

Interfaces Radio Mobiles

Voyage au cœur des ondes : de la 1G analogique à la 5G.

Une analyse technique pour comprendre l'évolution du signal en France.

Version 0.9

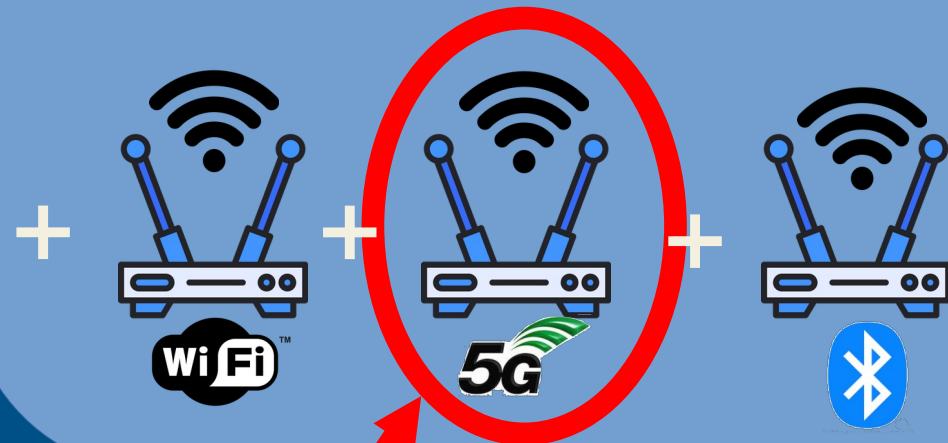
Intentions pour ces quelques pages.

Développeur de composants électroniques et de terminaux de téléphonie mobiles à un moment de ma carrière professionnelle, mon intention est de donner la visibilité de ce qu'il se passe au niveau de l'antenne du téléphone portable. Autant que possible les notions sont vulgarisées, mais étant très complexes, les explications ne peuvent s'affranchir de connaissance de physique (fréquence, spectre, puissance). Ces quelques pages ciblent l'information sur les fréquences, les canaux, les modulations, bref, ce qui est dénommé sous le jargon "*mobile air interface*".

Autant que possible, les puissances et enveloppes du signal sont mentionnés pour permettre au lecteur de mieux sentir ce qu'il se passe à l'antenne, et ce notamment pour le vivant ou les machines qui perçoivent cette énergie comme de la pollution. Vu sous un autre angle: pour se protéger d'un danger, le comprendre est un atout.

Au fil des générations de protocoles de téléphonie mobile, les modulations se sont grandement complexifiées. Cette évolution repose entièrement sur une puissance de calcul devenue massive et bon marché. Si la puissance de calcul pour un modem de téléphone de 1990 était une goutte d'eau, celle de 2025 représente une piscine olympique (environ 1 million de fois plus)

Architecture macro d'un téléphone portable



La suite de la présentation sera focus sur la fonction "modem 2G, 3G, 4G, 5G"

1G : L'Ère Analogique (1986-2000)

Radiocom 2000 - "un talkie walkie amélioré"

La première génération reposait sur des signaux analogiques, similaires à la radio FM. Pas de "bits", mais une onde continue transportant la voix.

Fréquences : 175, 200, 400 MHz

Modulation : FM (Fréquence)

Accès : FDMA (Fréquentiel, à chacun son canal)

Enveloppe : Continue (Pas de pulsé)

Puissance Max : 8W (Voiture) / 2W (Portatif)



2G : Le Numérique Pulsé

Avec le GSM (Global System for Mobile), la voix devient des 0 et des 1. Le temps est découpé en "tranches" (Time Slots), créant un signal haché.

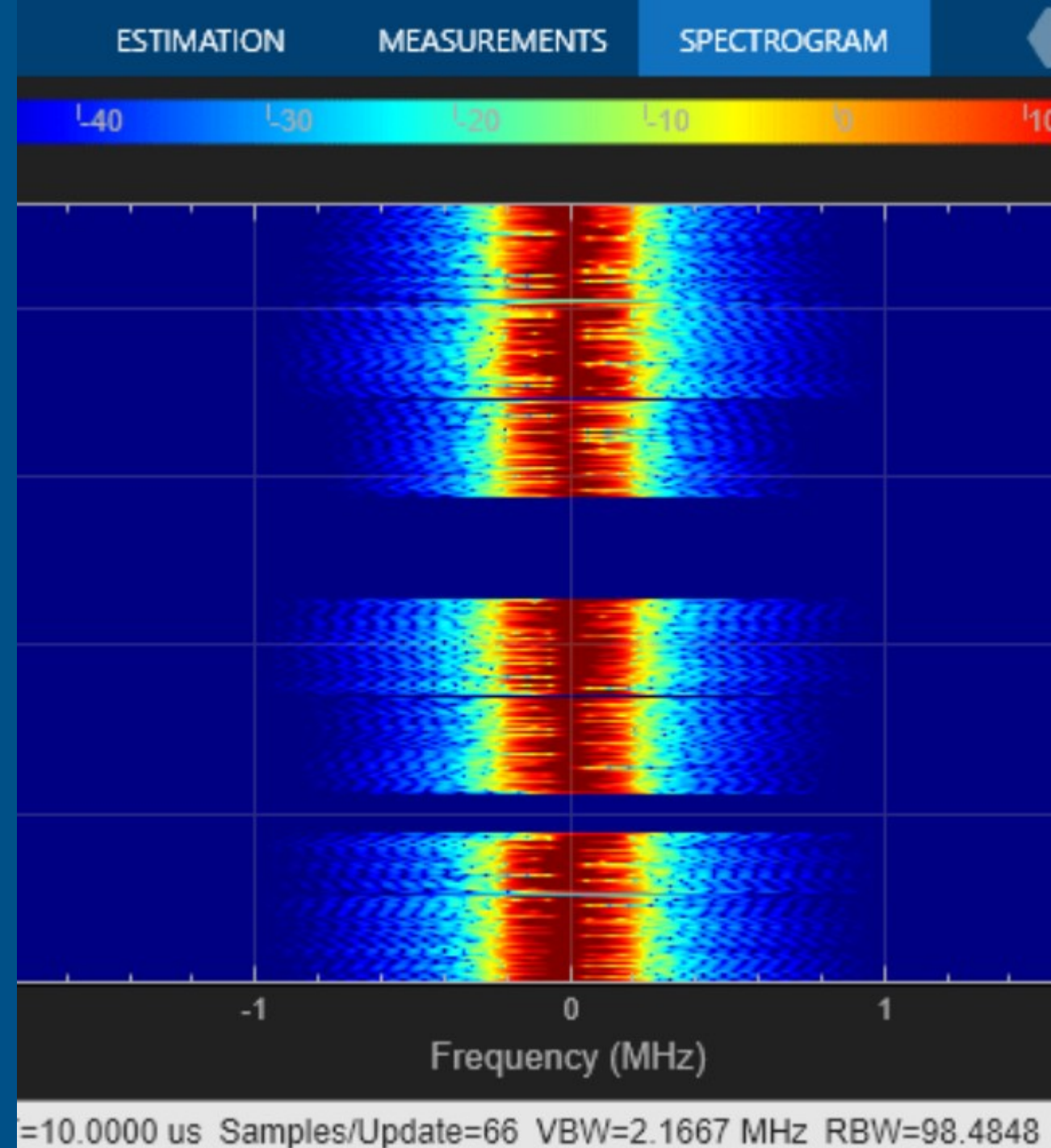
Bandes : 900 MHz, 1800 MHz

Modulation : GMSK (Phase)

Débit : 9.6 kbps (GPRS: ~40k)

Enveloppe : Pulsée (Salves 217 Hz)

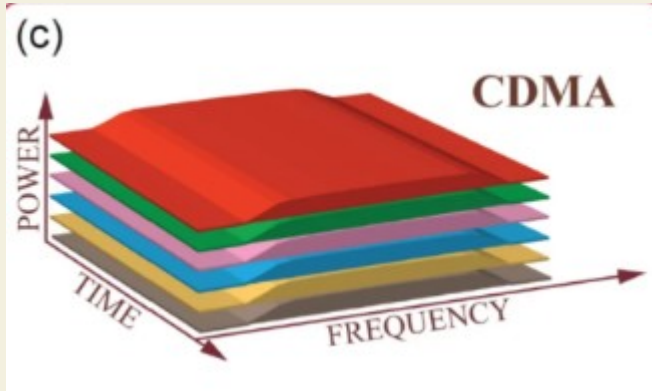
Puissance Max : 2W (900) / 1W (1800)



3G : Le Code & La Data

UMTS (Universal Mobile Telecom System)

La 3G change de paradigme. On n'utilise plus le temps (TDMA) mais des Codes pour partager la ressource radio (CDMA). Tous les utilisateurs parlent en même temps, mais dans un langage codé différent. Les calculs mathématiques permettent de retrouver l'information de chacun dans le brouillard.



Chaque utilisateur peut être vu comme une couche de **bruit**. C'est les maths qui permettent de discréditer chacun du bruit global.

Bandes : 900 MHz (B8), 2100 MHz (B1)

Modulation : QPSK (Phase) / WCDMA

Débit : 384 kbps -> 42 Mbps (H+)

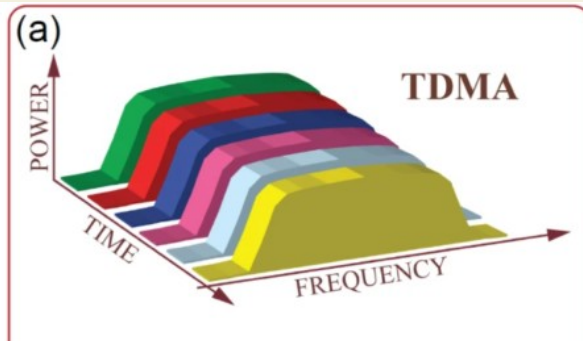
Enveloppe : Continue (Pseudo-bruit)

Puissance Max : 0.25W (24 dBm)

A partir de la 3G, la gestion fine de puissance coté mobile est indispensable

1 à 3G : utilisation de plus en plus efficace de la ressource radio

2G

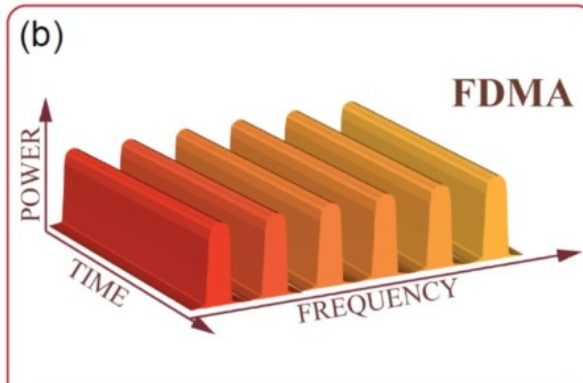


Un utilisateur = une couleur

2G : Time Division Multiple access

Chaque utilisateur a une tranche de temps réservée. La limite est vite atteinte quand les utilisateurs sont géographiquement concentrés. Par ailleurs, certains neurologues pointent le caractère pulsé du signal à l'antenne comme une perturbation du cerveau..

1G

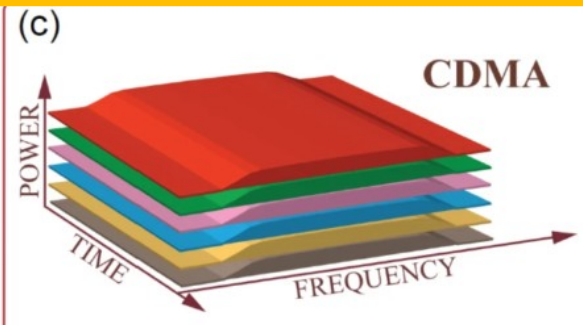


Un utilisateur = une couleur

1G : Frequency Division Multiple access

Chaque utilisateur a une fréquence réservée. Malgré le faible nombre d'abonnés à l'époque, la limite en nombre d'utilisateurs est vite atteinte.

3G



Un utilisateur = une couleur

3G Code Division Multiple access

Les utilisateurs se voient alloués des codes de façon dynamique, suivant leur besoin, et les ressources disponibles. Seule la puissance de calcul limite le nombre d'utilisateurs. Le signal à l'antenne du mobile est un bruit rose continu.

4G : L'Autotoroute Haut Débit

OFDMA (Orthogonal Freq Div)

Le LTE (Long Term Evolution) divise le canal en milliers de sous-porteuses fines. C'est comme avoir 1200 petits câbles au lieu d'un gros.

Bandes : 700, 800, 1800, 2100, 2600 MHz

Largeur : Jusqu'à 20 MHz par bloc

Puissance : 0.2W (23 dBm)

Performance & Modulation

Grâce à des modulations complexes (jusqu'à 256QAM), on compacte plus d'infos dans la même onde.

Modulation : QAM (Amplitude+Phase) - OFDM

Débit : 150 Mbps -> 1 Gbps

Enveloppe : Bruit blanc large bande

5G : Davantage de complexité

La 5G NR (New Radio) reprend les bases de la 4G mais ajoute une flexibilité extrême et de nouvelles fréquences hautes. Le MIMO est mis en service globalement.

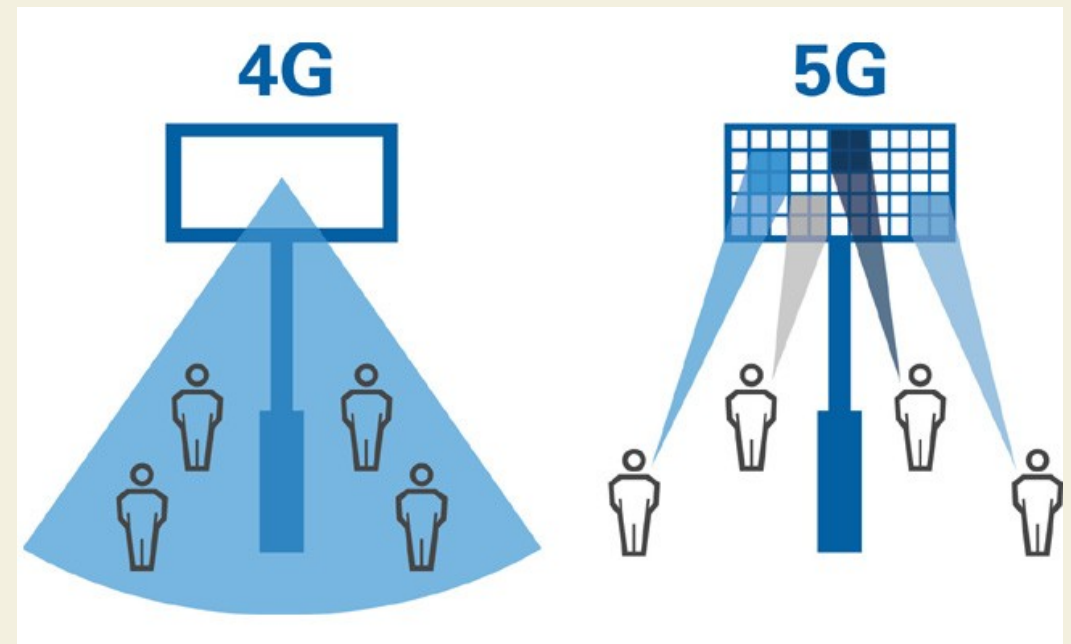
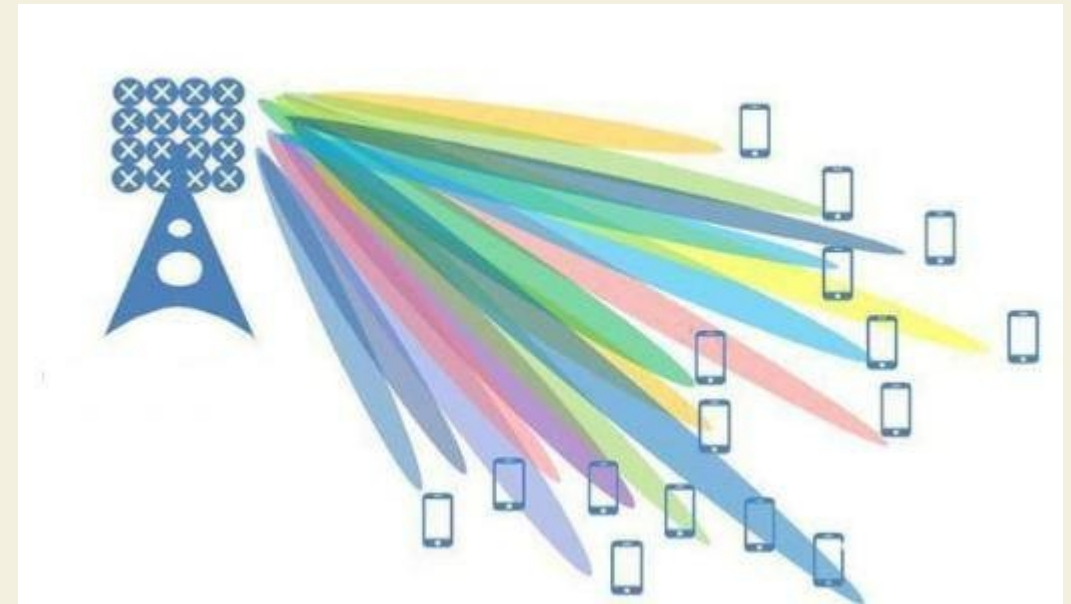
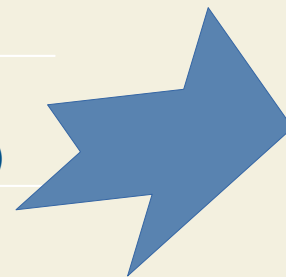
Bandes : 700 MHz, 3.5 GHz (C-Band), 26 GHz

Modulation : CP-OFDM Adaptatif

Innovation : Beamforming (multi faisceaux)

Latence : < 1 ms (Théorique)

Puissance : Similaire 4G, 0.2W



Les antennes 5G actuelles sont composées de 64 éléments chacune

Résumé du plan de fréquence en France

Fréquences	Technologies utilisées actuellement en France métropolitaine	Date	Pénétration à l'intérieur des bâtiments	Portée	Débit maximum théorique
700 MHz	4G et 5G	Attribuée en 2015	★★★★	★★★★	★
800 MHz	4G	Attribuée en 2012	★★★★	★★★★	★
900 MHz	2G et 3G	Attribuée en 1986	★★★★	★★★★	★
1,8 GHz	2G, 4G	Attribuée en 1994	★★★	★★★	★★
2,1 GHz	3G, 4G et 5G	Attribuée en 2001	★★★	★★★	★★
2,6 GHz	4G	Attribuée en 2012	★★	★★	★★
3,5 GHz	5G	Attribuée en 2020	★★	★★★	★★★

Source : Arcep

Source : tome 1 édition 2022

L'ARCEP indique que la bande 26GHz est réservée pour une prochaine génération de 5G

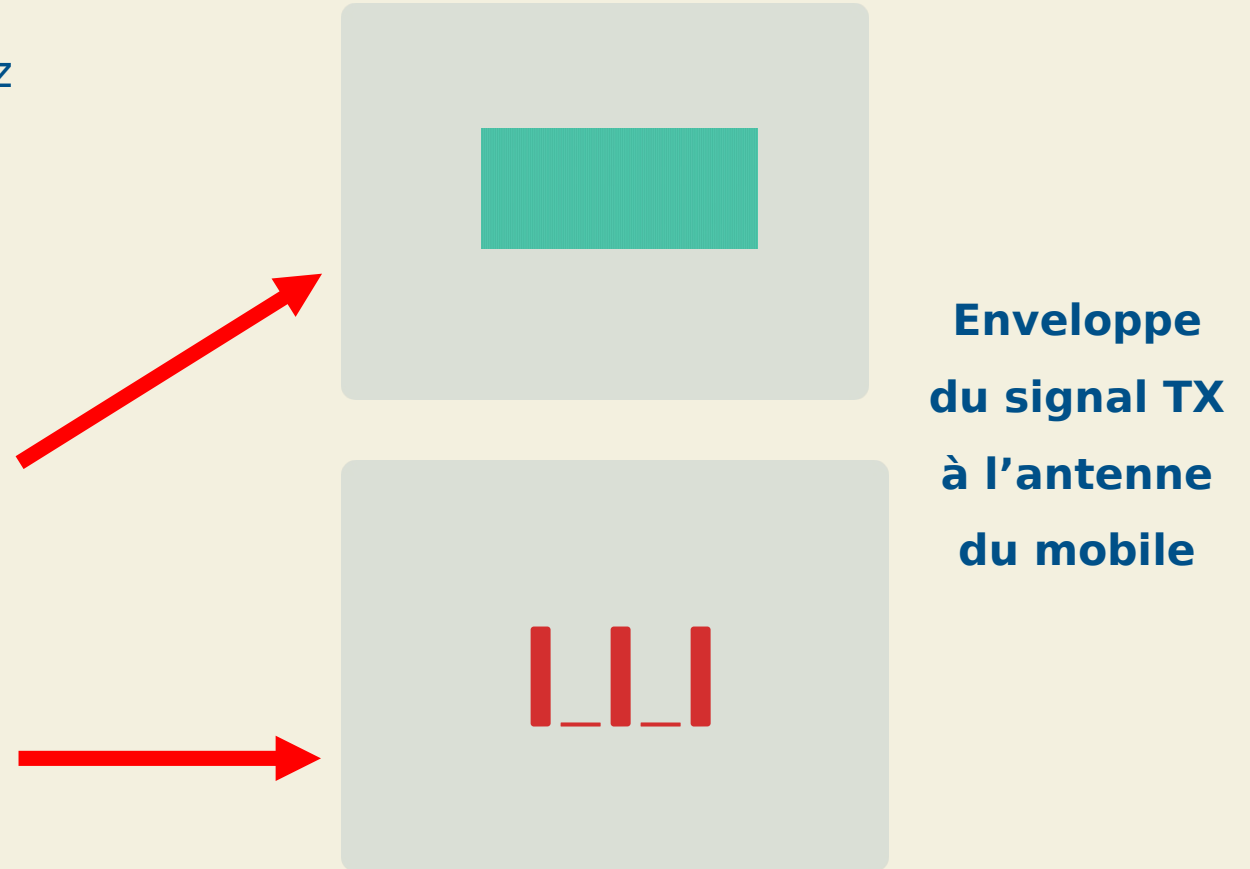
La 5G, les 5G ?

La bande 3.5 GHz « offre le compromis idéal entre couverture et débit. »

Un détail des protocoles est présenté de façon assez discrète: Suivant la fréquence utilisée, la séparation **émission - réception** se fait différemment:

Bande 700 MHz: FDD - Séparation fréquentielle
= une fréquence TX et une RX

Bande 3.5GHz: TDD - Séparation temporelle
= sur une unique fréquence le terminal alterne (émission, puis silence, puis réception)



En europe il est retenu une répétition de **200Hz** ou **400Hz** suivant le besoin data du mobile.

La norme autorise un vaste panel de 100Hz à 2kHz.

Le Concept MIMO

Multiple Input Multiple Output : Utiliser les échos à notre avantage.



SISO (Single Lane)

1 Antenne. Comme une route à une seule voie. Si ça “bouchonne” (=rebond), le débit s'effondre car le signal reçu est partiellement brouillé par ses échos.



Multipath

Le signal rebondit sur les obstacles. Avant, c'était un défaut (brouillage). Avec le multipath, on utilise ces rebonds pour reconstruire virtuellement un signal plus puissant.

MIMO

On envoie plusieurs flux de données en parallèle via différents chemins et différentes antennes. Le signal initial est reconstruit à réception. Débit multiplié d'autant. En 5G le MIMO est utilisé tant coté pylône que coté terminal.

Focus EHS : Signature Temporelle

Comment "sonne" le signal ? Une différence clé pour la perception et la mesure.



2G (GSM) et 5G (3.5GHz) : Pulsé

2G: Le signal est émis par paquets (bursts) toutes les 4.6 ms (217 Hz).

Alternance d'émission et de silence total

5G @3.5GHz: retour au pulsé.

Alternance TX, silence, RX



Effet marteau-piqueur (BF).



3G / 4G / 5G (700MHz) : Continu

Le signal ressemble à du bruit aléatoire constant.

La puissance varie peu brutalement.



Effet "Souffle" comme le bruit d'un torrent.

Focus EHS : Signature Spectrale

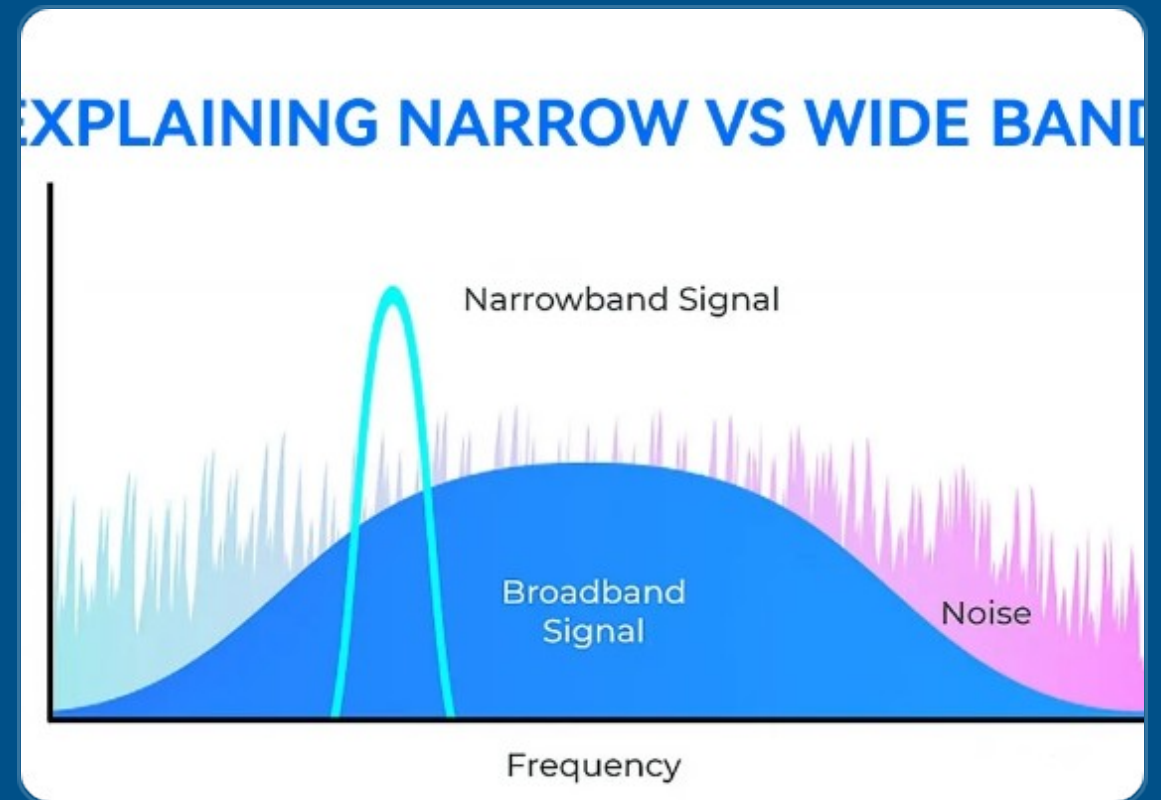
L'occupation de la bande

L'évolution technologique se traduit par un élargissement considérable des canaux utilisés.

2G (GSM) : Canal étroit (0.2 MHz). Forme de cloche ou dôme gaussien (bleu clair).

3G (UMTS) : Bloc large (5 MHz). Forme de plateau. (bleu rempli)

4G / 5G : Bloc très large (10 à 100 MHz). Forme rectangulaire abrupte.

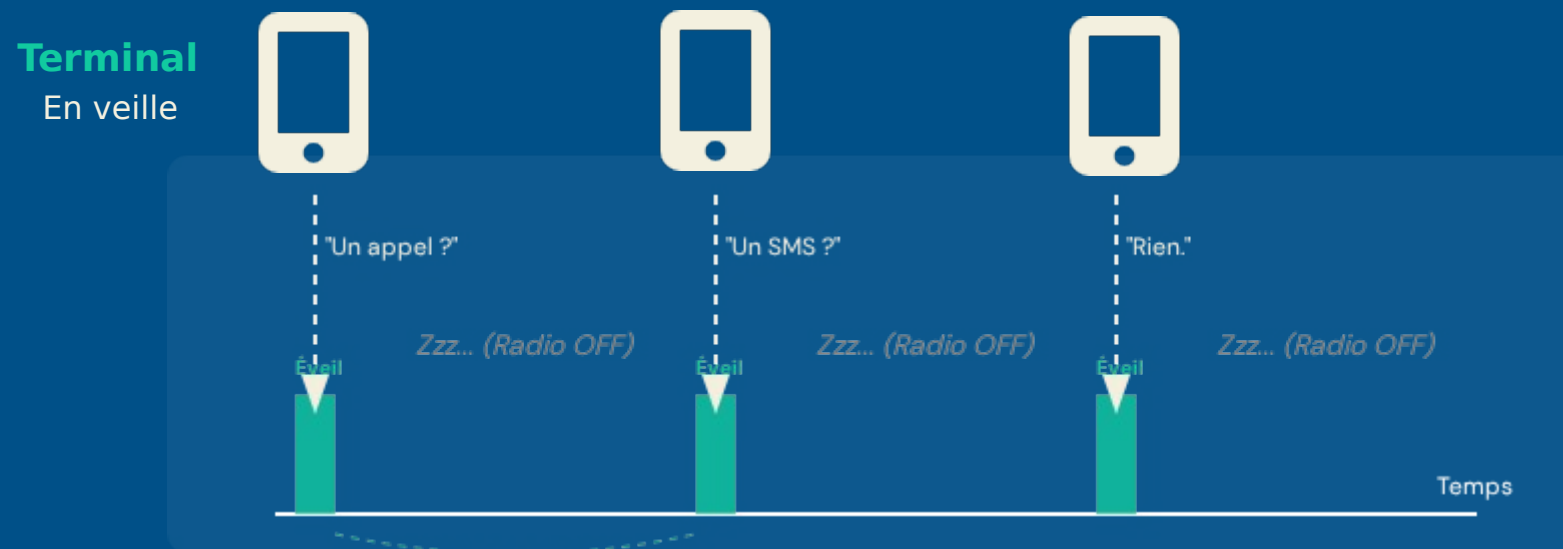


Dans tous les cas, la téléphonie utilise une bande de fréquence limitée car le spectre radio, ressource très précieuse, est partagé avec tous les autres dispositifs radio (tv, wifi, DMR, etc..)

La Veille du mobile : L'art de la "Micro-Sieste"

Comment le mobile reste joignable sans vider sa batterie en 2 heures ?

Réponse : Le mécanisme **DRX (Discontinuous Receive in 4G, 5G)**.



Le **modem** ne s'allume **EN RECEPTION** que quelques millisecondes par cycle de 1.28s ou 2.56s.
99% du temps, il est en sommeil.

Le mobile ne passera en émission que pour confirmer sa présence sur le réseau (1 fois par heure)
ou pour **demandeur des données.**

Mobilité en Veille : Le concept de "Tracking Area"

Le "Jeu du Chat et de la Souris", sans allumer la radio en émission

En 4G, 5G

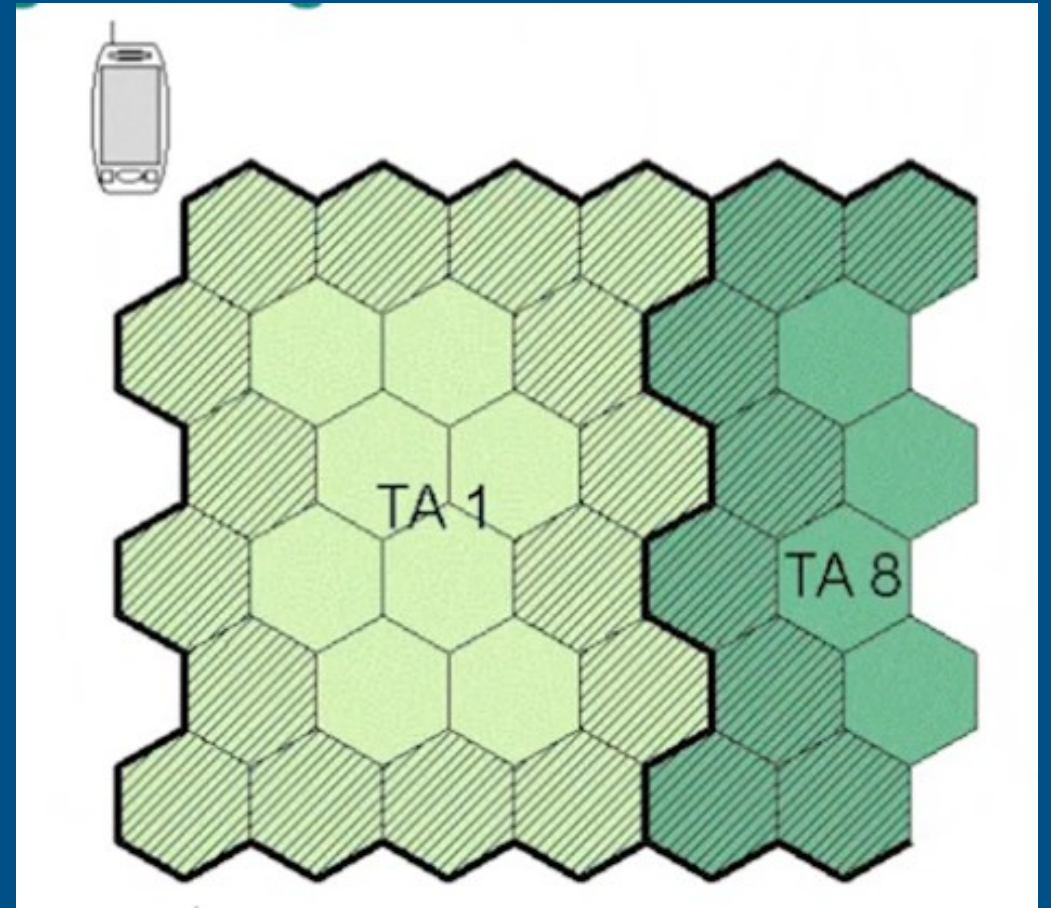
Le réseau doit savoir où vous êtes pour vous joindre, mais si le mobile le prévenait à chaque antenne croisée, le réseau saturerait.

La Solution : Tracking Area (TA)

🙄 **Silence** : Tant qu'il reste dans sa zone (TA1), le mobile change d'antenne sans rien dire.

📶 **Mise à jour (TAU)** : le mobile ne prévient le réseau que s'il change de zone (sortie de TA1).

📢 **Paging** : En cas d'appel, le réseau sonne sur toutes les antennes de la zone TA1 car le mobile y est "quelque part".



Une antenne relais dessert chaque cellule


Mon mobile a perdu le réseau

Philosophie de Connexion: Du "signalement sans fin" à "l'Écoute Intelligente"

Une fois de plus, la recherche de moindre perturbation du réseau converge avec un résultat de moindre pollution électromagnétique pour les usagers.



Écoutez moaa !
Il y a kinkin ?

 **En 2G et 3G**, le mobile restait dans un état de se signaler au réseau, et écouter une réponse au message



Ah, j'entends les copains !
Je vais tenter de m'y abonner

En 4G et 5G, le mobile se place en écoute, et n'émettra QUE s'il entend de l'activité réseau

Focus EHS : mon mobile en veille

Depuis la **4G**, un mobile en veille émet **rarement**.

En 2G, il émettait plusieurs fois par minute.

Sans sollicitation ni déplacement, le mobile ne reporte sa présence au réseau qu'une fois par heure.

La recherche de longévité de la batterie converge avec le besoin de peu de rayonnement pour les EHS.



Une activité accrue du modem sera liée à des requêtes du mobile

Couper “la data” et réduire les gadgets dans son téléphone réduit le trafic que le mobile va demander au réseau

Exemple:

Ai-je vraiment besoin de widgets ?



Focus EHS: Mon mobile génère du trafic non demandé

J'abandonne mon téléphone en veille, et mes appareils de mesure RF montrent que mon mobile télécharge régulièrement des données, alors que je ne demande rien.

Sans intervention des utilisateurs, la politique commerciale des éditeurs d'applications de téléphone augmente le trafic réseau

Quelles fonctions augmentent le trafic de données ?

- Les “**widgets**” dont l'utilisateur attend une mise à jour permanente
 - Les **notifications** depuis toute messagerie
 - Les **synchronisations** de toute sorte
 - Les **publicités**
 -
-

Comment limiter le trafic non demandé ?

- Ne pas installer de “**widgets**”
 - Désactiver les **notifications** et aller consulter manuellement
 - Ne pas installer les app qui ont des **publicités**, préférer les logiciels libres et fiables
-

Sans résultat probant, n'allumer la data **QUE** lorsqu'on consent avoir du trafic réseau



Références & Bibliographie

Où trouver l'information technique fiable ?



La Norme Officielle

3GPP.org

La source absolue des standards.

- **Série 36** : LTE (4G)
- **Série 38** : NR (5G)
- *Doc clé : TS 38.211*
(Couche Physique)



La "Bible" Pratique

ShareTechnote.com

Le wiki indispensable des ingénieurs.

- Explications concrètes
- Traces de logs réelles
- Schémas de fonctionnement



Guides Visuels

Keysight & R&S

Pour visualiser l'invisible.

- White Papers Techniques
- Posters "Physical Layer"
- Guides de mesure RF