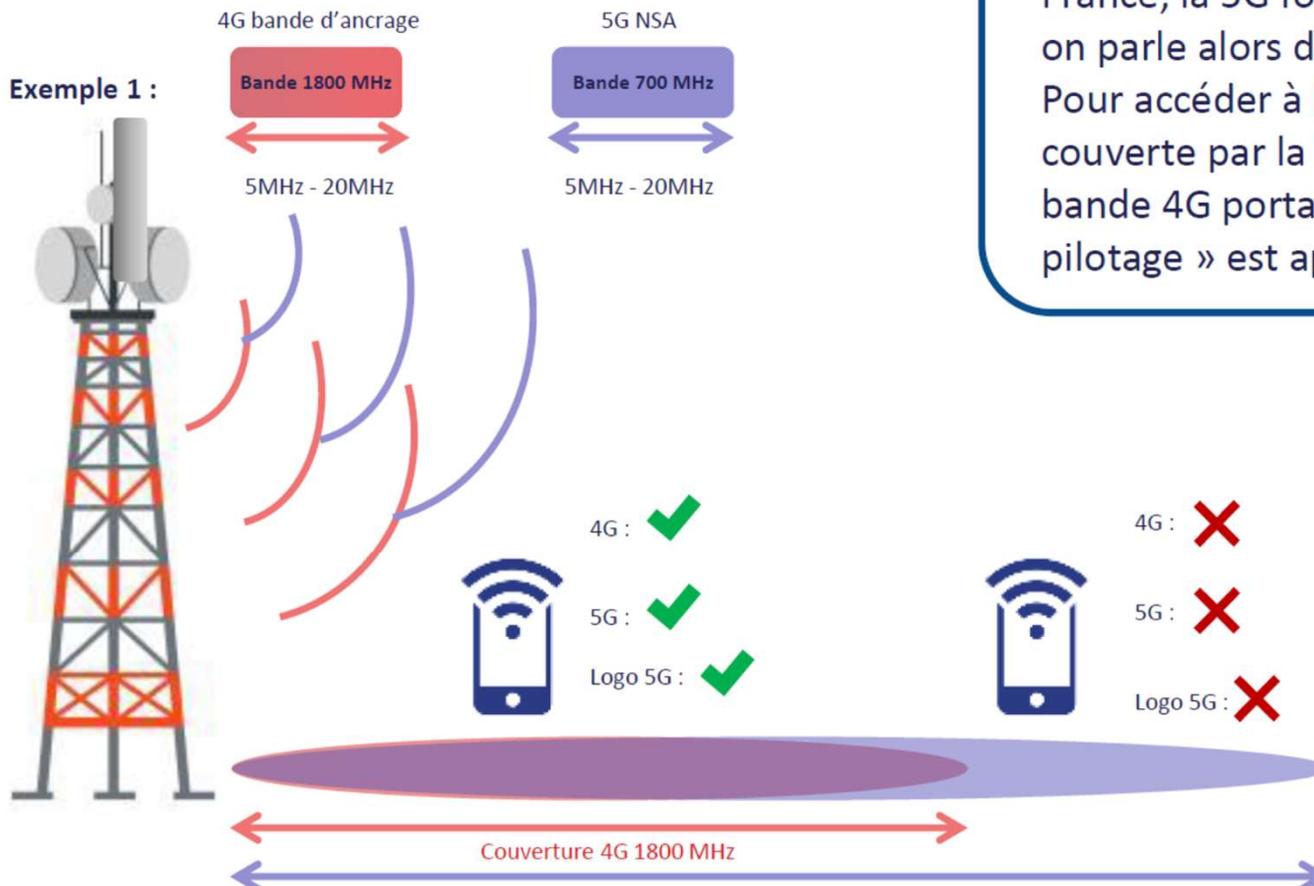
26 LE LIEN ENTRE 5 G ET COVID

- Le seul lien établi entre la 5G et la COVID est la période de « déploiement », les années 2020 – 2021
- **C'est donc un gros canular !**

27 LE DÉPLOIEMENT EN FRANCE

- En France, quatre opérateurs ont acheté en 2020 des fréquences 5G dans la bande des 3,5 GHz. Il s'agit de Orange (90 MHz), SFR (80 MHz), Bouygues Telecom (70 MHz) et Free (70 MHz)
- Les opérateurs déploient actuellement sur cette bande (un peu) et beaucoup sur les bandes 700 et 2100 reprises à la 4G, souvent en cohabitation (DSS : Dynamic Spectrum Sharing). Certains parlent de fausse 5G car la seule évolution technologique mise en œuvre est la nouvelle modulation. Le gain en débit est faible pour l'utilisateur
- La 5G va donner lieu au déploiement d'antennes à faible puissance, comparables à des émetteurs wifi, dans des lieux de forte affluence comme des gares ou des centres commerciaux. Dans la rue, les antennes des stations de base vont être placées sur les lampadaires.

28 LA 5G NSA (NON STAND ALONE)

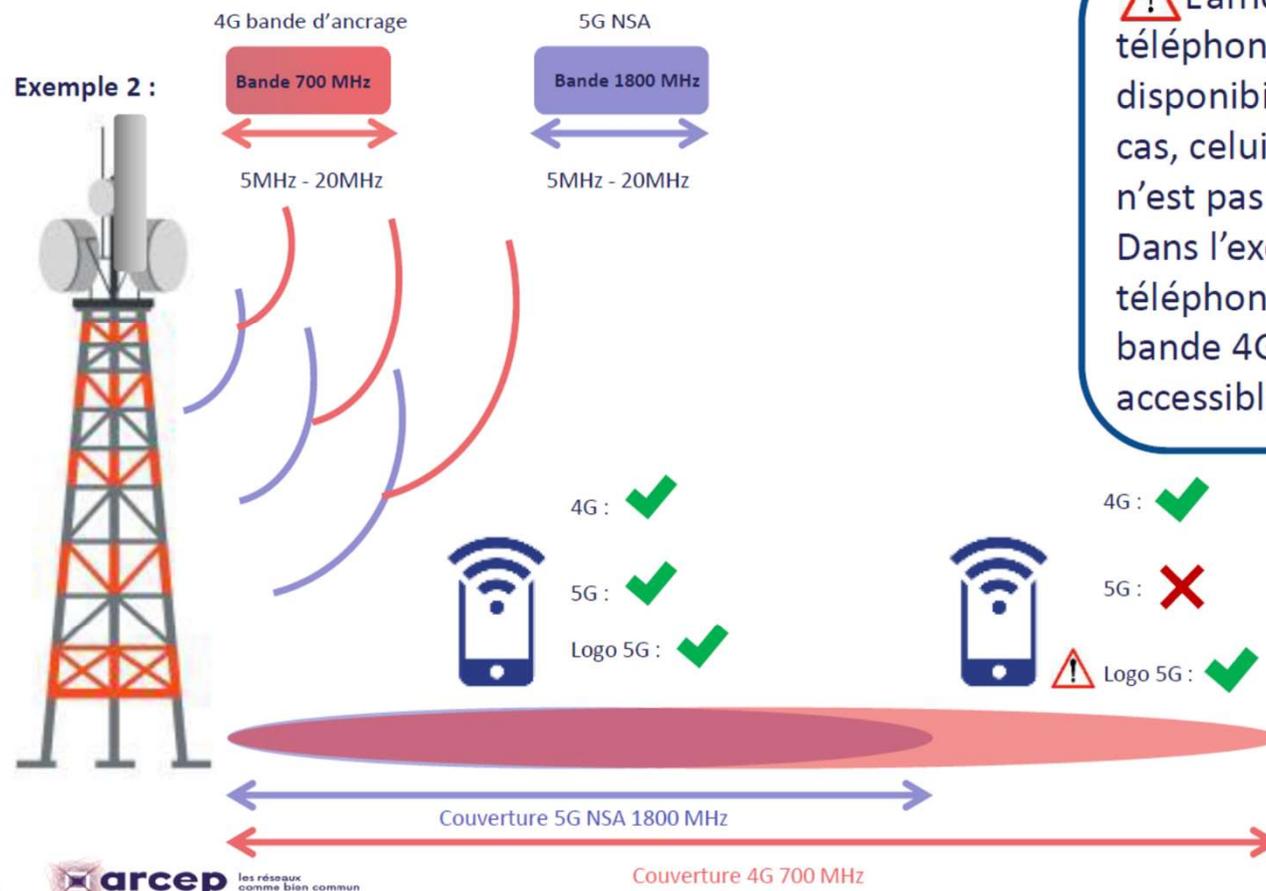


Pour le moment, et pour quelques années encore en France, la 5G fonctionnera avec un cœur de réseau 4G : on parle alors de **5G NSA**.

Pour accéder à la 5G il faut donc être dans une zone couverte par la bande 5G, mais aussi couverte par la bande 4G portant la signalisation. Cette bande 4G « de pilotage » est appelée **bande d'ancrage**.

La couverture 5G ne dépend donc pas juste de sa fréquence d'émission (ici 700 MHz), mais aussi de la couverture de la bande 4G d'ancrage. La couverture effective 5G est la plus petite couverture entre les deux (ici couverture 1800MHz).

5G Non Stand Alone (NSA) et bande d'ancrage



⚠ L'affichage du logo 5G sur l'écran d'un téléphone portable n'est pas une preuve de la disponibilité de cette technologie. Dans certains cas, celui-ci peut apparaître alors que le service n'est pas disponible.

Dans l'exemple ici, le logo apparaît car le téléphone portable à droite est connecté à une bande 4G d'ancrage, mais la bande 5G n'est pas accessible.

30 LA SÉCURITÉ DES INFORMATIONS

- Des protocoles initiaux avec des failles de sécurité, ils ont été corrigés
- Pour le reste, pas de risques plus élevés que pour la 4 G
 - Des programmes espions cachés dans les équipements du réseau (chez le chinois Huawei)? Sans doute, comme le font déjà Google, Apple, Microsoft et d'autres
 - Des écoutes indiscretes? Possibles mais difficiles depuis la 2G
 - Des intrusions dans les terminaux par l'interface 5 G : comme par toute interface filaire ou sans fil
 - Par les objets connectés : oui, mais ils seront moins vulnérables qu'actuellement. Toutefois leur nombre et leur variété va être une faiblesse.

CONCLUSION

- La 5G n'est pas un monstre, c'est une évolution technologique standard, sans rupture avec la 4G, elle est un peu plus efficace
- Elle va se déployer sur plusieurs années pour des raisons techniques et des raisons économiques
- Elle va apporter du confort donc plus d'usage que les générations précédentes, donc plus de consommation énergétique mais :
 - Les voitures avec climatisation sont plus utilisées que celles qui n'en ont pas (il en reste peu), pourtant elles consomment plus
 - Elle va apporter une simplification pour les objets connectés par uniformisation du protocole de base, donc le nombre de ces objets va fortement augmenter.

- Essentiellement documents émis par l'ARCEP : Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse

L'Arcep est une autorité administrative indépendante (des acteurs économiques et du pouvoir politique)

- Rapport intermédiaire de l'ANSES – Agence nationale de sécurité sanitaire, alimentation, environnement, travail- Comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». Octobre 2019.