

Réseaux de mobiles

Florent Dupont

fdupont@liris.cnrs.fr

[https://perso.liris.cnrs.fr/florent.dupont/Enseignement/
RFSM/Reseau-mobiles.pdf](https://perso.liris.cnrs.fr/florent.dupont/Enseignement/RFSM/Reseau-mobiles.pdf)

Université Claude Bernard



Lyon 1

Objectifs du cours

- Comprendre les spécificités des réseaux de mobiles dans la transmission, depuis les couches basses jusqu'aux applications
- Étudier les exemples de technologies actuelles pour illustrer :
 - les notions d'architecture (station de base, cellule...)
 - les mécanismes de handover
 - etc.
- Enjeu économique et social : très forte croissance, modification des comportements humains (travail, loisir, communication, etc.)

Documents, bibliographie

- **Réseaux de mobiles et réseaux sans fil**
Al Agha, Pujolle, Vivier (Eyrolles)
- **ARCEP – Autorité de Régulation des Télécommunications** <http://www.art-telecom.fr/>

+ *nombreux sites...*

Plan du cours (1)

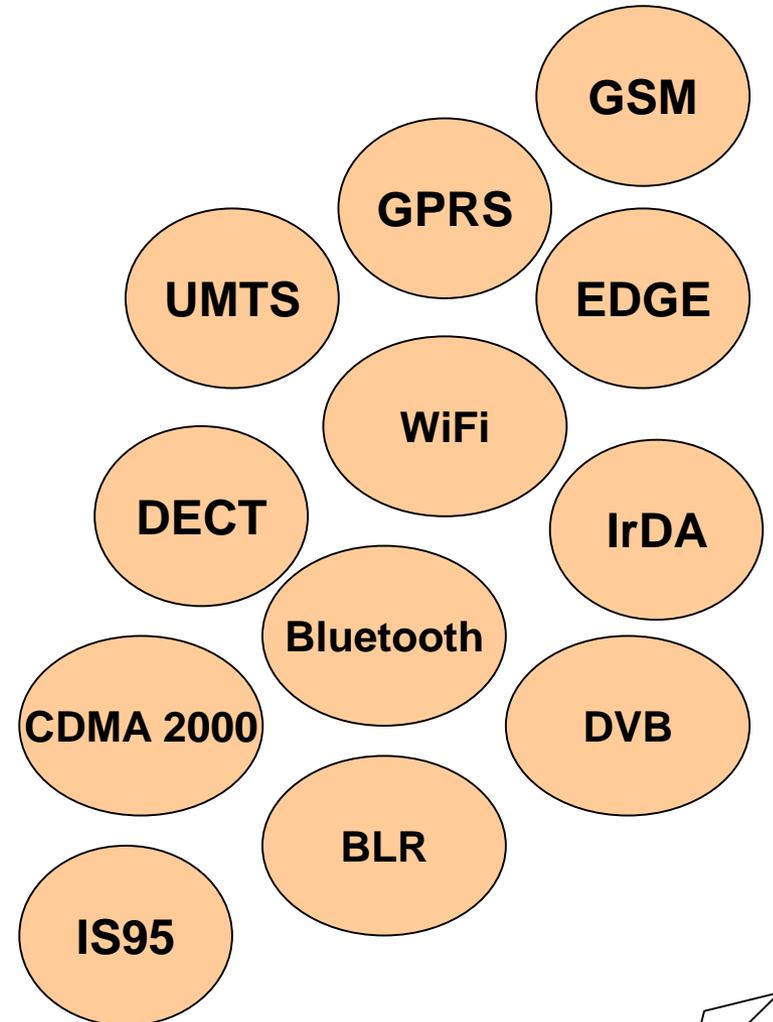
1^{ère} partie

- Historique
- Principes fondamentaux spécifiques :
 - Mobile,
 - Antenne,
 - Architecture,
 - Cellule,
 - Handover
 - etc.

Plan du cours (2)

2^{ème} partie : exemples de systèmes

- GSM - GPRS/EDGE - UMTS
- WiFi
- Systèmes satellites : TV, WiFi
- DVB
- Boucle Radio Locale
- Systèmes : DECT, Bluetooth, IrDA
- Systèmes IS95, CDMA 2000
- IP Mobile
- Services mobiles
- 4G
- Réseaux futurs



Historique

Historique

- 1838 : Théorie (S. Morse)
- 1858 : Câble transatlantique
- 1864 : Équations de Maxwell
- 1865 : Télégraphe (S. Morse)
- 1876 : Téléphone (Bell)
- 1898 : 1^{ère} communication mobile (Marconi, puis Armée US)
- 1915 : 1^{ère} liaison téléphonique transcontinentale (Bell System)
- 1930 : Télévision (principes)

Historique

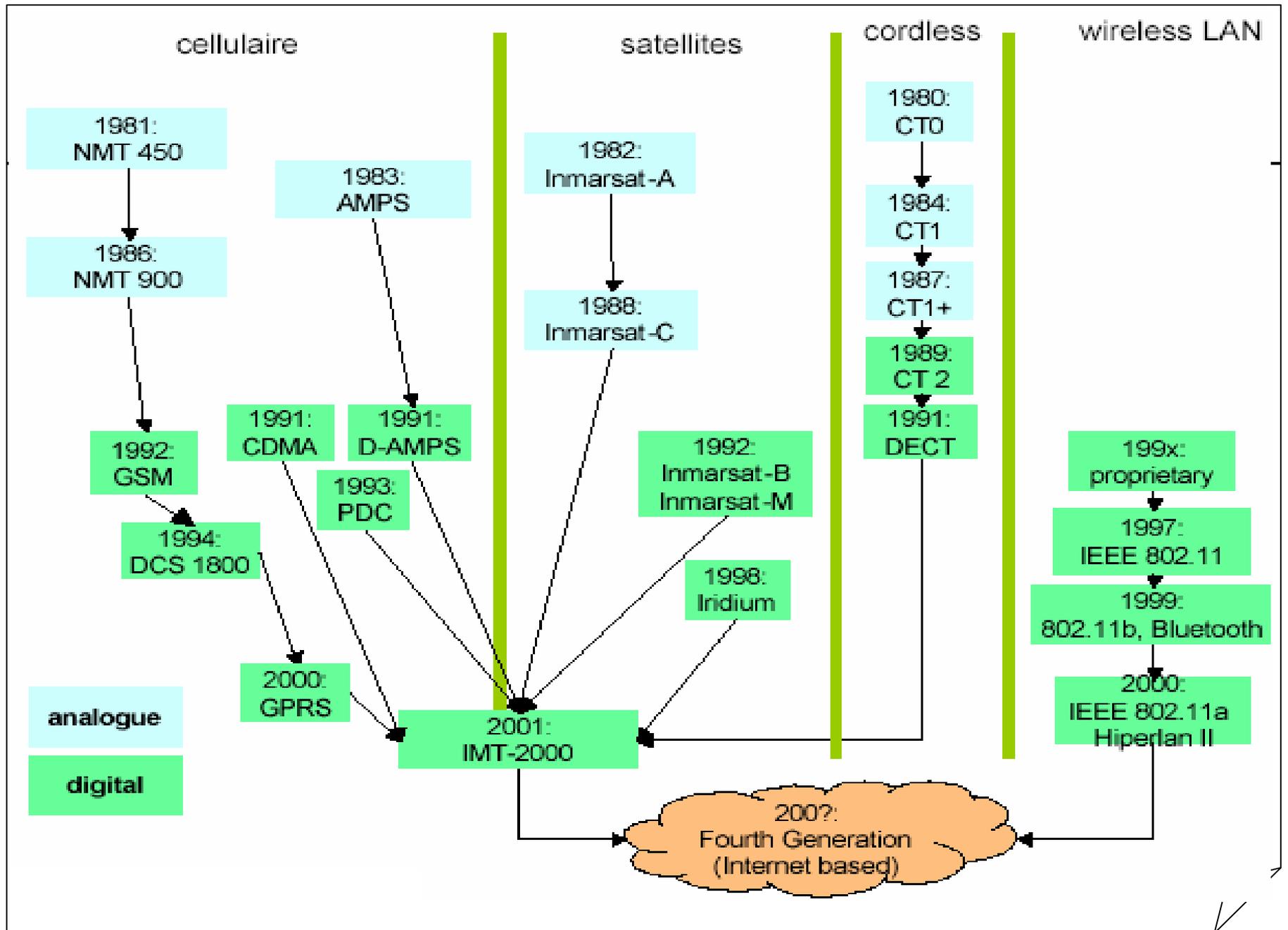
- 1948 : Invention du transistor, théorie de Shannon
- 1950 : nombreuses communications mobiles professionnelles
- 1958 : 1^{er} réseau cellulaire public (Allemagne)
- 1962 : 1^{er} satellite TV (Telsar I)
- 1962 : 1^{er} satellite géostationnaire (Intelsat I)
- 1964 : Transmission de données sur RTC
- 1969 : Internet
- 1970 : Bell / 1G

Historique

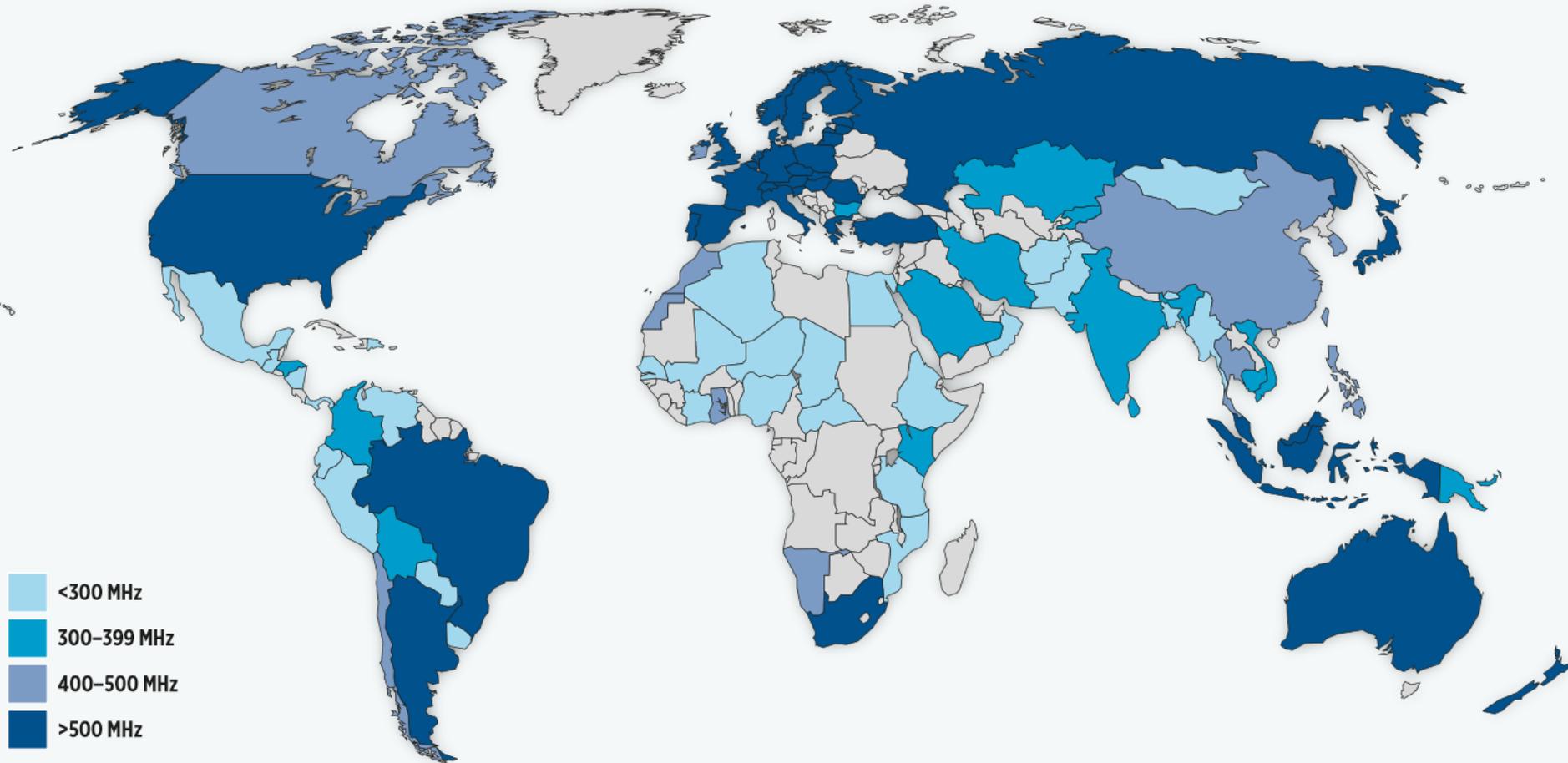
- 1970 : début des systèmes cellulaires analogiques
- 1980 : début des systèmes sans cordon
- 1983 : Études GSM (numérique)
- 1985 : Études DECT
- 1988 : Débuts GSM / Études CDMA
- 1990 : IEEE 802.11 Wireless LAN
- 1990 : Messagerie unilatérale (étape)
- 1991 : Déploiement GSM
- 1993 : DEC 1800, début IS-95 (CDMA)

Développement du sans-fil

- ❖ La déréglementation a joué un rôle important...
- ❖ Progrès en électronique :
 - miniaturisation des équipements
 - augmentation de l'autonomie (batteries)
 - réduction du prix des équipements
- ❖ Moyen le plus rapide et le moins coûteux pour couvrir un territoire sans "re-câbler"
- ❖ Intérêt de la mobilité
 - ne pas confondre sans-fil et mobile



Spectre attribué aux services mobiles



Source : La GSMAi, l'UIT et les régulateurs de sites Web (spectre total calculé en incluant le spectre FDD et TDD de liaison descendante et ascendante)

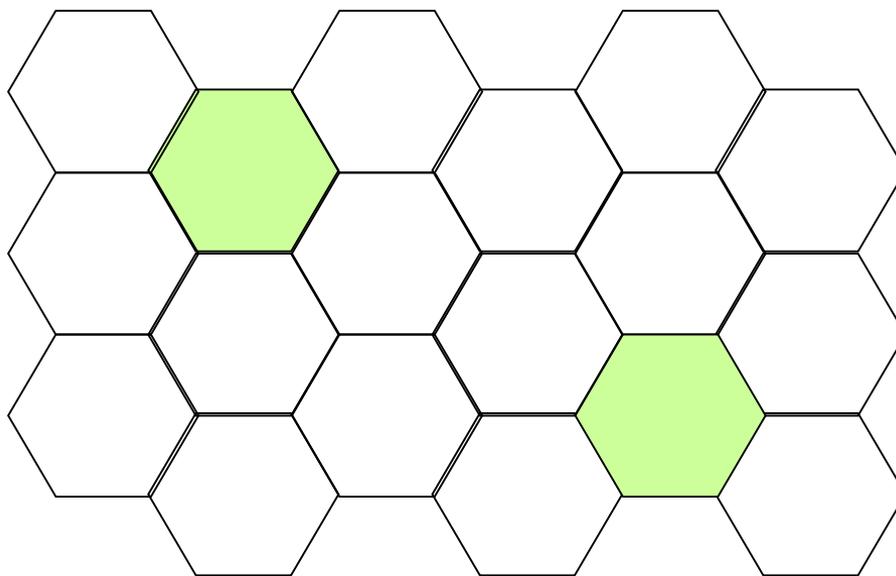
Principes fondamentaux

Organisation cellulaire

- **Cellule de communication = BSS** : Basic Set Service
de taille variable :
 - liée à l'environnement
 - liée à la puissance du mobile, car le point d'accès (fixe) dispose à priori d'une source d'énergie suffisante
- **ESS** : Extended Set Service :
plusieurs BSS \Leftrightarrow plusieurs AP (Access Point)

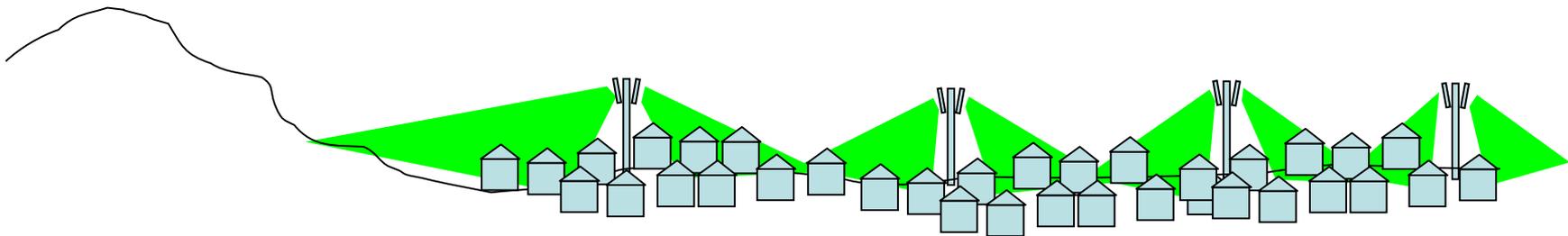
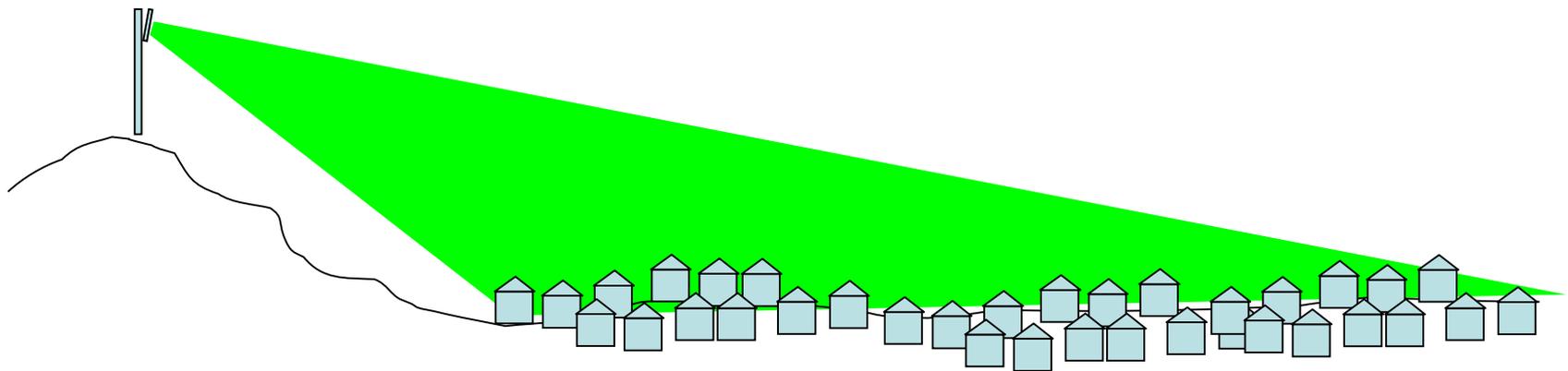
Organisation cellulaire

- Réutilisation de la même fréquence sur des zones géographiques différentes



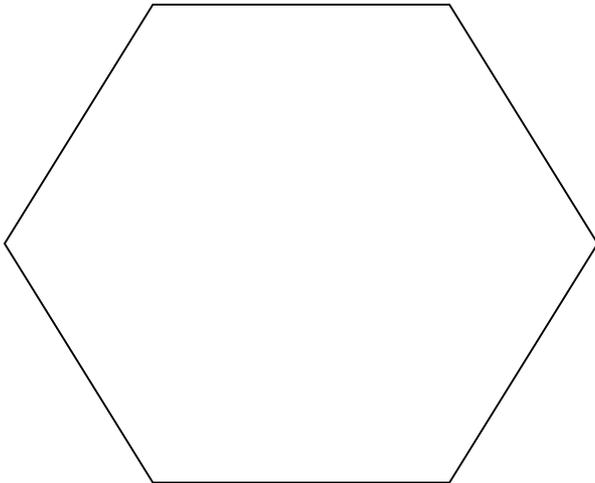
- **Avantage** : augmentation de la capacité
- **Inconvénient** : augmentation des interférences

Implantation des antennes



Exemple : couverture d'une zone

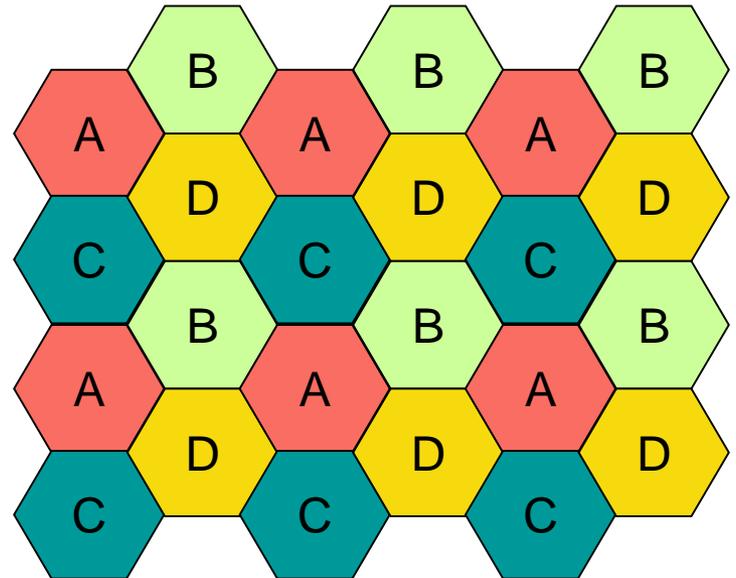
1 cellule



Ex: Bande passante de 100 MHz
200 KHz nécessaire par canal

100MHz pour la cellule
 $100M / 200K = \underline{\underline{500 \text{ canaux}}}$

Organisation
en 6 clusters de 4 cellules



$100MHz / 4 \text{ cellules} = 25 \text{ MHz par cellule}$
 $25M / 200K = 125 \text{ canaux par cellule}$
 $125 \text{ canaux} * 24 \text{ cellules} = \underline{\underline{3000 \text{ canaux}}}$

Gain = nombre de clusters

Organisation cellulaire

- **Nombre d'utilisateurs :**

$$n = \frac{W}{B} \times \frac{m}{N}$$

avec :

- W = largeur de la bande passante
- B = bande passante nécessaire par utilisateur
- N = facteur de réutilisation spectrale
= nombre de cellules par cluster
- m = nombre total de cellules

Notion de qualité de service, prise en compte de la complexité, taille des terminaux, etc.

Organisation cellulaire

- **Plusieurs types de cellules :**
 - Femtocellules (qq mètres)
 - Picocellules (qq dizaines de mètres)
 - Microcellules (zone urbaine, antennes basses)
 - Macrocellules (zone urbaine, antennes hautes)
 - Megacellules Satellites (centaines de kms)
- Raisons : taille de la zone à couvrir, nombre d'utilisateurs, bâtiments, etc.

Organisation cellulaire

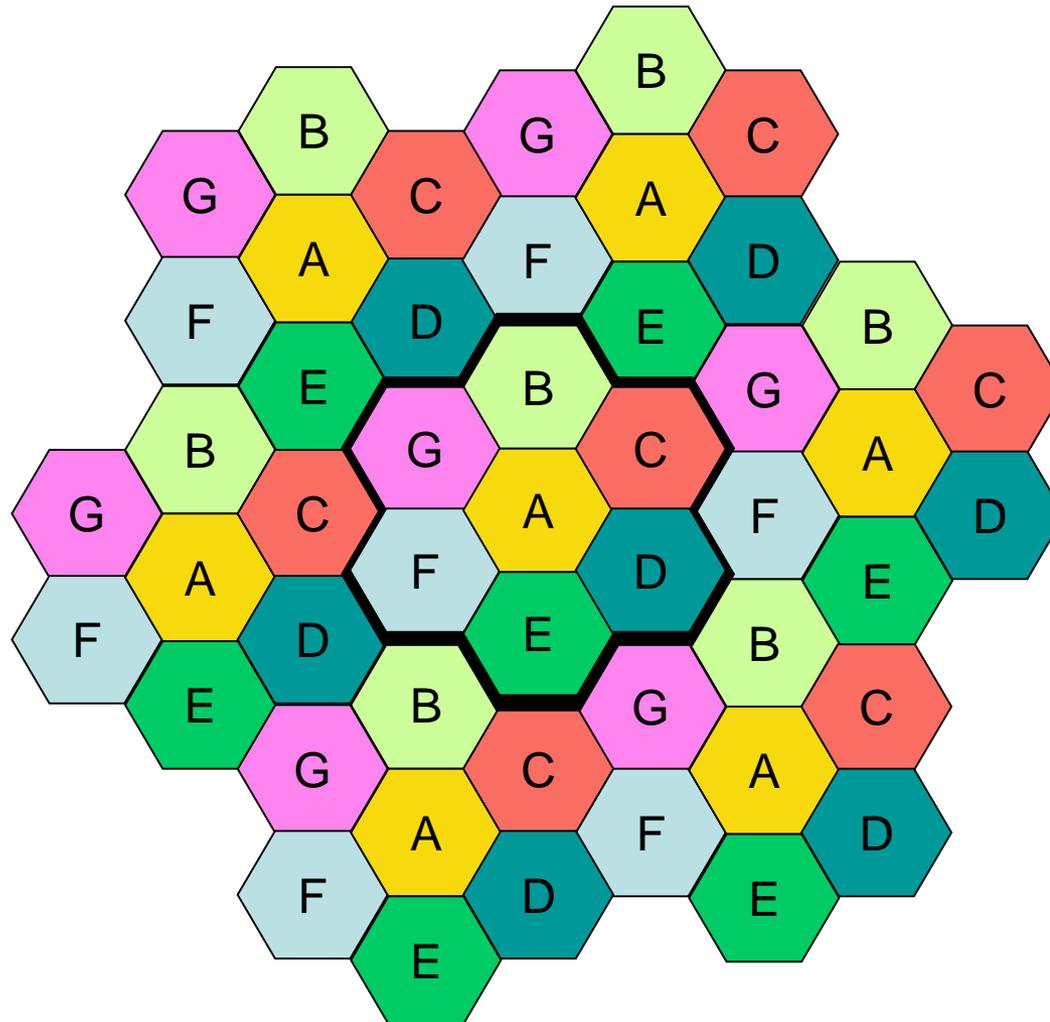
- Facteur de réutilisation

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N}$$

avec :

- D = distance entre cellules
- R = rayon de la cellule
- N = taille du cluster

Exemple en zone urbaine, N=7



Organisation cellulaire

- Rapport signal sur interférences

$$SIR = \frac{P_{utile}}{\sum_i P_{interference,i}}$$

- Pour deux stations de bases BS_1 et BS_2 , avec un terminal à une distance d_1 et d_2 des BS émettant avec une puissance P_e

$$SIR = \frac{KP_e d_1^{-\alpha}}{KP_e d_2^{-\alpha}} = \frac{d_2^\alpha}{d_1^\alpha}$$

- Fréquences / cellules = Maximiser SIR

Organisation cellulaire

- Rapport signal sur interférences

$$SIR = \frac{d_0^{-\alpha}}{\sum_i d_i^{-\alpha}}$$

$$SIR \approx \frac{R^{-4}}{6D_L^{-4}} = \frac{1}{6} \left(\frac{D_L}{R} \right)^4 = \frac{3}{2} N^2$$

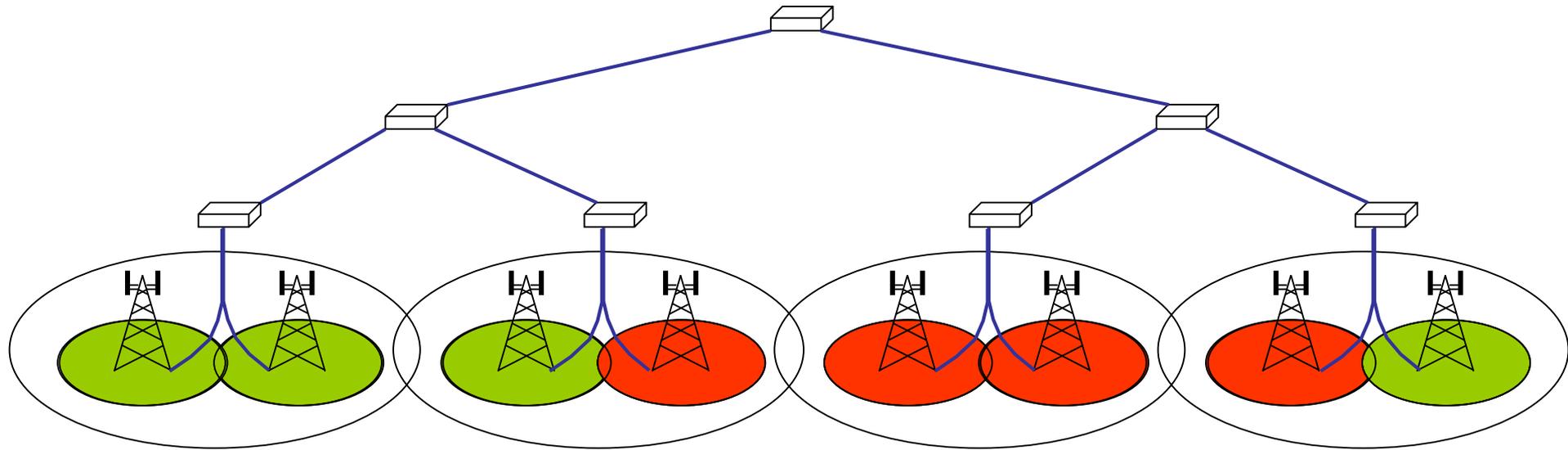
- en dB, $SIR = -7,78 + 40 \log(D_L/R) = 1,76 + 20 \log N$

N	3	4	7	12	13	19
SIR en dB	11,3	13,8	18,6	23,3	24,0	27,34

Mécanisme de "Handover"

- Procédé issu du téléphone cellulaire GSM
- Permet au mobile de continuer un transfert commencé dans une cellule, dans une autre
 - Intercellulaire : passage d'une cellule à une autre (AP<->AP)
 - Si le signal est trop faible (en général)
 - Si un point d'accès sature (partage de trafic)
 - Intracellulaire :
Changement de canal (si signal fort) avec qualité faible
 - Inter-réseau
Très important pour les systèmes 3G
- On parle de *Handoff* dans les systèmes US

Mécanisme de "Handover"



En veille



En communication
Mécanisme de Handover



En veille

Mécanisme de "Handover"

- Objectif :
 - assurer la continuité des communications tout en assurant une certaine qualité de service.
- Raisons :
 - optimiser l'utilisation des ressources
 - équilibrer le trafic entre cellules
- influe sur les aspects couches basses (physique et liaison)
- influe sur les aspects réseau (commutation de liens)

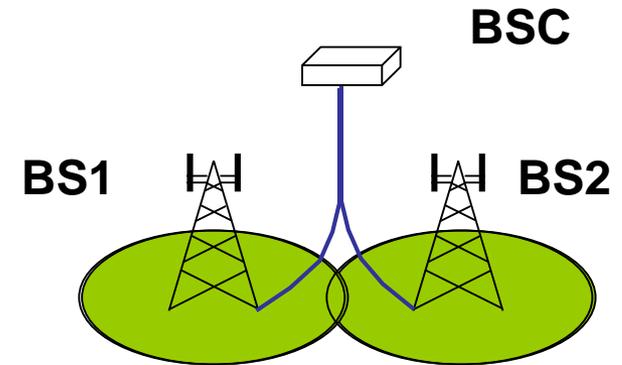
Mécanisme de "Handover"

- Exemple GSM intra BSC

- la qualité du lien est mesuré périodiquement
- en cas de problème, la BS envoie une alarme vers le BSC
- le BSC cherche une nouvelle cellule ou un nouveau canal
- le BSC déclenche ensuite le handover si c'est possible (l'ancien canal est alors libéré), sinon la communication continue

BSC : Base station controller

BS : Base Station



Mécanisme de "Handover"

- le handover est tenté de plus en plus souvent :
 - réduction de la taille des cellules dans les systèmes 2G (numériques)
(de plus en plus pour le milieu urbain = forte densité de population)
 - optimisation du trafic
- Contraintes :
 - obtenir des mesures précises de qualité
 - faire le bon choix pour le changement de cellule
 - réaliser rapidement le handover

Mécanisme de "Handover" : 3 phases

1. Mesures de qualité et de supervision du lien actif
 - puissance du signal reçu (RSSI : Received Signal Level Indicator).
 - le taux d'erreur binaire (BER : Bit Error Rate).
 - ratio C/I (Carrier/Interference)
 - distance entre le mobile et la station de base.

Ex: GSM entre 3 et 10 mesures toutes les 0,5s

Mécanisme de "Handover"

2. Choix de la cellule cible

le mobile gère une liste de candidates (5 maxi en GSM) si il reçoit un signal suffisant pour le canal pilote

- puissance relative des signaux ($P_2 > P_1$)
- puissance relative des signaux avec seuil ($P_1 < \text{seuil}$ et $P_2 > P_1$)
- puissance relative des signaux avec hystérésis ($P_2 > P_1 + \text{seuil}$)
- puissance relative des signaux avec seuil et hystérésis ($P_1 < \text{seuil}_1$ et $P_2 > P_1 + \text{seuil}_2$)

Mécanisme de "Handover"

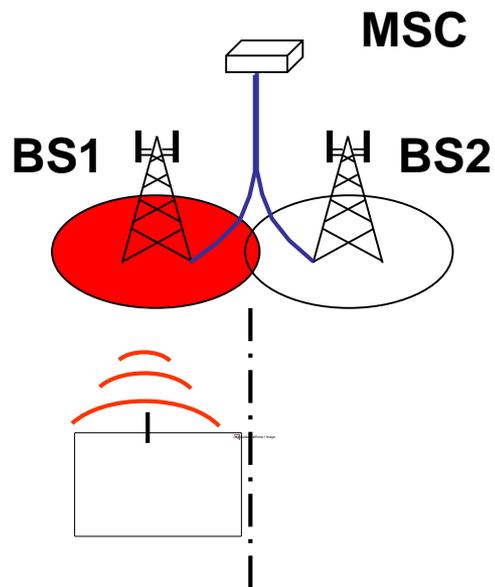
3. Exécution du Handover

- un nouveau canal est attribué
 - la connexion est transférée
 - l'ancien canal est libéré
-
- Différents types de Handover :
 - handover doux (soft-handover)
 - handover dur (hard-handover)
 - handover souple (smooth-handover)
 - ...

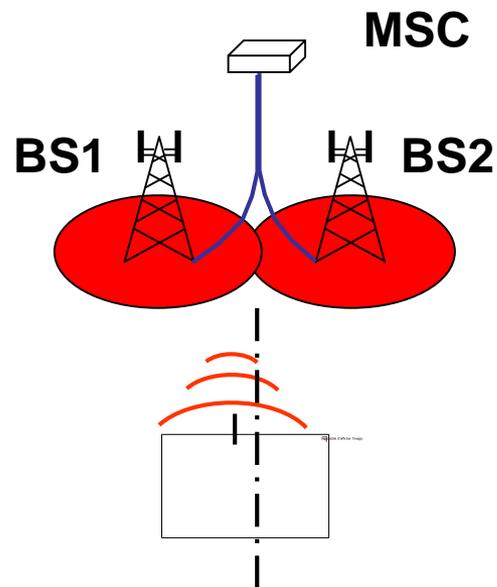
Mécanisme de "Handover"

- Handover doux (soft-handover)

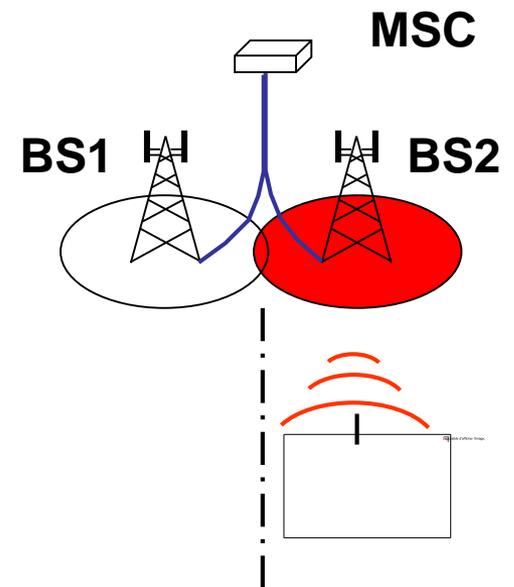
Avant



Pendant



Après

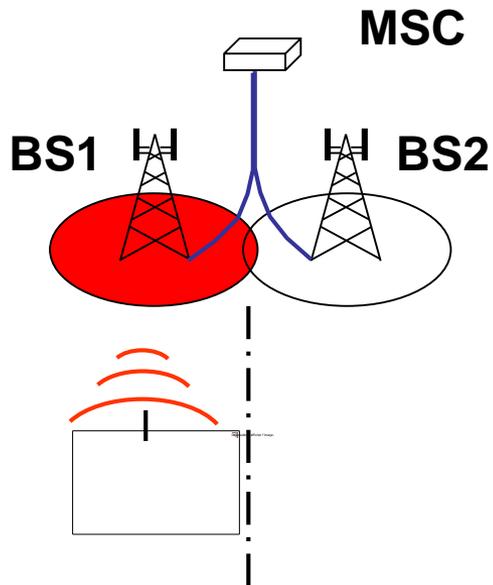


- Plus de consommation de ressources
- + Meilleur confort lors de passage d'une cellule à l'autre

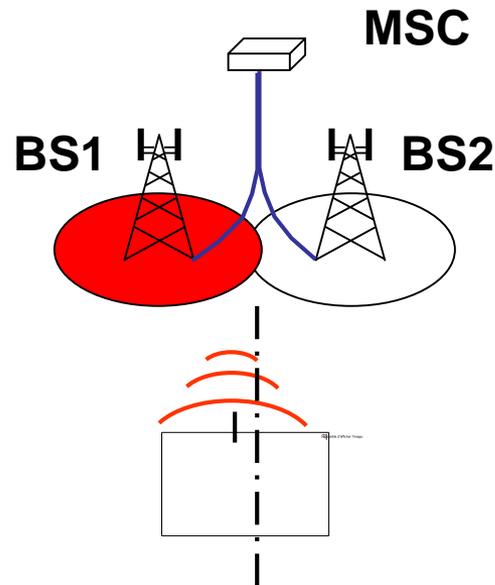
Mécanisme de "Handover"

- Handover dur (hard-handover)

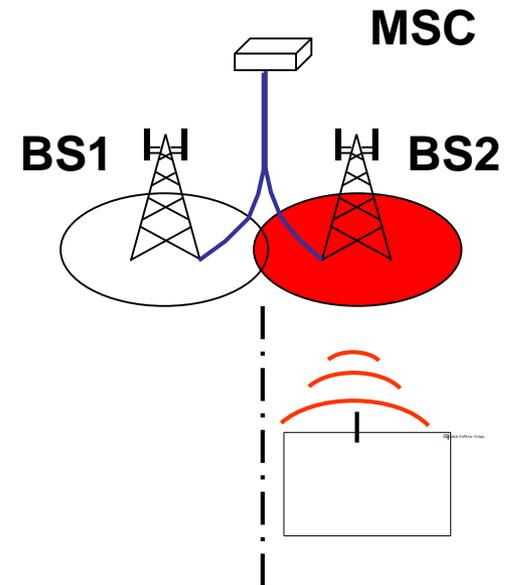
Avant



Pendant



Après



- Coupure de communication la + réduite possible en établissant le lien à l'avance
- + Pas de sur-consommation des ressources

Mécanisme de "Handover"

- **Handover souple** (smooth-handover)

Pour les réseaux TCP/IP, le transport se fait par paquets indépendants : plus le nombre de paquets perdus est réduit, plus le handover est "souple"

- **Handover analogique**

Aux États-unis, les systèmes de 1^{ère} génération cohabitent avec les systèmes numériques :

- si les 2 systèmes et le terminal le permettent
handover analogique pour assurer la continuité de la communication

Mécanisme de "Sélection / Re-sélection"

- Pour un mobile **en veille**, on parle de **sélection** de la station de base.
- Un mobile :
 - écoute les messages diffusés par les BS à tous les mobiles
 - est prêt à se connecter au réseau en cas d'appel
 - signale sa position régulièrement
- La mise sous tension d'un mobile implique une sélection de BS.
- Le déplacement induit une **re-sélection** régulière.
- La gestion de la localisation = roaming
- Recherche de mobile = paging dans la dernière cellule ou dans tout le réseau (inondation)

Accès au réseau

- Le nombre d'utilisateurs est très supérieur au nombre de canaux disponibles
- Protocoles de réservation = problématique particulière
 - avec un contrôle centralisé → non
 - avec un contrôle distribué → non
 - à accès aléatoire (type CSMA)
 - autre...

Accès au réseau

- **CSMA** (Carrier Sense Multiple Access) a pour origine un système de communications par radio entre des machines sur les îles Hawaï (ALOHA - années 1970)
Principe **ALOHA** : une station qui veut émettre... émet, si aucun accusé de réception, attente aléatoire et ré-émission.
- Très faible performance pour un fort trafic.
- Xerox, Intel & DEC : standard de fait pour un réseau Ethernet à 10 Mbit/s.
- Norme IEEE 802.3 - CSMA -CD

Accès au réseau

- **CSMA-CD** with Collision Detection
dit CSMA 1-persistent
 - écoute du canal avant émission → réduction des collisions
 - si canal occupé, attente en écoutant
 - dès que le canal se libère émission
 - en cas de collision, attente aléatoire
 - performances supérieures

Accès au réseau

- **CSMA non-persistent**
 - si canal occupé, attente d'une durée aléatoire
 - à faible charge, beaucoup de bande passante gaspillée
- **CSMA p-persistent**
 - slot = temps maximal de propagation
 - si canal libre, émission avec probabilité p et attente du prochain slot avec probabilité $1-p$
 - si canal occupé, attente du prochain slot
 - efficacité liée à l'optimisation de p

GSM

Historique GSM

- 1979 - Accord : 900 MHz pour le mobile
- 1982, Conférence Européenne des Postes et Télécommunications
 - 2 sous-bandes de 25 MHz
 - 890-915 MHz Mobile -> Réseau
 - 935-960 MHz Réseau -> Mobile
- GSM = Groupe Spécial Mobile - 13 pays Européens
France / Allemagne (tout numérique)
- 1987, transmission numérique avec multiplexage temporel à bande moyenne
- En France : France Télécom et SFR / Alcatel et Matra
- Débuts en 1991, ouverture commerciale en 1992

Norme GSM

- ETSI = European Telecommunications Standards Institute \Leftrightarrow ANSI
- Norme adoptée en dehors de l'Europe
 - Concurrence : norme US et norme Japon

Norme GSM : Comités techniques

- SGM 1 - définition des services
- SGM 2 - interface radio
- SGM 3 - réseau fixe
- SGM 4 - services de données
- SGM 5 - Universal Mobile Telecommunication System
- SGM 6 - administration des réseaux
- SGM 7 et 8 - tests pour la station mobile et sous-système radio
- SGM 9 - carte SIM

GSM

- **Réussite** : spécifications complètes!!!
 - architecture
 - services
 - interface radio
 - ...
 - GSM 900 et DCS 1800

Réseau GSM

- Architecture cellulaire : limite la puissance d'émission des mobiles = allonge l'autonomie
- Ondes radio :
 - Mobile vers BS (station de base)
 - BS vers Mobile
- 2 mobiles dans une même cellule ne communiquent pas directement entre eux

Cellule GSM

- Typiquement une cellule hexagonale avec une station de base BS (ou BTS) = tour avec antennes Base Transmitter Station
- GSM 900 MHz, distance mobile-BS = 35 kms max macro-cellule
- DCS 1800 MHz, distance mobile-BS = 2 kms max mini-cellule
 - puissance plus faible
 - atténuation plus importante des hautes fréquences avec la distance

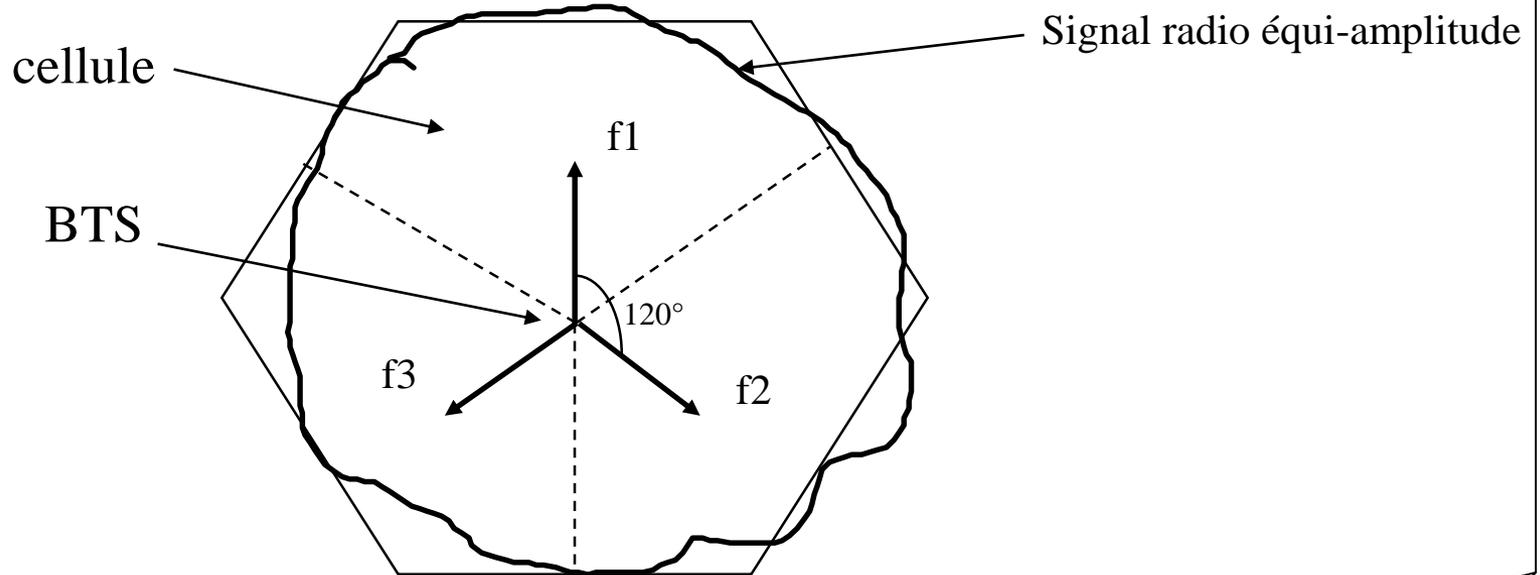
Cellule GSM

- station principale = antenne sur mât, pylône
- "sous-station" en ville principalement (rues encaissées, tunnels, bâtiments, ...)
= antennes peu élevées, boucles radio enterrées ou dans les murs, câbles rayonnants avec des fentes dans l'enveloppe extérieure
 - utilisation de répéteurs

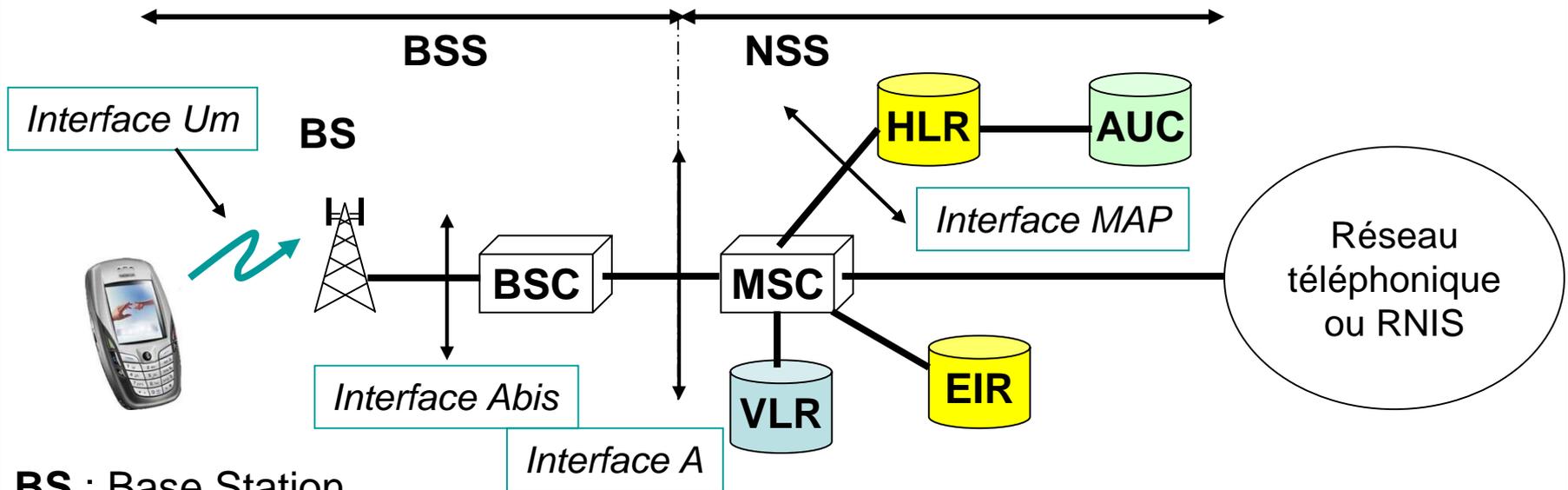
Cellule GSM

Les émetteurs sont généralement constitués de 3 antennes réparties à 120° . La répartition du signal radio équi-amplitude forme en première approximation un hexagone.

(un émetteur muni d'une seule antenne omni-directionnelle a un diagramme sensiblement équivalent).



Structure du réseau



BS : Base Station

BSC : BS Controller (contrôle entre 20 et 30 BS)

BSS : BS System = interface radio (équipement physique de la cellule)

NSS : Network Set Service

MSC : Mobile services Switching Center = commutateurs mobiles

VLR : Visitor Location Register = base d'enregistrement des visiteurs (dynamique)

HLR : Home Location Register = BdD de localisation, caractérisation des abonnés

AUC : Authentication Center = centre d'authentification des abonnés

EIR : Equipment Identity Register = base de données des terminaux

BS : Station de base

- Émetteur / récepteur (TRX)
- Modulation / démodulation, égalisation, codage, correction d'erreur
- Mesures radio (transmises au BSC)
- Un TRX = 1 porteuse = 8 communications max
 - Rural BTS=1 TRX, Urbain BTS=2-4 TRX
 - + redondance (en cas de panne)
- **BTS Standard** (2,5-32 Watt)
 - Locaux techniques
 - Antennes + câble + coupleur + 1-4 TRX
- **Micro-BTS** (0.01-0.08 Watt)
 - Zone urbaine dense
 - Équipement intégré
 - Coût faible

BSC : Contrôleur de stations de base

- Gère les ressources radio
 - allocation de fréquences pour les communications
 - mesures des BTS, contrôle de puissance des mobiles et BTS
 - décision et exécution des handovers
- Rôle de commutateur

Ex: Plusieurs dizaines de BSC à Paris

HLR

Base de données de gestion abonnés

- Mémorise les caractéristiques d'un abonné
 - Numéro d'abonné
 - **IMSI** - *International Mobile Subscriber Identity*
se trouve dans la carte
SIM - *Subscriber Identity Module*
 - Informations de chiffrement
 - Profil d'abonnement
- Mémorise le **VLR** où l'abonné est connecté (même à l'étranger) pour permettre l'acheminement éventuel d'un appel entrant

MSC, VLR et EIR

- **MSC** : Commutateur de services mobiles
 - Communication mobile vers autre MSC
 - Handover si hors BSC
 - Fonction de passerelle avec RTC
- **VLR** : stocke dynamiquement les informations des abonnés liées à leur mobilité
- **EIR** : Equipement Identity Register =
IMEI - *International Identification Equipment Identity* :
numéro unique dans le mobile lors de sa fabrication,
contrôle d'homologation, déclaration de vol, etc.

MSC



OMC

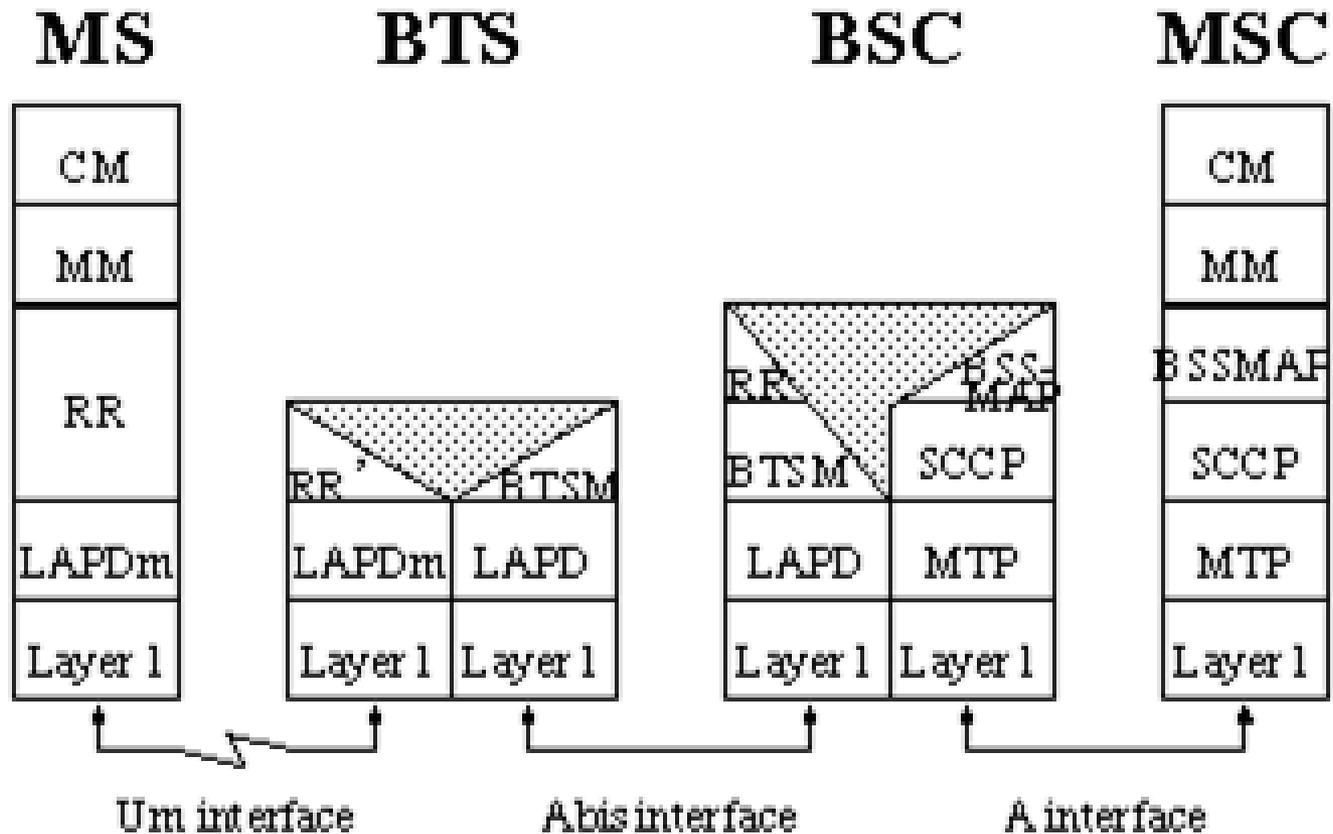
Operation and Maintenance Center

- Poste de surveillance de l'ensemble du réseau. Une partie de l'OMC surveille la partie BSS (BTS et BSC), c'est OMC-Radio (OMC-R), l'autre partie surveille la partie NSS, c'est l'OMC-S (OMC-Commutation (Switch)).
- Chacun d'eux remonte l'ensemble des alarmes majeures ou mineures issues du réseau. L'OMC est l'outil de maintenance (curative). Il permet des interventions à distance (logicielles).

BSS – sous-système radio

- Couche 1 physique
- Couche 2 liaison de données
 - fiabilisation de la transmission (protocole)
- Couche 3 réseau
 - gestion des circuits commutés
 - Radio Ressource (RR)
 - gestion des canaux logiques
 - surveillance des balises
 - Mobility Management (MM)
 - localisation/authentication/allocation identité temporaire
 - Connection Management (CM)
 - Call Control, Short Message Service, Supplementary Services

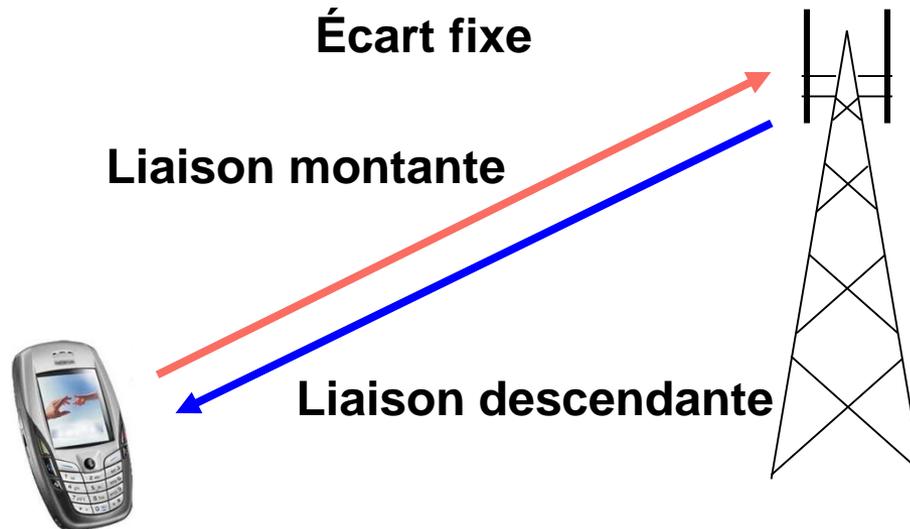
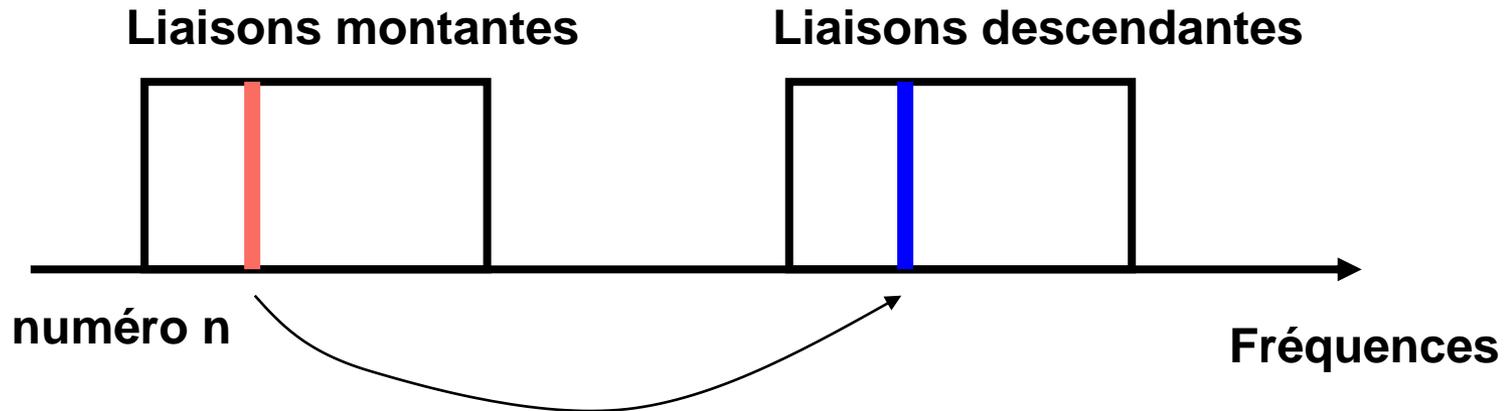
Interfaces et protocoles



Fréquences utilisées

- Bande **EGSM** (GSM étendue) :
 - largeur 35 MHz
 - de 880 à 915 MHz Mobile → Base
 - de 925 à 960 MHz Base → Mobile
 - écart de 45 MHz
 - 174 canaux de 200KHz
- Bande **DCS** :
 - largeur 75 MHz
 - de 1710 à 1785 MHz Mobile → Base
 - de 1805 à 1880 MHz Base → Mobile
 - écart de 95 MHz
 - 374 canaux de 200KHz

Exemple



Fréquences utilisées

- Atténuation en $1/f^2$
Les hautes fréquences se propagent moins loin pour une même puissance
- DCS plutôt réservé aux zones urbaines à forte densité de trafic (nécessite plus de stations de base)

Fréquences utilisées

- Numéro n codé sur 10 bits

Voie descendante :

- pour $1 \leq n \leq 124$ $f=935+(0,2xn)$ GSM
- pour $975 \leq n \leq 1024$ $f=935+(0,2x(n-1024))$ EGSM
- pour $512 \leq n \leq 885$ $f=1805+0,2x(n-512)$ DCS

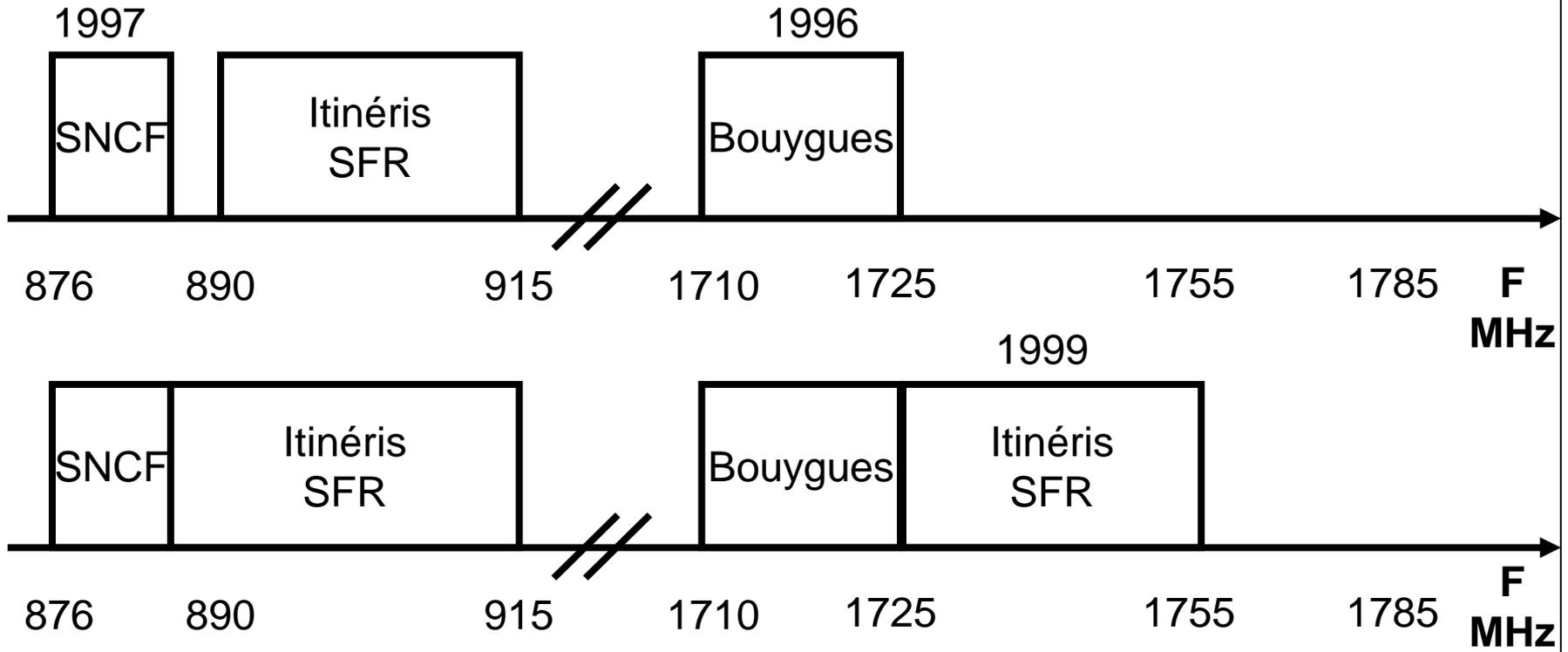
Voie montante :

- calculée avec l'écart duplex fixe

- Réseaux mixtes possibles :
terminaux bi-bandes nécessaires

Fréquences utilisées

- Attribution des fréquences : évolue dans le temps
- Bande montante :



Voie balise et voie trafic

- Chaque station de base émet en permanence des informations sur sa voie balise (BCH = Broadcast Channel)
- Un mobile en veille échange avec sa BS des signaux de contrôle (émission en slot 0 à f, réception en slot 0 à f+écart)
- Le niveau de la voie balise (BCH) est connu pour :
 - à la mise en route, chercher le niveau le + élevé pour se connecter à une BS
 - émettre des infos opérateurs et fréquences des cellules voisines
 - messages affichés sur l'écran du mobile

Voie balise et voie trafic

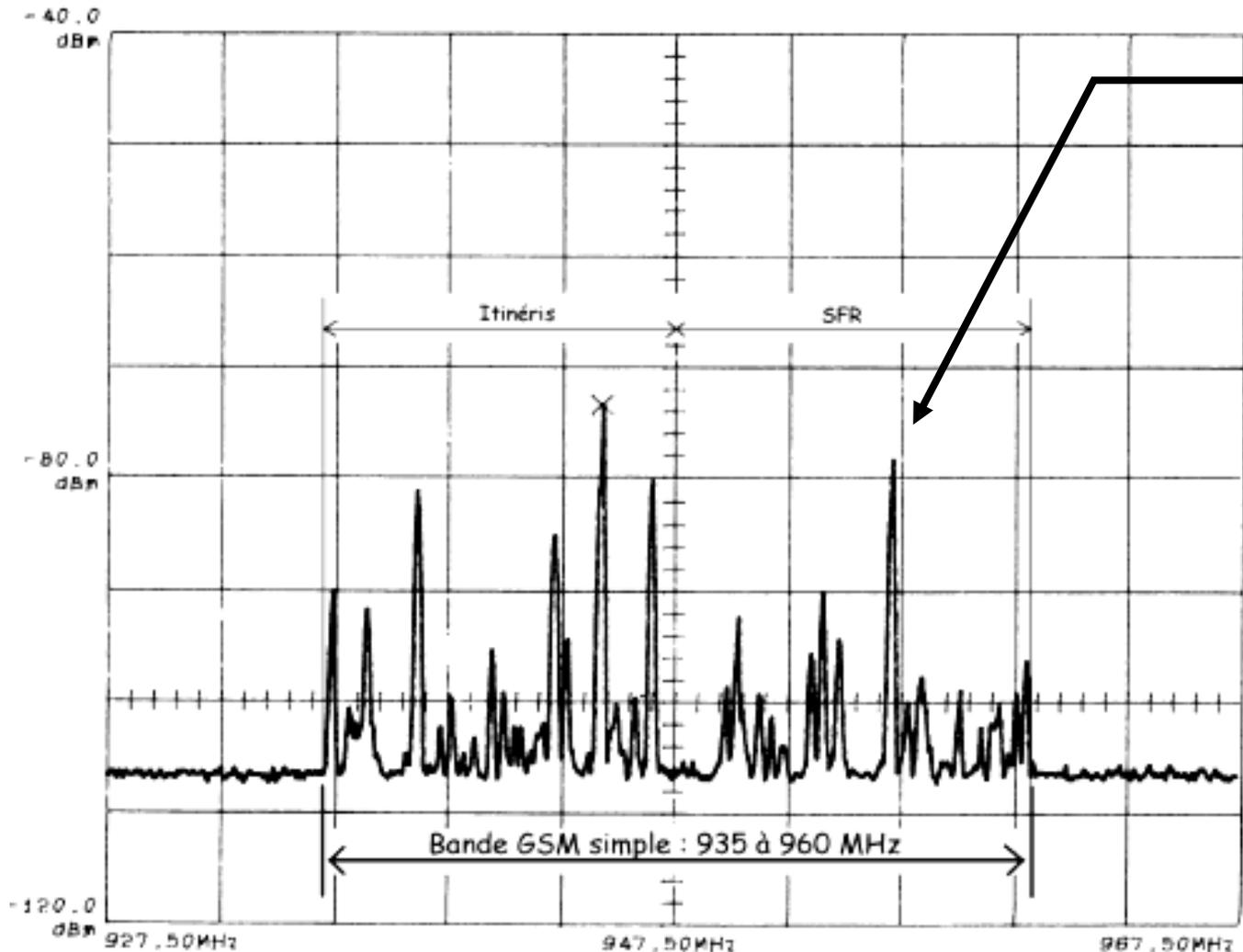
Mobile en veille :

- Un récepteur écoute les BCH des cellules voisines toutes les 5s si le signal reçu est faible, toutes les 15s si le signal est fort
- La liaison montante est utilisée pour des demandes de connexion (RACH)

Mobile en communication :

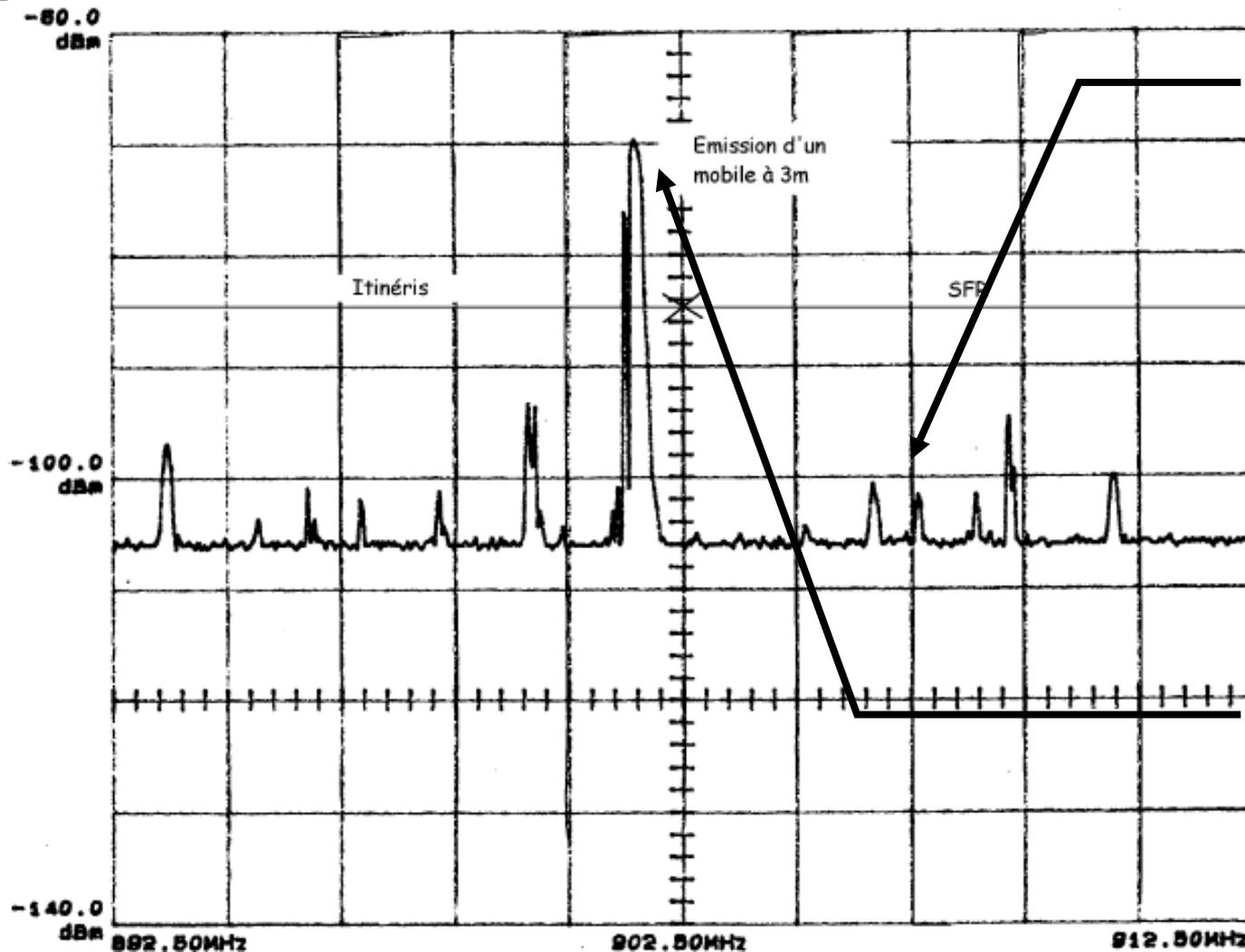
- Échange des signaux de parole et de contrôle sur la voie TCH (émission en slot i à f , réception en slot i à $f + \text{écart}$)
- Écoute des voies balises pour un éventuel changement de cellule

Spectre de la bande GSM descendante



Voie balise
de la cellule
la plus forte
pour un
opérateur

Spectre de la bande GSM montante

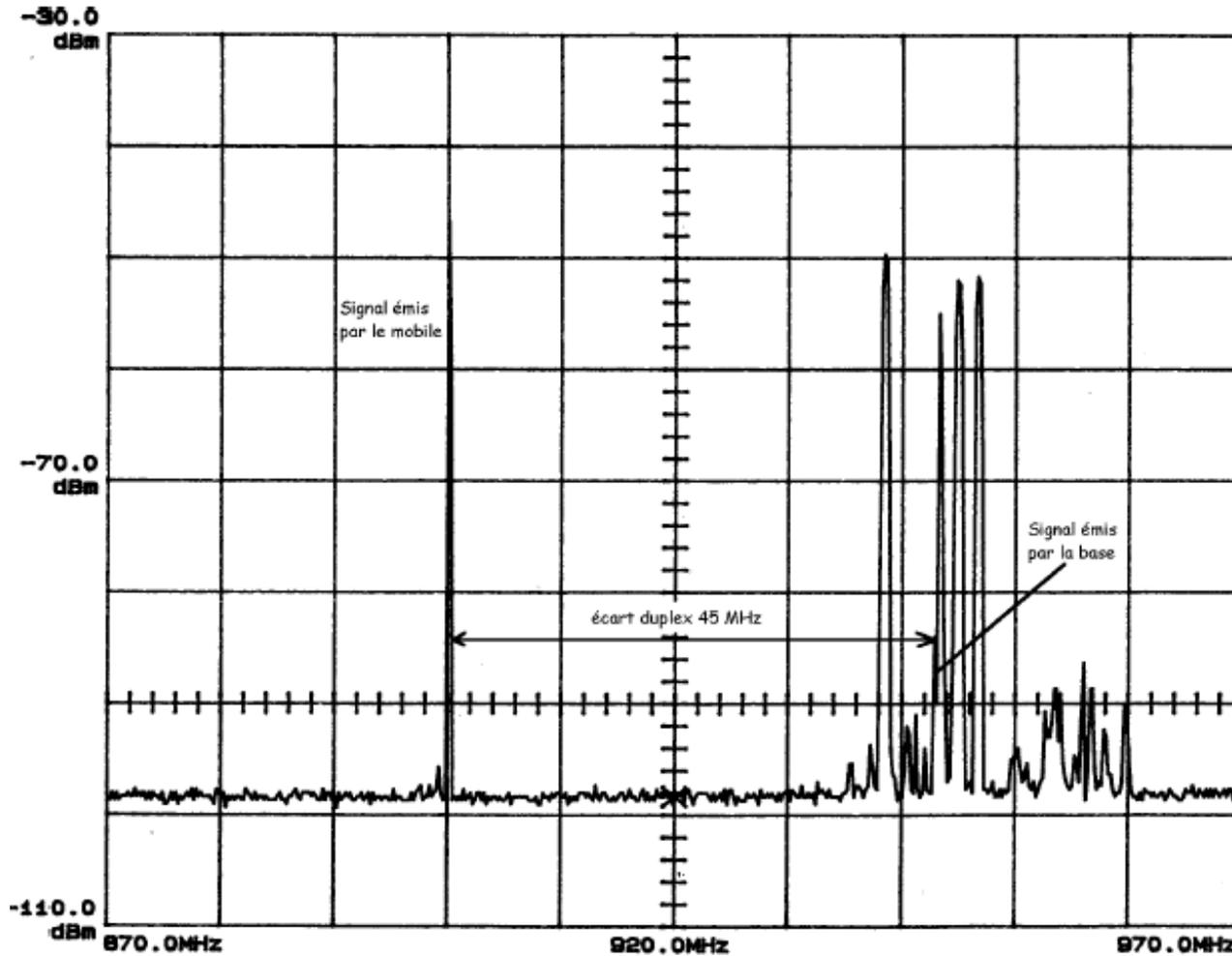


Pics :
correspondent à
l'allumage des
mobiles

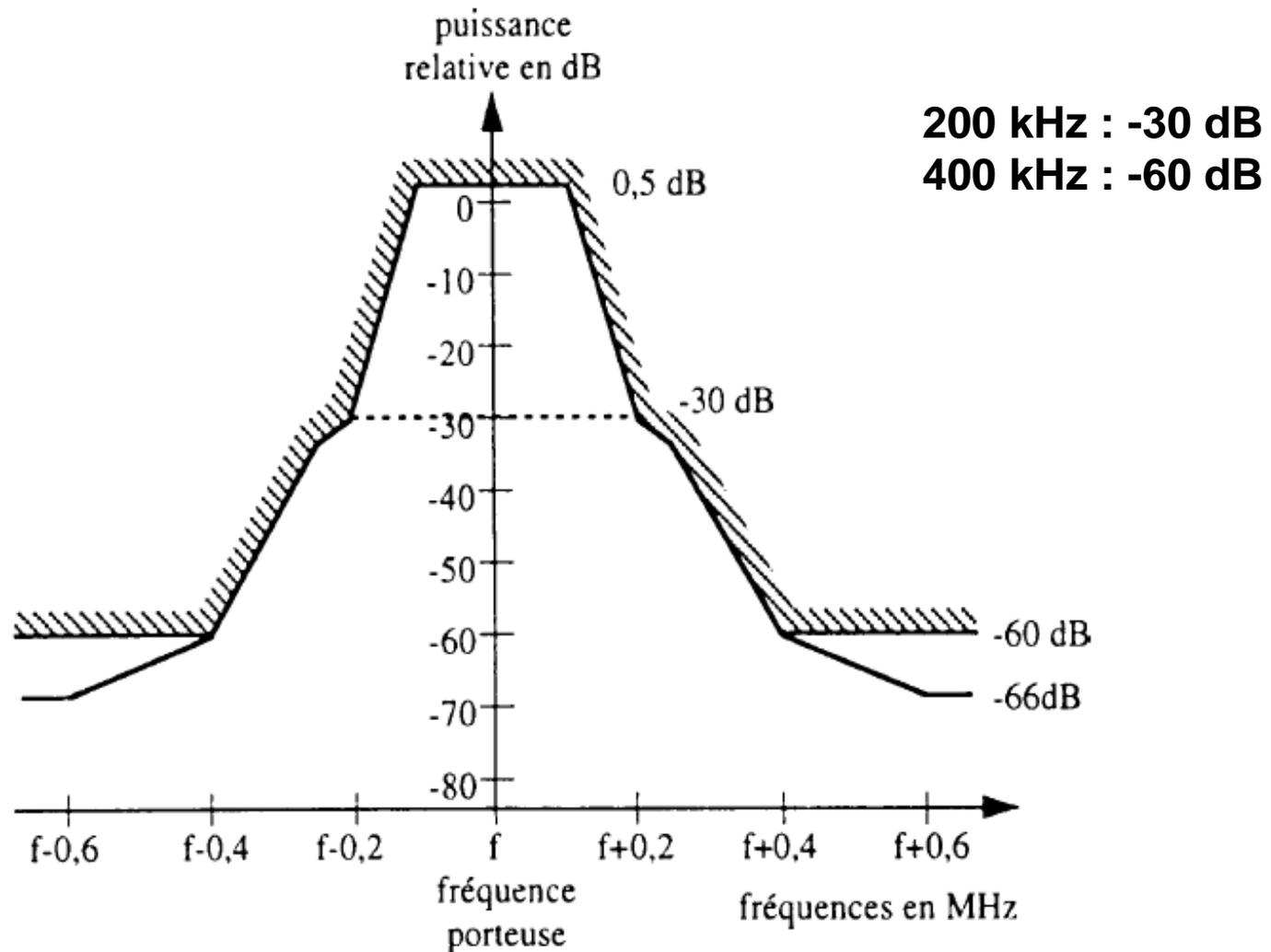
Superposition de
2h
d'enregistrement

Communication
proche de
l'enregistreur

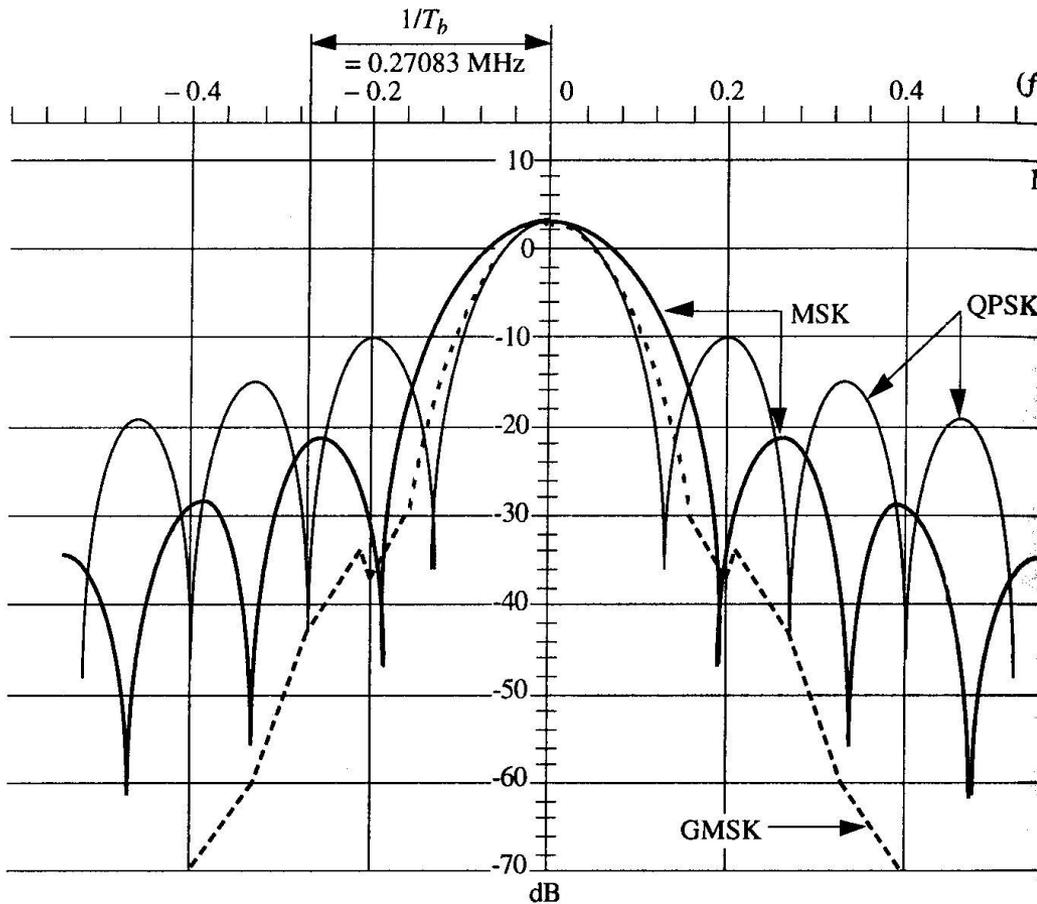
Spectres de la bande montante et descendante pendant une conversation



Encombrement spectral d'un signal GSM



Modulation GMSK



Gaussian Minimum Shift Keying \approx combinaison de modulation de phase et de fréquence.

Largeur de bande: 200 kHz

Débit binaire: 270.833 kbps

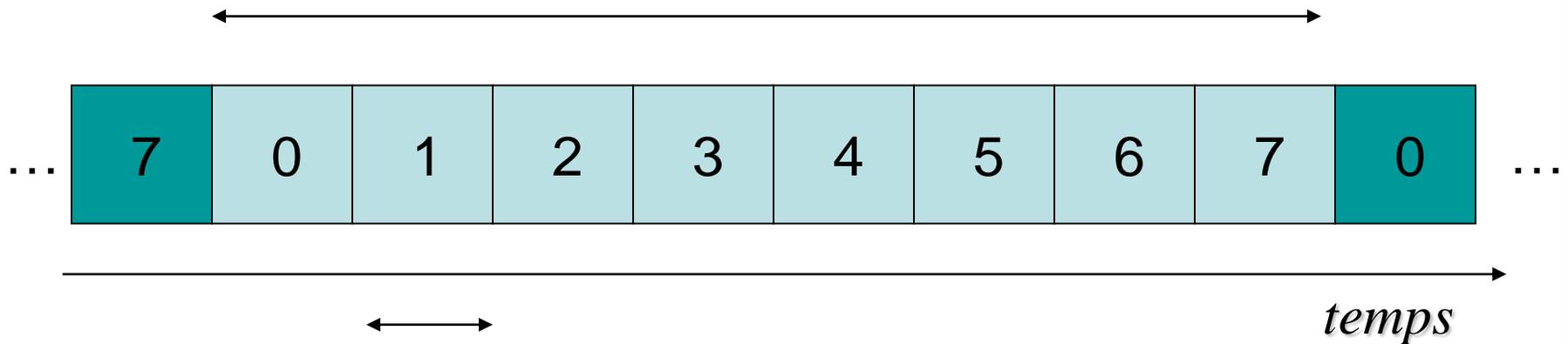
1 bit = $3.7 \mu\text{s}$

Multiplexage temporel : TDMA

8 Time Slots par canal

Indice TN (Time slot Number) de 0 à 7

Durée d'une trame TDMA = 4.62 ms



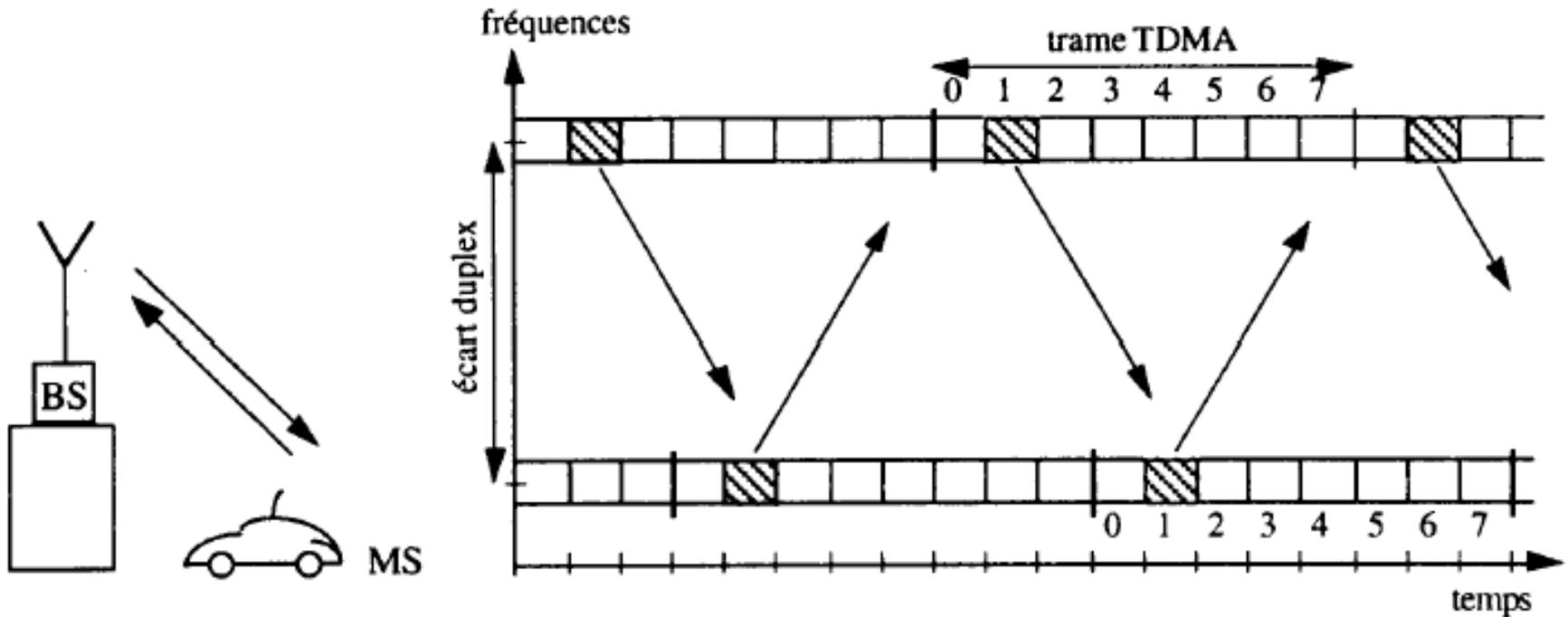
$$7500 \times 1/13 \text{ MHz} = \mathbf{577 \mu s}$$

(7500 périodes de Quartz de mobile)

156.25 bit

270 kbps

Multiplexage temporel : TDMA



- Réception puis émission 3 time-slots après (1,7ms) pour le mobile :
- évite la simultanéité des traitements
 - la synchronisation elle-même est décalée

Codage de la parole

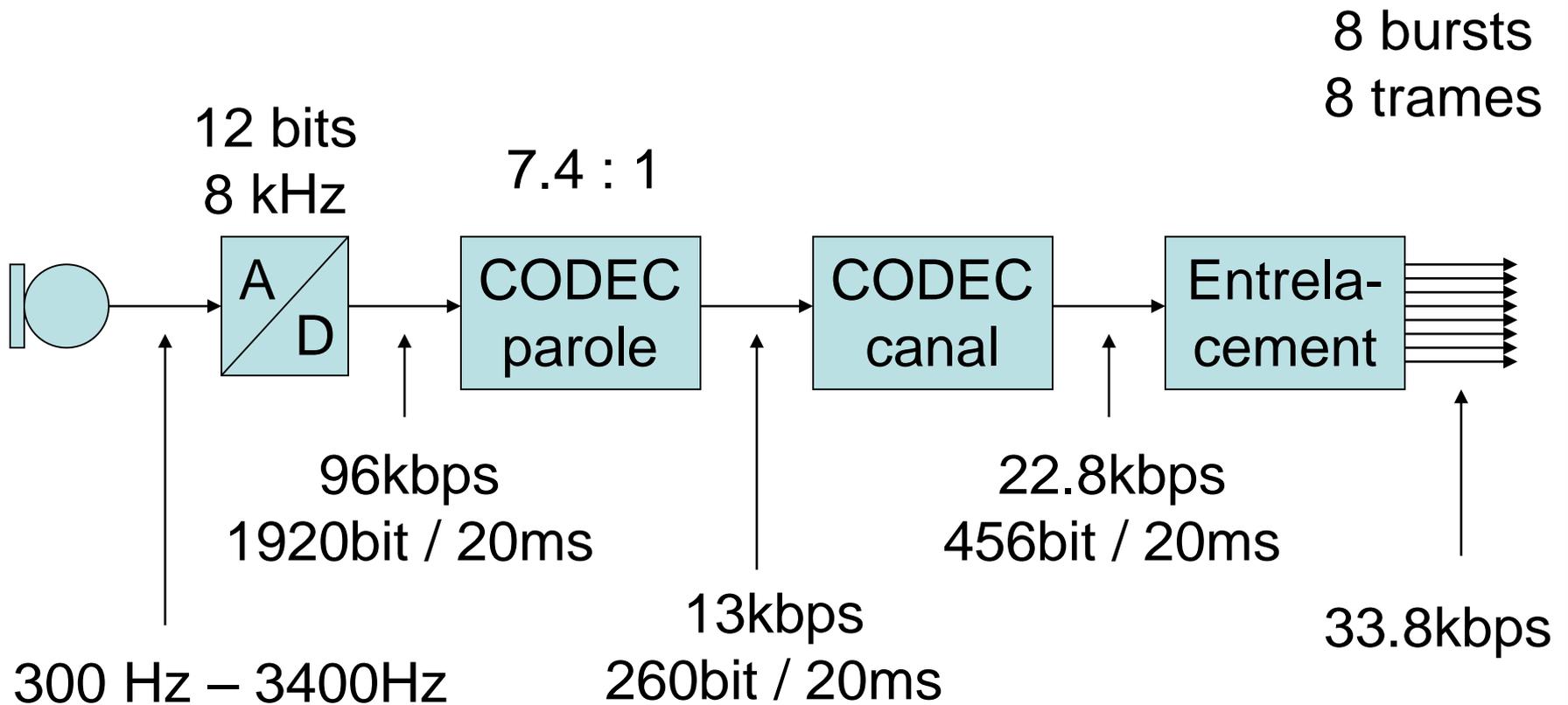
- Le codage consiste à comprimer de façon efficace les données de telle sorte à minimiser le débit requis et donc rentabiliser les ressources mises à disposition.
- Compte tenu du spectre de la voix (300 - 3400 Hz), la numérisation du signal perçu par le microphone nécessiterait un débit de 64 kbit/s.
=> C'est un trop haut débit, donc on utilise un codage spécifique.

Codage de la parole

- Le codeur utilisé dans la norme GSM est un codeur donnant un débit de 13 kbit/s.
 - Principe :

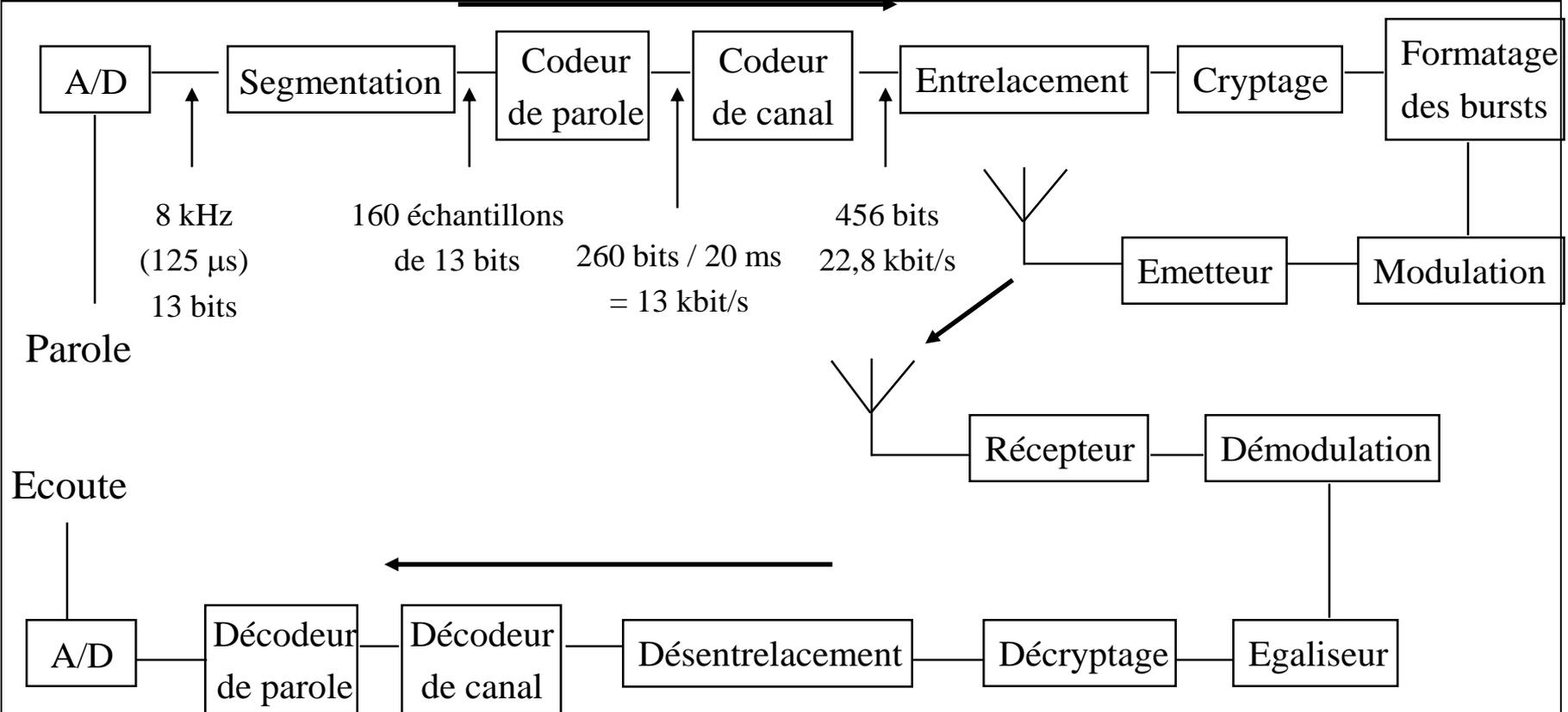
La parole est analysée par tranche de 20 ms et codée sur 260 bits (13 kbit/s).
- Le codage de canal ajoute de la redondance à ce signal afin de lui donner de la robustesse face au canal de propagation radio. On aboutit à un codage sur 456 bits (22,8 kbit/s).

Codage de la parole



A/D : convertisseur Analogique -> Digital

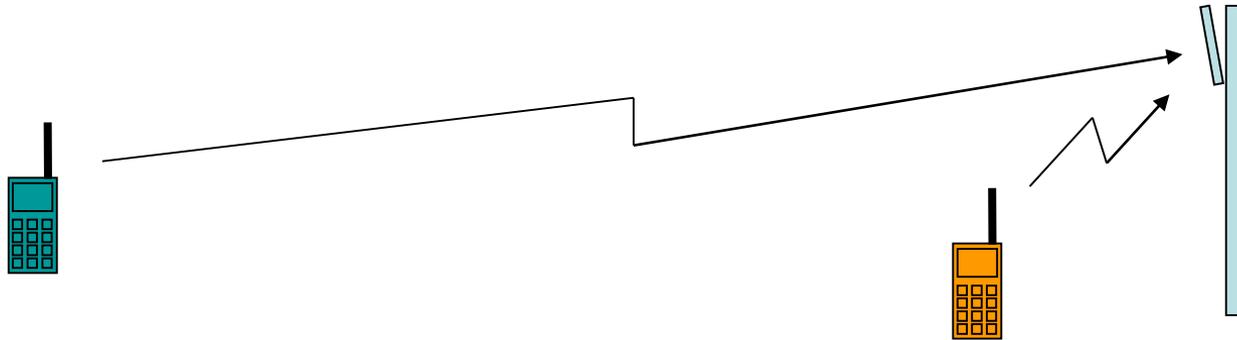
Codage de la parole



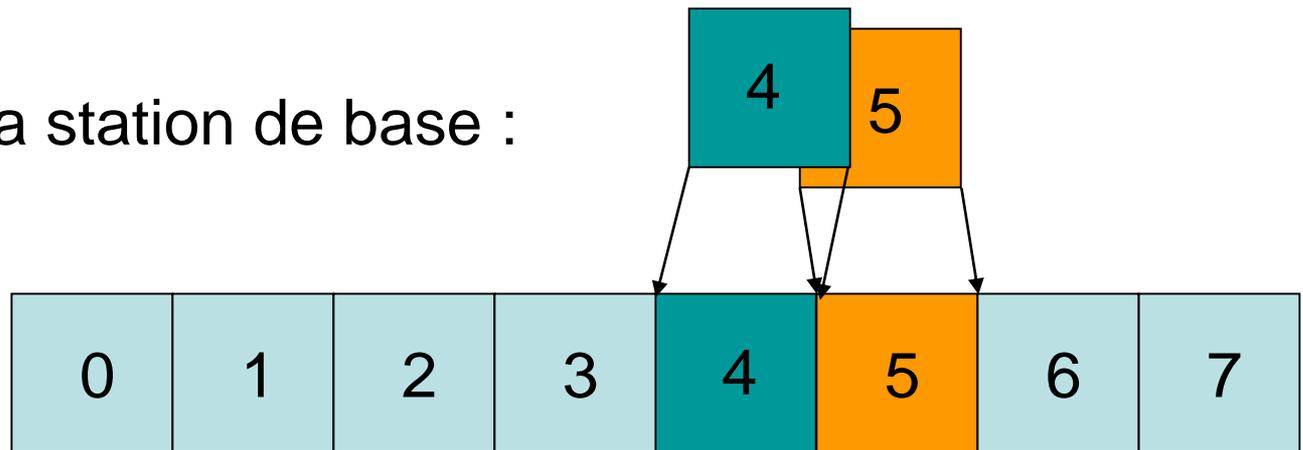
L'entrelacement : Des paquets d'erreurs ont lieu sur un canal radiomobile. Ces paquets sont générés par des évanouissements qui peuvent être de même durée que le burst, il convient de répartir les données sur plusieurs trames consécutives.

Gestion des retards

Retard maxi = $2 \times 35 \text{ km} = 233 \mu\text{s}$ (300 000 km/s)

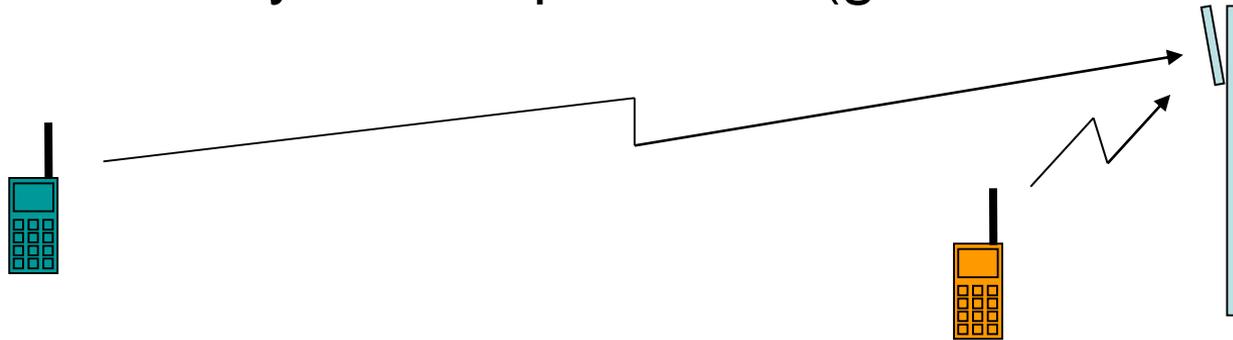


Au niveau de la station de base :

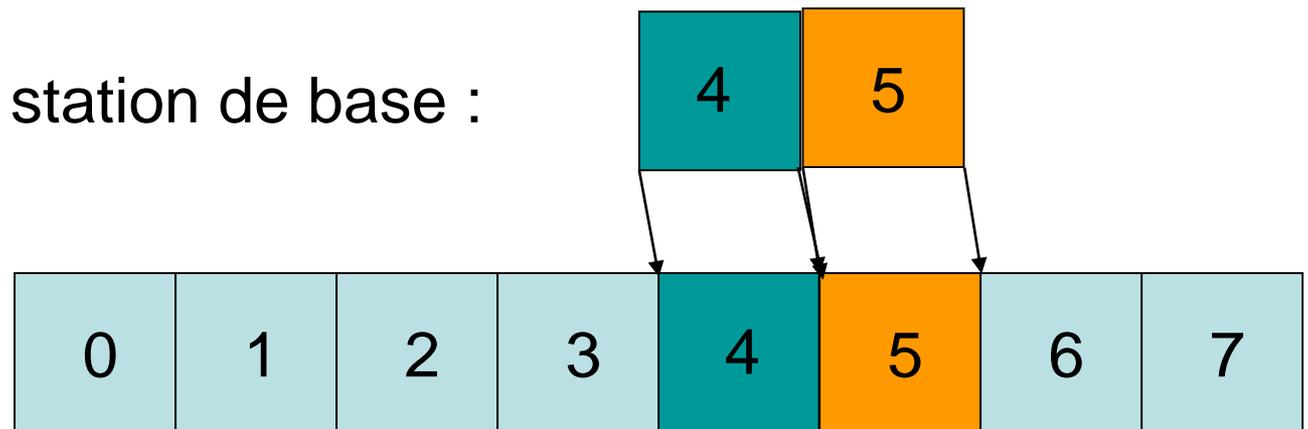


Gestion des retards = Timing Advance (paramètre TA)

Max $2 \times 35 \text{ km} = 233 \mu\text{s} \Rightarrow 64 \text{ valeurs (6 bits)}$
paramètre envoyé à chaque trame (gestion de la mobilité)



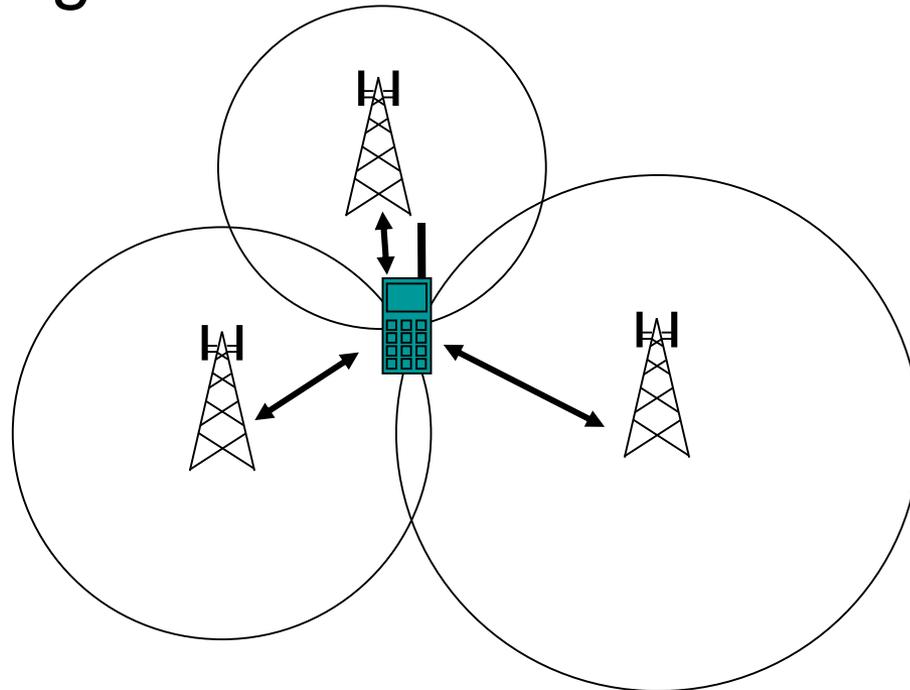
Au niveau de la station de base :



Résolution: $1 \text{ bit} = 3.7 \mu\text{s} = 2 \times 550 \text{ m}$

Positionnement, localisation

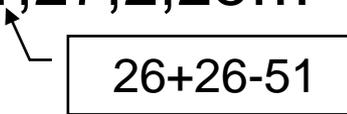
- La connaissance de ce paramètre pour une station de base permet de connaître la distance au mobile
- Avec triangulation = 3 BS => localisation



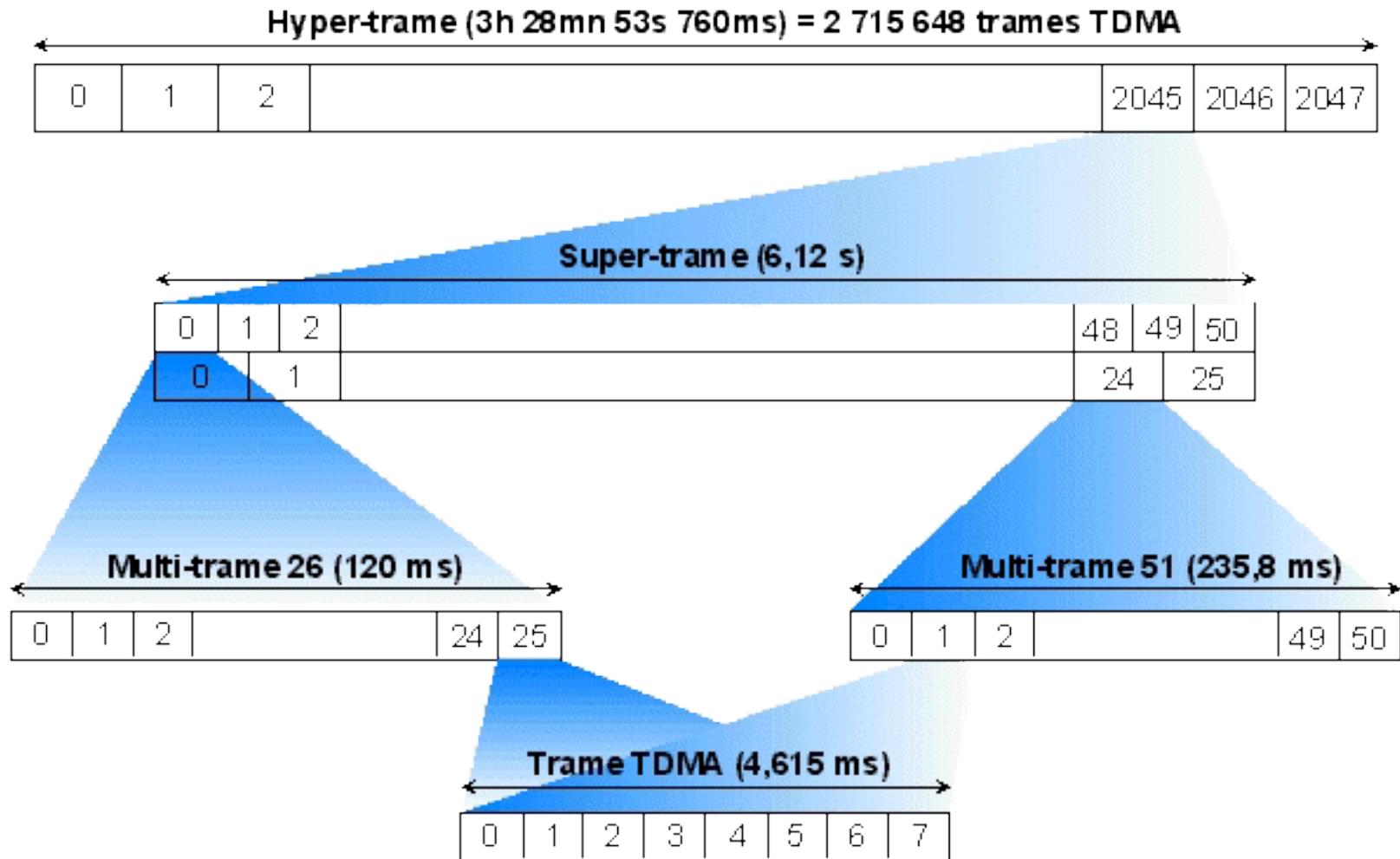
Changement de cellule

- Lors d'une conversation, le mobile écoute les SCH (synchro) des cellules voisines. L'écoute se fait entre l'émission et la réception du *burst* suivant : mesure de niveau (peu de temps)
- Pour décoder les informations, le mobile s'arrête d'émettre et de recevoir toutes les 26 trames (slot *idle*): le mobile écoute et décode la voie balise de l'une des cellules voisines. Quant à la station de base, elle émet les informations toutes les 51 trames.
51 et 26 étant premiers entre eux, toutes les voies balises seront décodées:

Trames décodées : 0,26,1,27,2,28...


$$26+26-51$$

Hyper-frame

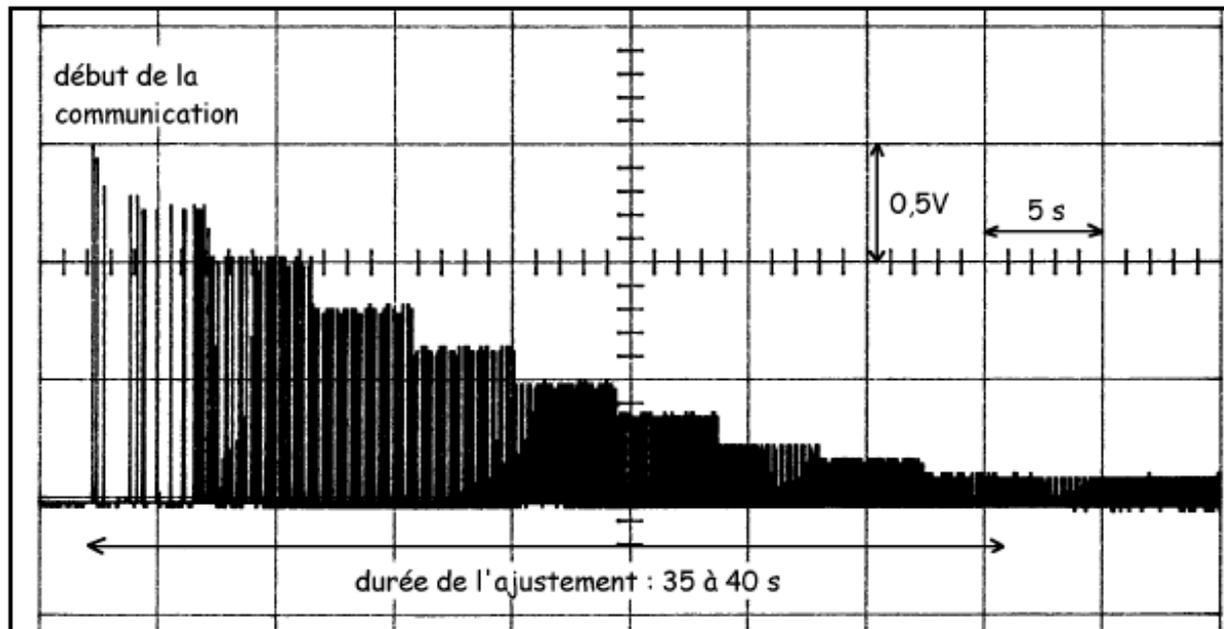


Hyper-frame

- Création d'un code temporel : « Time code »
- Chaque trame TDMA de l'Hyper-trame a un numéro : « Frame Number ».
- Ce compteur va permettre la synchronisation du mobile avec la cellule
- Le "Time code" démarre simultanément pour toutes les fréquences d'une même BTS.
- Le compteur est aussi utilisé pour le chiffrement dans l'algorithme A5.

Contrôle de puissance d'émission

- La station de base contrôle de nombreux paramètres du mobile dont la puissance d'émission :
 - minimisation de $P_{\text{émis}}$ tout en conservant la QoS
 - diminution des interférences
 - augmentation de l'autonomie



Contrôle de puissance d'émission

- Sur demande du réseau, augmentation ou diminution de la puissance d'émission par pas de 2 dBm toutes les 60 ms.
- Remontées de mesures effectuées par le mobile toute 480 ms sur le canal SACCH (soit toutes les 4 multi_trame26 = 104 trames TDMA)

900 MHz

Mesure	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Watts	8	5	3.16	2	1.260	0.794	0.501	0.316	0.199	0.125	0.079	0.050	0.032	0.020	0.012	0.007	0.005	0.003
dBm	39	37	35	33	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5

1800 MHz

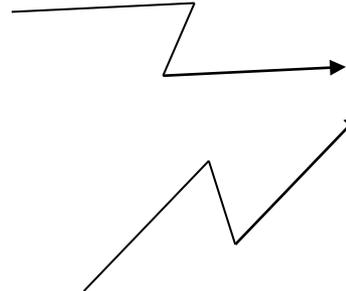
Mesure	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Watts	1	0.631	0.251	0.398	0.158	0.1	0.063	0.04	0.025	0.016	0.01	0.006	0.004	0.0025	0.0015	0.001
dBm	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0

$$\text{Watt} = 10^{(\text{dBm}/10)} * 0.001$$

$$\text{dBm} = 10 * \log(\text{Watt}/0.001)$$

Puissance

900 MHz
 $P_{\max} = 2 \text{ W}$
Gain $\approx 0 \text{ dBi}$



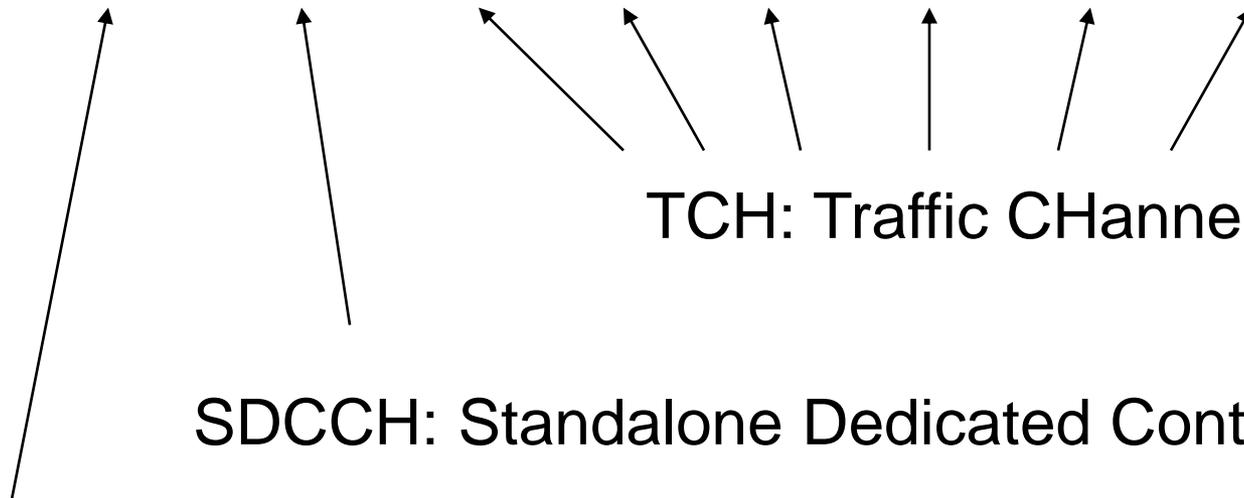
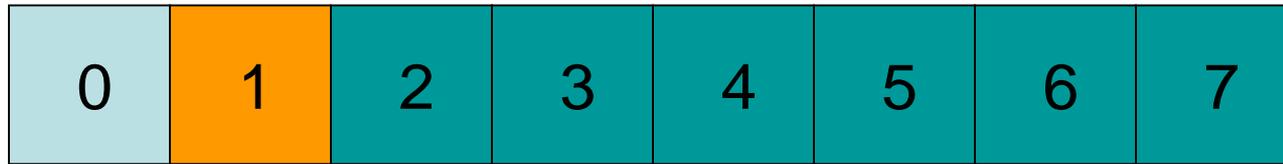
$P_{\max} \approx 20 \text{ W}$
Gain $\approx 18 \text{ dBi}$
Pertes $\approx 3 \text{ dB}$

1800 MHz
 $P_{\max} = 1 \text{ W}$
Gain $\approx 0 \text{ dBi}$



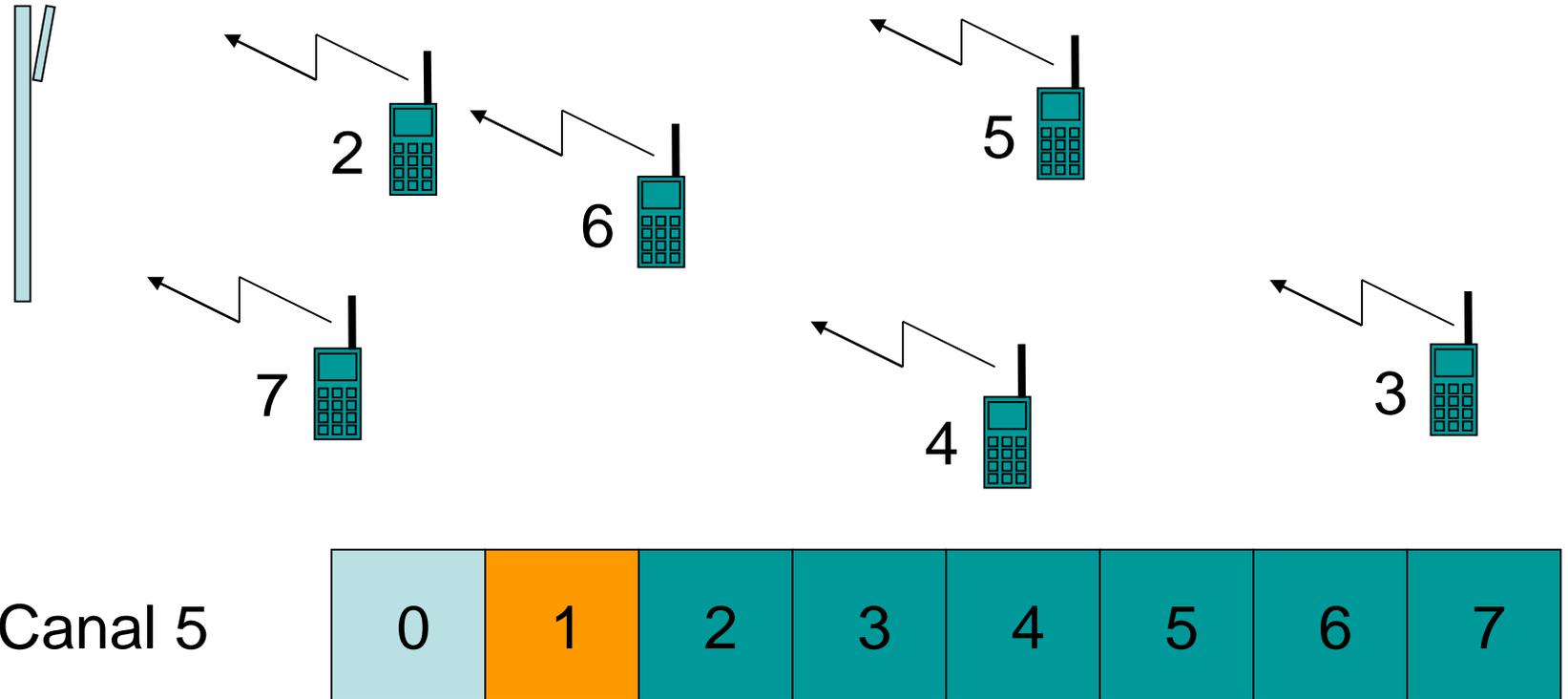
La puissance varie par pas de 2 dB jusqu'à une réduction maximale de 20 dB (99%).

Canaux logiques

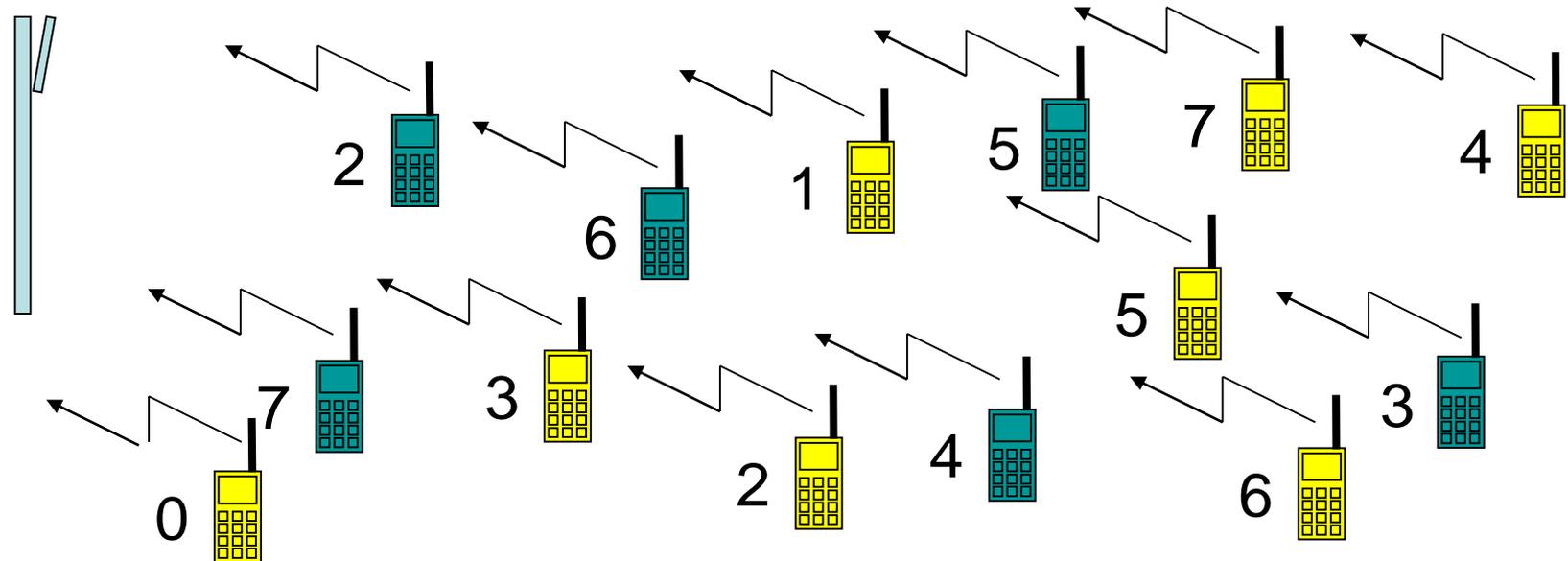


BCCH: Broadcast Control CHannel

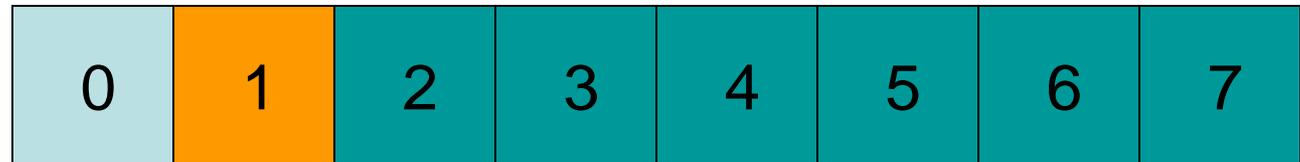
Trafic / Capacité (1/2)



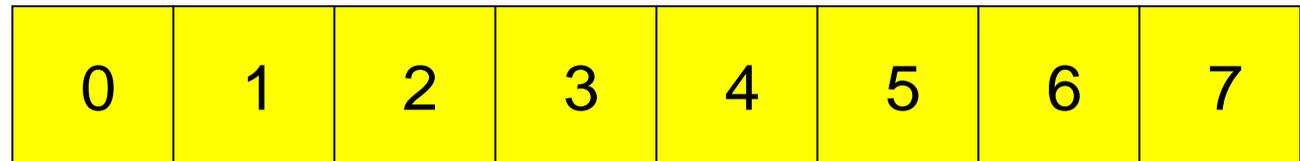
Trafic / Capacité (2/2)



Canal 5

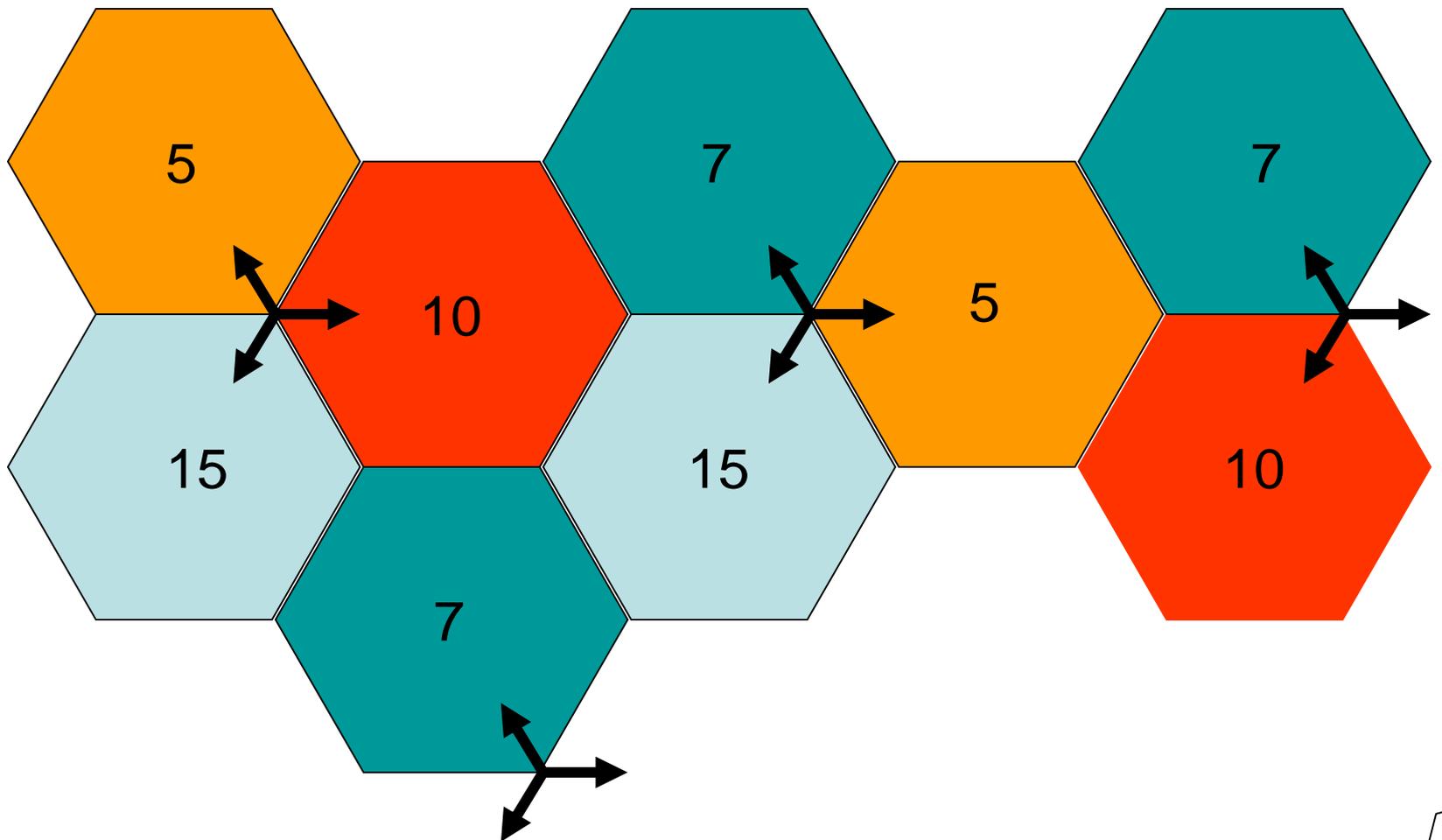


Canal 18

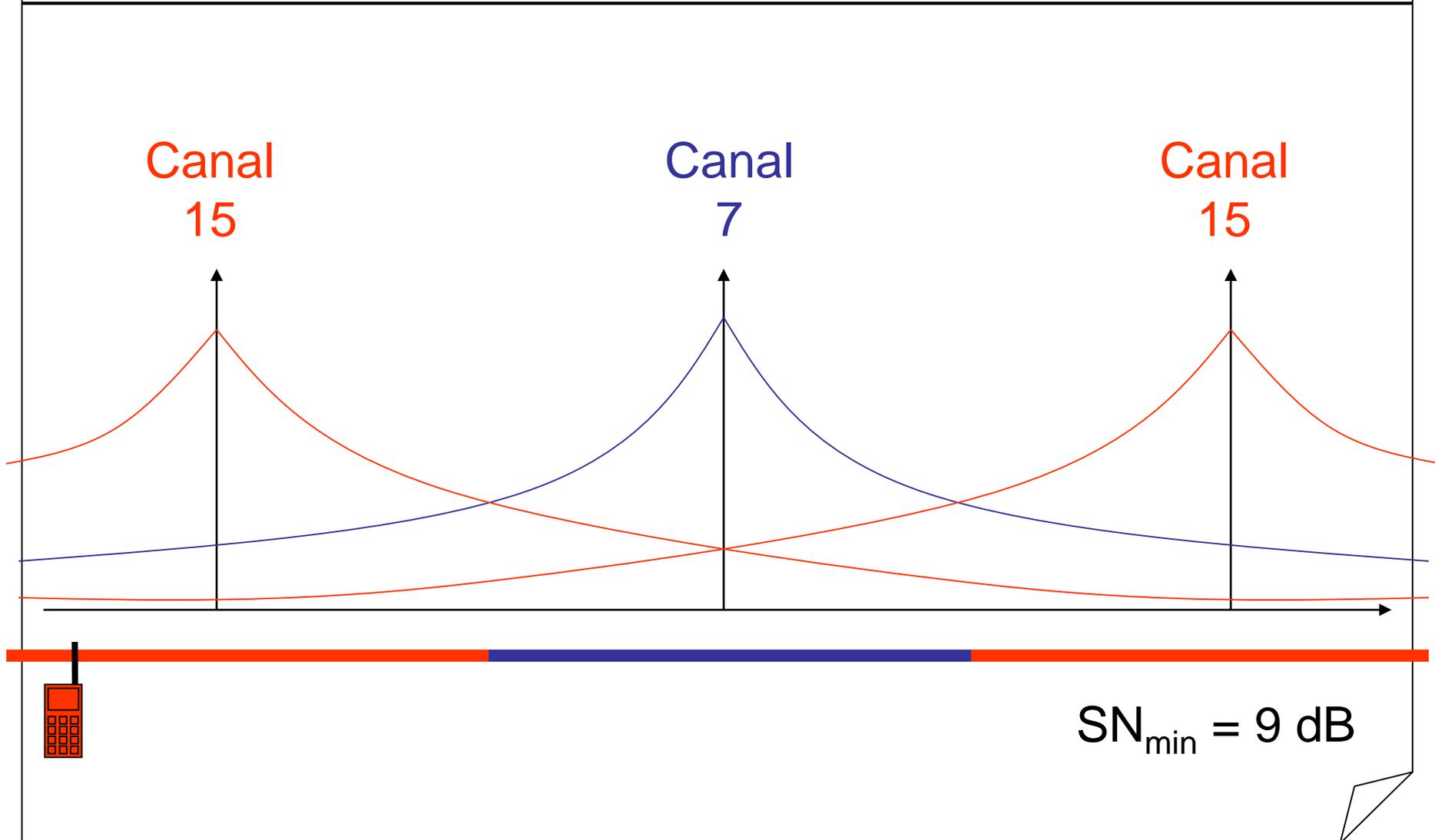


SDCCH : 1 suffit pour 2 canaux, pas de règle pour le positionner

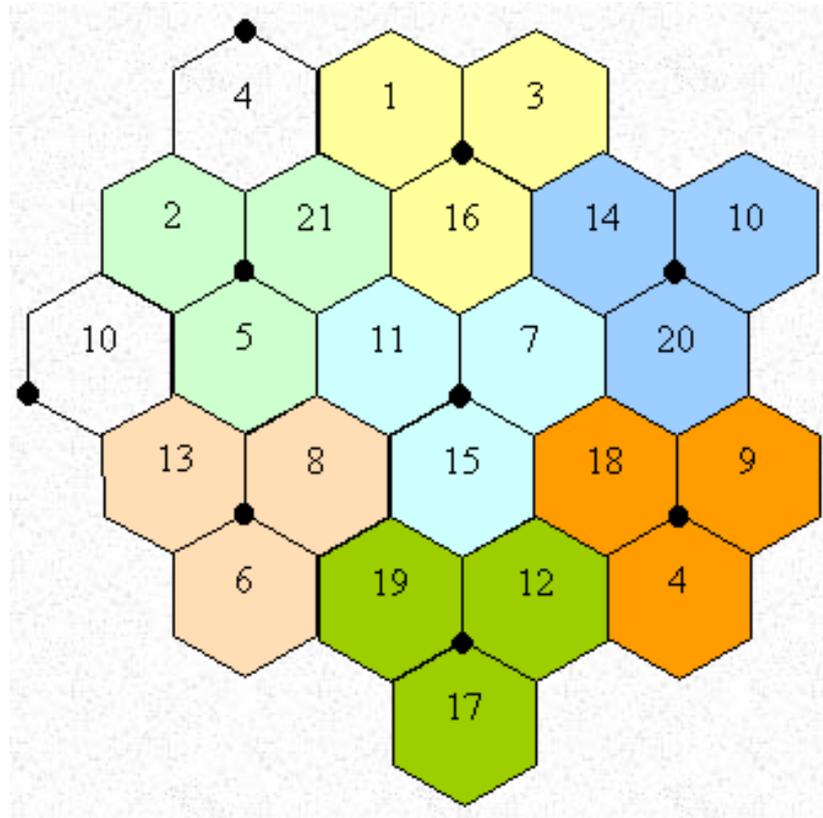
Réutilisation des fréquences



Réutilisation et interférences



Exemple réel de motif



Mobile en fonctionnement

A la **mise sous tension** se passent les opérations suivantes :

- l'utilisateur valide sa carte SIM en tapant au clavier son numéro de code PIN (Personal Identity Number)
- le récepteur du GSM scrute les canaux de la bande GSM et mesure le niveau reçu sur chaque canal
- le mobile repère le canal BCCH parmi les signaux les plus forts
- le mobile récupère les informations concernant le FCCH. Ce signal lui permet de se caler précisément sur les canaux GSM
- le mobile récupère le signal de synchronisation de la trame TDMA diffusé sur le BCCH et synchronise sa trame
- le mobile lit sur le BCCH les infos concernant la cellule et le réseau et transmet à la BTS l'identification de l'appelant pour la mise à jour de la localisation

Le mobile a alors achevé la phase de mise en route et se met en mode veille, mode dans lequel il effectue un certain nombre d'opérations de routine :

- lecture du PCH (Paging channel) qui indique un appel éventuel
- lecture des canaux de signalisation des cellules voisines
- mesure du niveau des BCH des cellules voisines pour la mise en route éventuelle d'une procédure de handover

Mobile en fonctionnement

A la **réception** d'un appel :

- l'abonné filaire compose le n° de l'abonné mobile: 06 XX XX XX XX
- l'appel est aiguillé sur le MSC le plus proche qui recherche l'IMSI dans le HLR et la localisation du mobile dans le VLR
- le MSC le plus proche du mobile (Visited MSC : fait diffuser dans la zone de localisation, couvrant plusieurs cellules, un message à l'attention du mobile demandé par le PCH)
- le mobile concerné émet des données sur RACH avec un Timing Advance fixé à 0 et un niveau de puissance fixé par le réseau (ces paramètres seront ajustés ultérieurement)
- le réseau autorise l'accès par le AGCH et affecte au mobile une fréquence et un time-slot
- l'appelé est identifié grâce à la carte SIM
- le mobile reçoit la commande de sonnerie
- décrochage de l'abonné et établissement de la communication

Mobile en fonctionnement

Lors de l'**émission** d'un appel

- l'abonné mobile compose le numéro du correspondant du réseau téléphonique commuté
- la demande arrive à la BTS de sa cellule
- elle traverse le BSC pour aboutir dans le commutateur du réseau MSC
- l'appelant est identifié et son droit d'usage vérifié
- l'appel est transmis vers le réseau public
- le BSC demande l'allocation d'un canal pour la future communication
- décrochage du correspondant et établissement de la communication

Localisation - itinérance

- Lors d'un appel entrant, pour contacter un mobile :
 - on envoie un message de recherche (paging)
 - sur la zone de localisation (ensemble de cellules)
 - recherche avec les bases de données
 - centralisées
 - décentralisées
 - hybrides

GSM : canaux logiques

- Catégories
 - Broadcast Channel (groupe BCH)
 - Voie descendante, voie balise
 - Common Control Channel (groupe CCCH)
 - Voie descendante et montante
 - Dedicated Control Channel (groupe DCCH)
 - Voie descendante et montante
 - Traffic Channel (groupe TCH)
 - Voie descendante et montante

GSM : canaux logiques

- **Groupe BCH**
 - **Frequency Correction Channel (FCCH)**
 - Calage sur la fréquence porteuse
 - Signal sinusoïdal parfait
 - **Synchronisation Channel (SCH)**
 - Synchronisation et identification
 - Burst d'apprentissage identique dans tout le réseau
 - Code BISC (couplé avec la fréquence, on identifie la cellule)
 - **Broadcast Control Channel (BCCH)**
 - Information sur le système
 - Numéro de ZaC, paramètre de sélection des cellules, paramètres pour l'accès aléatoire, description des canaux logiques, description des cellules voisines...

GSM : canaux logiques

- Groupe CCCH
 - Paging Channel (PCH)
 - Paging pour SMS et demande d'appel (réponse du mobile sur le RACH)
 - Random Access Channel (RACH)
 - Montant, accès aléatoire (demande des mobiles)
 - Access Grant Channel (AGCH)
 - Message d'allocation d'un canal de signalisation (SDCCH) et Timing Advance
 - Cell Broadcast Channel (CBCH)
 - Diffusion d'informations « applications » (météo, routes)

GSM : canaux logiques

- Groupe DCCH
 - **Stand-Alone Dedicated Control Channel (SDCCH)**
 - Pour le Setup et pour mise à jour de localisation
 - **Slow Associated Control Channel (SACCH)**
 - Instrumentation d'un canal de trafic (TCH ou SDCCH)
 - Contrôle de puissance, contrôle qualité radio, rapatriement des mesures
 - **Fast Associated Control Channel (FACCH)**
 - Extension de la capacité du SACCH par vol de slot aux canaux qu'il instrumente
 - Utilisation en Handover uniquement

Type de canal	Canal logique	Slot possible	Multi trame	Fonction
Broadcast Channel	FCCH Fréquence Correction CHannel	0	51	Calage fin du mobile sur la fréquence porteuse
Simplex Non-dédiés	SCH Synchronization CHannel	0	51	Synchronisation du mobile avec la cellule
	BCCH Broadcast Control CHannel	0 2,4,6	51	Diffusion au mobile des informations de la cellule
Common Control Channel	PCH Paging CHannel	0 2,4,6	51	Canal par lequel le mobile reçoit les appels en provenance du réseau
Simplex Non-dédiés	RACH Random Access CHannel	0 2,4,6	51	Canal par lequel le mobile accède au réseau de façon aléatoire pour répondre ou lancer un appel.
	AGCH Access Grant CHannel	0 2,4,6	51	Le réseau communique par ce canal pour informer le mobile par où, quand et comment il doit établir une communication
	CBCH Cell Broadcast CHannel	0 1,2,3	51	Diffusion sur ce canal des messages courts de type info routière, météo etc..
Dedicated Control Channel	SDCCH Stand-Alone Dedicated Control CHannel	0 1 à 7	51	Canal de signalisation, mise à jour de localisation etc...
Duplex Dédiés	SACCH Slow Associated Control CHannel	0 0 à 7	51 26	Canal de supervision d'une liaison, control de la puissance, de la qualité, remonté de mesure. Il peut être associé soit à un canal SDCCH (multi-trame 51), soit à un canal TCH (multi-trame 26).
	FACCH Fast Associated Control CHannel	0 à 7	26	Canal de supervision d'une liaison, lors d'une communication, il sert à exécuter le Hand-Over, ce canal n'existe que par le vol de slots du canal TCH
Traffic Channel Duplex Dédiés	TCH Traffic CHannel	0 à 7	26	Canal supportant le trafic voix ou data

Exemples de configuration de BTS

Une BTS avec 1 TRX : 8 TN (Time slot Number) = 7 communications

- TN 0 pour le FCCH, SCH, BCCH, PCH, AGCH, RACH et 4 SDCCH et leurs SACCH
- TN 1 à 7 : 1 TCH et son SACCH par slot

Une BTS avec 4 TRX : 32 TN = 29 communications

- TN 0 pour le FCCH, SCH, BCCH, PCH, AGCH, RACH .
- 2 TN : 8 SDCCH et leurs SACCH associés par slot
- 29 TN : 1 TCH et son SACCH par slot

Une BTS avec 12TRX : 96 TN = 87 communications

- TN 0 pour le FCCH, SCH, BCCH, PCH, AGCH, RACH
- TN 2 : BCCH, PCH, AGCH et RACH
- TN 4 : BCCH, PCH, AGCH et RACH
- TN 6 : BCCH, PCH, AGCH et RACH
- 5 TN : 8 SDCCH et leurs SACCH associés par slot
- 87 TN : 1 TCH et son SACCH par slot

GPRS

GPRS

- **GPRS** (General Packet Radio Service) : transfert de données par paquet sur GSM (modulation GMSK) vers Internet et réseaux X25 : jusqu'à 171 kbit/s (suivant le codage de canal CS-1 à CS-4)

Codage de canal	Débit Utile	Protection
CS-1	9,05 kbit/s	++
CS-2	13,4 kbit/s	+
CS-3	15,6 kbit/s	-
CS-4	21,4 kbit/s	-- (aucune protection)

Facturé au débit - MMS

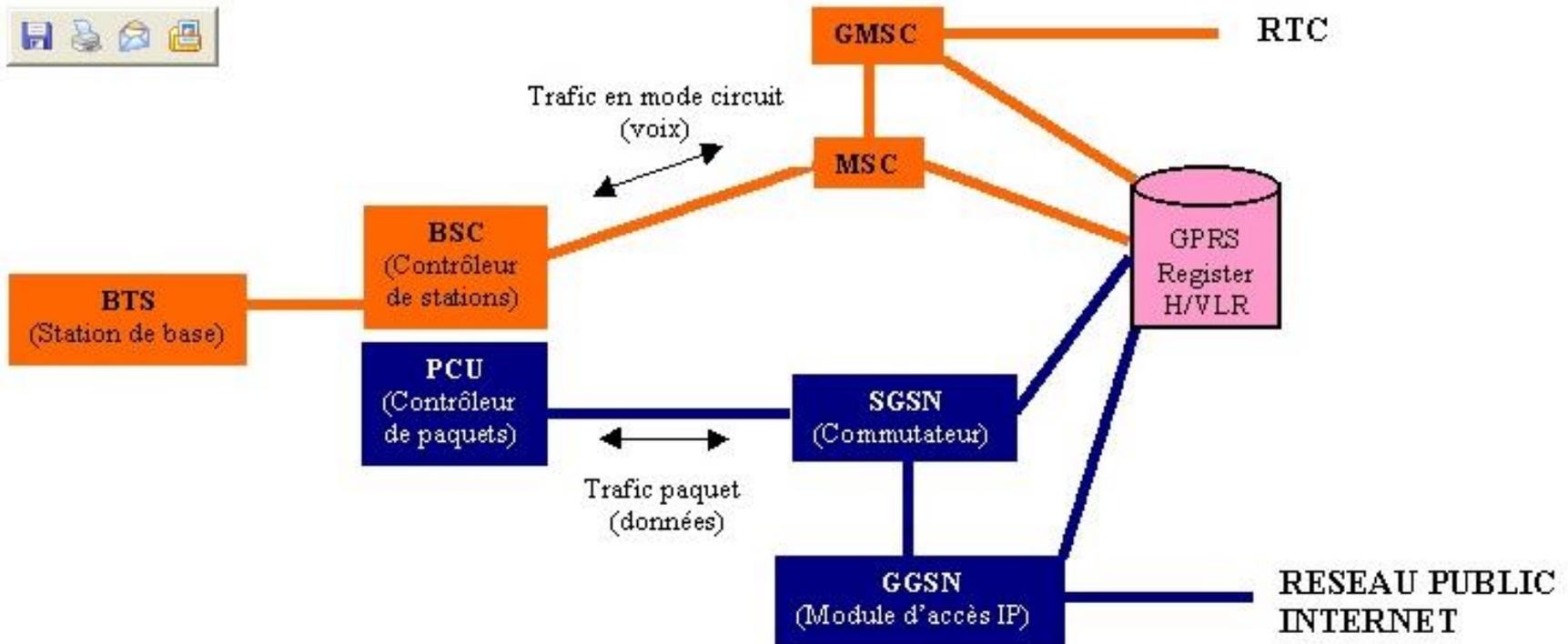
GPRS

- Échange de données en mode paquets :
 - découper l'information et transmettre les données par paquet lorsque les canaux ne sont pas utilisés pour la phonie
 - optimise les ressources radio par gestion de priorité, mise en attente et affectation de ressources radio uniquement en cas de transfert
- Un canal radio peut être utilisé par plusieurs utilisateurs. Les Time Slots sont partagés => moins de blocage.
- Un utilisateur peut utiliser plusieurs canaux radio. Les Time Slots sont agrégés => débits plus importants.

GPRS

- Sur les timeslots d'un TRX, certains sont alloués au GPRS, mais la voix a toujours la priorité
- Utilise la capacité libre
- On peut utiliser jusqu'à 8 Time Slots (8 x 21.4 kbit/s + header = 171 kbit/s pour CS-4).
- La transmission peut se faire indépendamment en UpLink et en DownLink mais pas forcément en simultané (suivant le type de mobile)
- Généralement, on alloue plus de Time Slots en DownLink qu'en UpLink.

GPRS : structure du réseau



GPRS : structure du réseau

- L'implantation du GPRS peut être effectuée sur un réseau GSM existant. Les BS ne subissent aucune modification si ce n'est l'adjonction d'un logiciel spécifique, qui peut être installé par téléchargement.
- Plus en amont, le contrôleur de stations de base doit être doublé par un contrôleur de paquets (PCU pour Paquets Controller Unit).
- Vient ensuite, la chaîne destinée aux données par paquets, constituée du commutateur (SGSN) ou Switch spécifique GPRS, équivalent du Mobile Switch Controller (MSC), contrôleur qui a pour fonction de vérifier l'enregistrement des abonnés, de les authentifier et d'autoriser les communications, et du module d'accès (GGSN) au monde IP (Internet ou Intranet).
- Le GGSN et le SGSN sont expliqués dans la partie suivante.
- Sans licence GSM, il n'est pas possible d'installer un réseau GPRS.

GPRS : structure du réseau

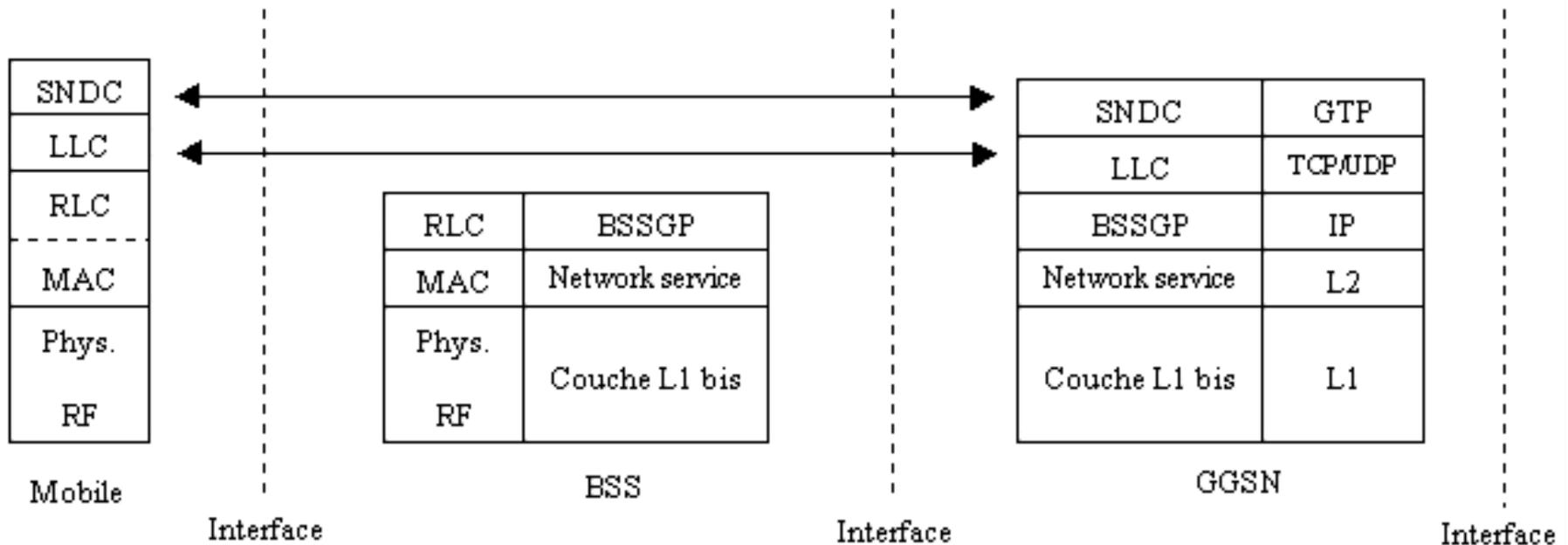
- GGSN : *Gateway GPRS Support Node* ou Routeur IP s'interfaçant avec les autres réseaux :
 - fonctionnalité d'interconnexion dans le centre de communication (MSC), qui permet de communiquer avec les autres réseaux de données par paquets extérieurs au réseau GSM.
 - masque au réseau de données les spécificités du GPRS. Il gère la taxation des abonnés du service, et doit supporter le protocole utilisé sur le réseau de données avec lequel il est interconnecté.
 - Les protocoles de données supportés en standard par un GGSN sont IPv6, CLNP et X25. SGSN : *Serving GPRS Support Node* ou Routeur IP gérant les terminaux pour une zone.

GPRS : structure du réseau

Le SGSN (Serving GPRS Support Node) :

- fonctionnalité du service dans le centre de commutation (MSC), qui permet de gérer les services offerts à l'utilisateur.
- interface logique entre l'abonné GSM et un réseau de données externe.
- missions principales :
 - gestion des abonnés mobiles actifs (mise à jour permanente des références d'un abonné et des services utilisés)
 - relais des paquets de données. Quand un paquet de données arrive d'un réseau PDN (Packet Data Network) externe au réseau GSM, le GGSN reçoit ce paquet et le transfère au SGSN qui le retransmet vers la station mobile. Pour les paquets sortants, c'est le SGSN qui les transmet vers le GGSN.

GPRS : couches logicielles



SNDC SubNetwork Dependant Convergence
 LLC Logical Link Control
 RLC Radio Link Control
 GGSN Gateway GPRS Support Node
 SGSN Serving GPRS Support Node

GPRS : couches logicielles

Dans le terminal mobile, nous trouvons de bas en haut les couches suivantes :

- La couche physique, qui se décompose en deux sous-couches fonctionnelles ;
 - La sous-couche RF, qui gère les fonctions radio du terminal. Elle émet les informations reçues de la couche physique. Elle décode les informations reçues de la station de base et les transfère pour interprétation vers la couche physique ;
 - La couche physique produit les trames, qui seront émises par la couche radio ; pour les trames reçues du réseau, elle détecte et corrige les erreurs de transmission ;
- La couche MAC (ou RLC pour Radio Link Control) pilote la liaison radio entre le terminal et la station de base, c'est-à-dire les mécanismes de retransmission en cas d'erreur, la fonction de contrôle d'accès aux ressources radio quand plusieurs terminaux sont en concurrence. Le RLC peut demander la retransmission d'un bloc de données ;
- La couche supérieure SNDC (SubNetwork Dependant Convergence) gère la mobilité, le cryptage et la compression de données.

GPRS : routage des paquets

- Le routage de chaque paquet est indépendant de celui qui le précède ou de celui qui le suit.
- Pendant la phase de connexion d'un terminal dans un réseau GSM, les échanges de signalisation sont nombreux, et pour faire face aux contraintes du mode paquet, les informations de routage obtenues pour acheminer le premier paquet vers un terminal GSM sont stockées dans le GGSN.
- Ainsi la route pour les paquets suivants est sélectionnée à partir du contexte stocké dans le GGSN (le Temporary Logical Link Identity ou TLLI).

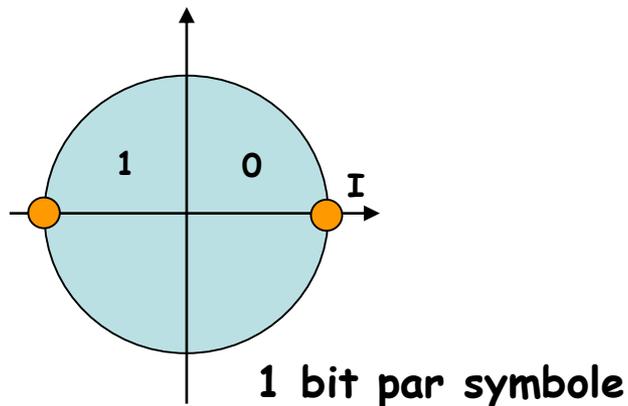
EDGE

EDGE

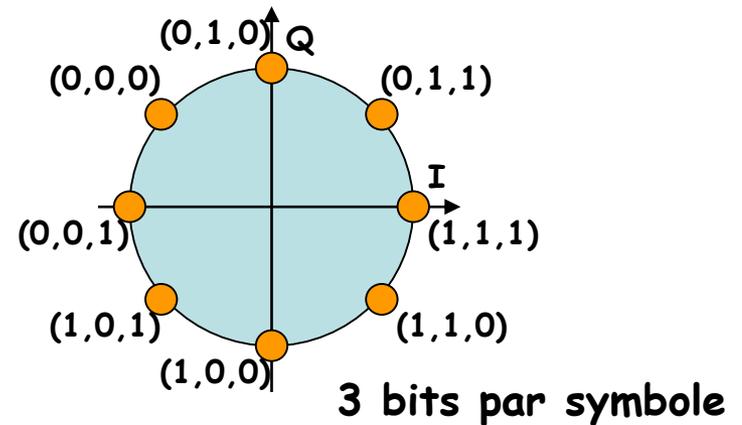
- **EDGE** (Enhanced Data rate for GSM Evolution) ou EGPRS
 - Le débit max du GPRS n'est valable que pour des C/I importants (utilisation du CS-4), ce qui n'est pas toujours le cas.
 - On va donc changer de modulation GMSK => 8-PSK. La vitesse de modulation est la même que pour le GMSK mais permet un débit instantané 3 fois plus élevé, chaque état de modulation transmettant l'information relative à 3 bits.
 - Débits du EDGE
 - 6 débits sont normalisés de PCS-1 à PCS-6 variant de 22,8 kbit/s à 69,2 kbit/s par Time Slot.
 - Le débit max instantané sera donc de 553 kbit/s (moy # 300 kbit/s).

EDGE

- Nécessite le remplacement des émetteurs-récepteurs et terminaux
- Compatible avec le reste des équipements



Modulation GMSK



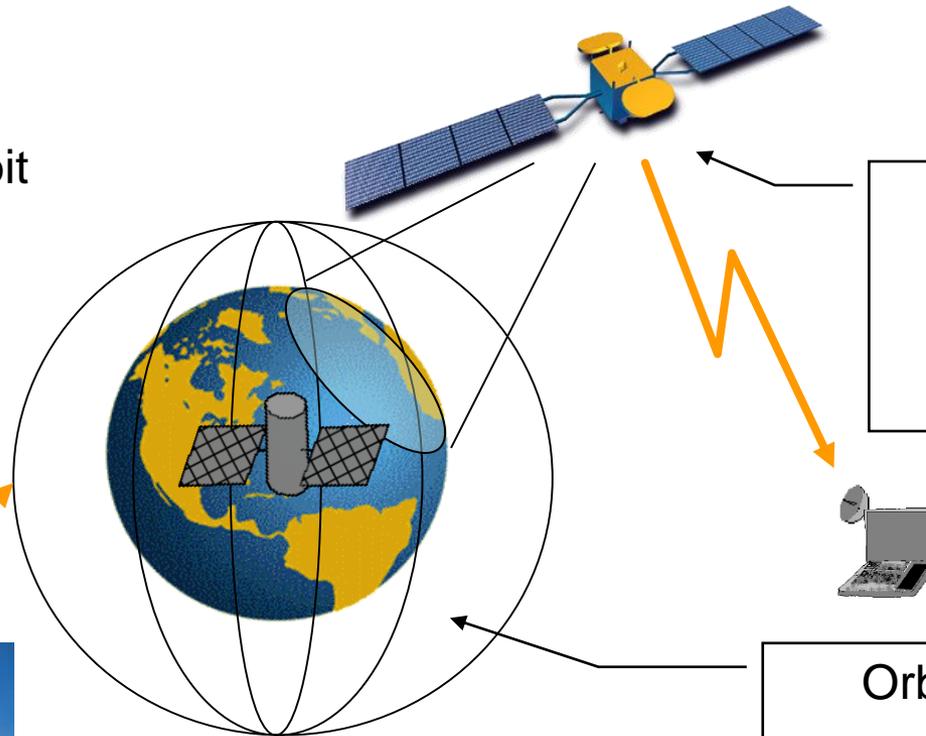
Modulation EDGE

Satellites

Satellites

- Différentes orbites : GEO, MEO, LEO

Orbite moyenne
MEO =
Medium Earth Orbit
~ 10000 kms



Satellite
géostationnaire
GEO
36000 kms

Orbite basse
LEO =
Low Earth Orbit
qq 100 kms

Satellite GEO

- Simple à mettre en œuvre
- Même vitesse angulaire que la terre (semble fixe)
- Couverture globale : **3 satellites seulement**
- Nombre total limité
(angle $<2^\circ$ \Rightarrow interférences entre satellites)
- Orbite ~ 36000 Kms
- Délai (A/R) : **250 ms (important)**
- Applications : Diffusion, VSAT, liaison point à point
- Débit : jusqu'à 155 Mb/s
- Exemples : Astra, Hotbird ...

Satellite MEO

- Orbite : 10000 Kms
- Délai (A/R) : 80 ms
- Applications : voix (mobiles), data bas débit
- Débit : 300b/s à 38.4 kb/s
- Exemples : Odyssey, Ellipso

Satellite LEO

- Orbite : 640 à 1600 Kms
- Délai (A/R) : 6 à 21 ms (\approx négligeable)
- Couverture globale : environ 40 à 900 satellites
- Applications : voix (mobiles), data haut & bas débit
- Débit : 2.4 kb/s à 155 Mb/s
- Exemples : Iridium, Globalstar, Télédésic ...

IS95

IS95

- Interim Standard 95 : 2^{ème} génération sans-fil aux États-unis avec IS136
- IS136 : Multiplexage TDMA, concurrent du GSM
- IS95 : Technique CDMA (société Qualcomm)
 - concurrent du GSM
 - utilise 2 bandes de fréquences 800 MHz (cohabite avec AMPS analogique sur une largeur de 25 MHz) et 1900MHz
 - fonctionne en séquence directe, et une communication occupe 1,25 MHz dans chaque sens (forward direction = descendant, reverse direction = montant)
 - utilise le soft-handoff ou soft-handover

IS95

- Architecture quasiment identique au GSM, sauf :
 - pas de BSC, les MSC sont reliés aux BS.
 - synchronisation par un système GPS
- Interface radio :
 - Étalement -> [Chips] -> Modulation de phase

IS95

- étalement
 - codes orthogonaux : résultat nul pour le produit scalaire entre 2 codes.
Exemple : matrices de Walsh-Hadamard
 - séquences pseudo-aléatoires : corrélation croisée quasi nulle, auto-corrélation = longueur du code
 - Exemple:
 - $S_1=(11111100011011101010000100101100)$
 - $S_2=(1111100011011101010000100101100)$
 - $S_1 \otimes S_2=15$ $S_1 \otimes S_1=31$

IS95

- Matrices de Walsh-Hadamard
- Motif $W_1=[0]$, L multiples de 2
- $W_L = \begin{bmatrix} W_{L/2} & W_{L/2} \\ W_{L/2} & \overline{W_{L/2}} \end{bmatrix}$

- Exemples

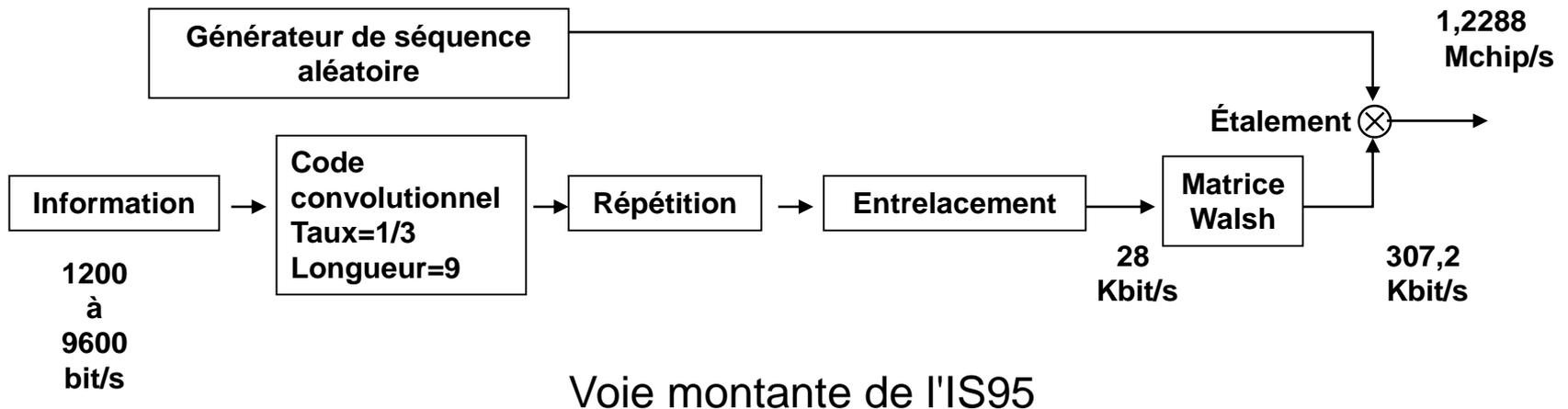
$$W_1=[0], \quad W_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad W_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Ex. les lignes 3 et 4 sont orthogonales entre elles.

Ces codes peuvent jouer un rôle de code correcteur.

IS95 - Sens montant

- pour chaque canal physique, l'IS95 génère une séquence aléatoire (long mask) qui module et multiplexe l'information utile par étalement (CDMA)
- le générateur est constitué d'un registre à décalage à 42 cases (période de $2^{42}-1$) → long pour un débit de 1,2288 MChip/s. Période de 41 jours entre 2 codes identiques.

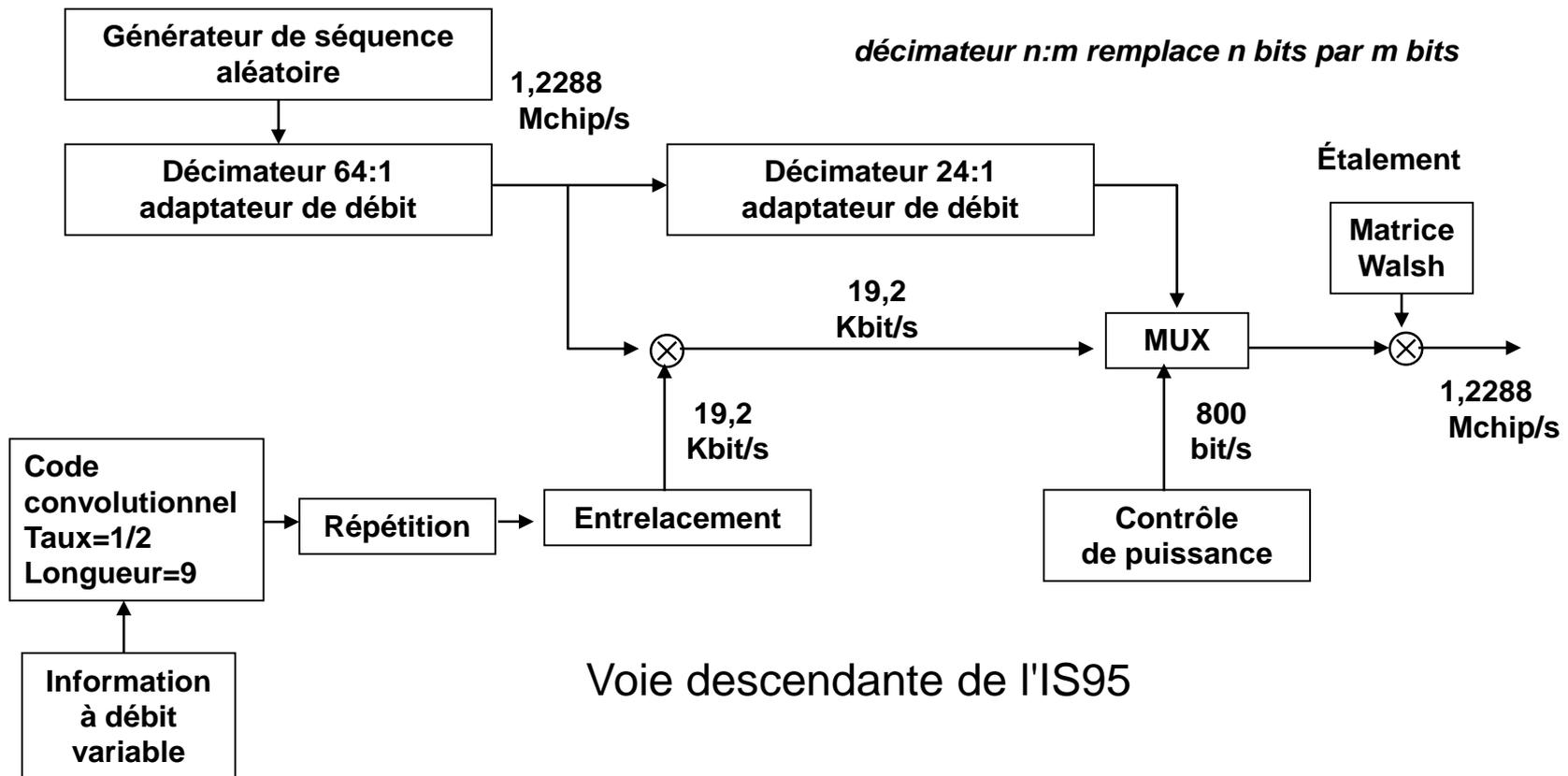


IS95 - Sens montant

- 4 débits utilisateur de 1200, 2400, 4800 et 9600 bit/s sont protégés par un code convolutionnel. Les données sont répétées (jusqu'à 8 fois pour le plus faible débit) pour obtenir un débit régulier de 9600 bit/s.
- La protection (1/3) nécessite un débit de $3 \times 9600 = 28800$ bit/s.
- La matrice de Walsh-Hadamard de dimension 64 assure une autre protection C(64,6). Chaque bloc de 6 bits est codé sur 64 bits, ce qui donne un débit de 307,2 Kbit/s
- L'étalement est la dernière phase de la modulation binaire. Chaque bit est étalé par 4 chips. Le débit en sortie est donc de 1,2288 MChip/s et est envoyé au modulateur QPSK (Modulation de phase en quadrature) pour émission.

IS95 - Sens descendant

- protection contre les erreurs moins performante (transmission par un seul émetteur, la BS), meilleur contrôle, synchronisation parfaite
- contrôle de puissance d'émission des utilisateurs (800bit/s)



IS95 - Sens descendant

- Les décimateurs abaissent le débit de la séquence aléatoire pour le rendre compatible au débit d'information.
- Le débit en sortie est donc de 1,2288 MChip/s et est envoyé au modulateur QPSK (Modulation de phase en quadrature) pour émission.

IS95 – Canaux logiques

- Un canal physique : une porteuse ET un code
- Les canaux logiques gèrent l'information dans les canaux suivants :

Canal logique	Sens de la transmission	Dédié ou commun
Pilot	Descendant	Commun
Sync	Descendant	Commun
Paging	Descendant	Commun
Access	Montant	Commun
Traffic - Trafic	Duplex	Dédié
Traffic - Signalisation	Duplex	Dédié
Traffic – Contrôle de puissance	Descendant	Dédié

IS95 – Canaux logiques

- Le terminal choisit la BS (écoute du canal *Pilot*), se synchronise (canal *Sync*), scrute les infos du canal *Paging* pour accéder au système. Il est alors enregistré.
- Lors d'un appel, il sollicite le canal *Access*, la BS lui répond par le canal *Paging* et obtient éventuellement un canal *Traffic*.

IS95 – Canaux logiques

- Canal Pilot
 - Une BS envoie une série de zéros sur la porteuse principale de la cellule sans modulation mais avec des décalages (PN_offset) de 64 bits pour éviter les confusions entre BS.
 - Utilise le GPS (Global Positioning System) pour la synchronisation.
 - Walsh₀ (1^{ère} ligne)
- Canal Sync
 - Canal à 1200 bit/s, code convolutionnel 1/2, répétition, entrelacement puis Walsh₃₂ (33^{ème} ligne)
 - Diffuse le n° de l'identificateur du sous-réseau, le décalage de la cellule (PN_offset), le débit du canal de Paging, etc.

IS95 – Canaux logiques

- Canal Paging
 - Ressource commune diffusant le nombre de canaux de paging, paramètres de l'accès aléatoire, liste des BS voisines, liste de fréquences disponibles, localisation, messages d'acquittement, etc.
 - lignes 1 à 7 de Walsh (1 à 7 canaux, nombre diffusé sur le 1^{er} canal)
 - débit de 4800 ou 9600 bit/s
- Canal Access
 - utilisé pour transmettre vers la BS
 - jusqu'à 32 canaux Access au débit de 4800 bit/s
 - accès aléatoire "Slotted Aloha"
 - le terminal dépose une requête attend un acquittement sinon réitère sa demande (jusqu'à un nombre maxi - sonde ="probe") puis recommence avec un niveau de puissance supérieur

IS95 – Canaux logiques

- Canal Traffic
 - sert pour l'information ou la signalisation dédiée
 - débit de 1200, 2400, 4800 ou 9600 bit/s soit 24, 48, 96 ou 192 bit par trame de 20 ms.
 - Code CRC
 - Les trames contiennent soit de l'information, soit de la signalisation (pendant les silences) soit un mélange des 2
- Sur la voie montante, jusqu'à 62 canaux de trafic, identifiés par le numéro de série des terminaux ou ESN (Electronic Serial Number)

IS95 - Soft-Handover

- Utilisé dans le système IS95 pour la 1^{ère} fois.
- A l'intersection de cellules le lien est établi avec plusieurs cellules (6 max). La synchronisation des signaux est assurée par GPS.
- Pendant le déroulement du handover : 4 listes :
 - cellules actives
 - candidates
 - voisines
 - restantes.
- Utilise un mécanisme de double seuil sur la puissance plus un de temporisation

IS41

- La 1^{ère} génération de téléphonie cellulaire a normalisé l'interface radio, mais les parties fixes se sont développées de multiples manières.
- Pas de solution simple pour passer d'un réseau à un autre
- Suite au développement du GSM, les américains ont créé le standard IS41 avec une architecture (et un vocabulaire) très proche du GSM (MSC, HLR, VLR)

CDMA2000

CDMA2000

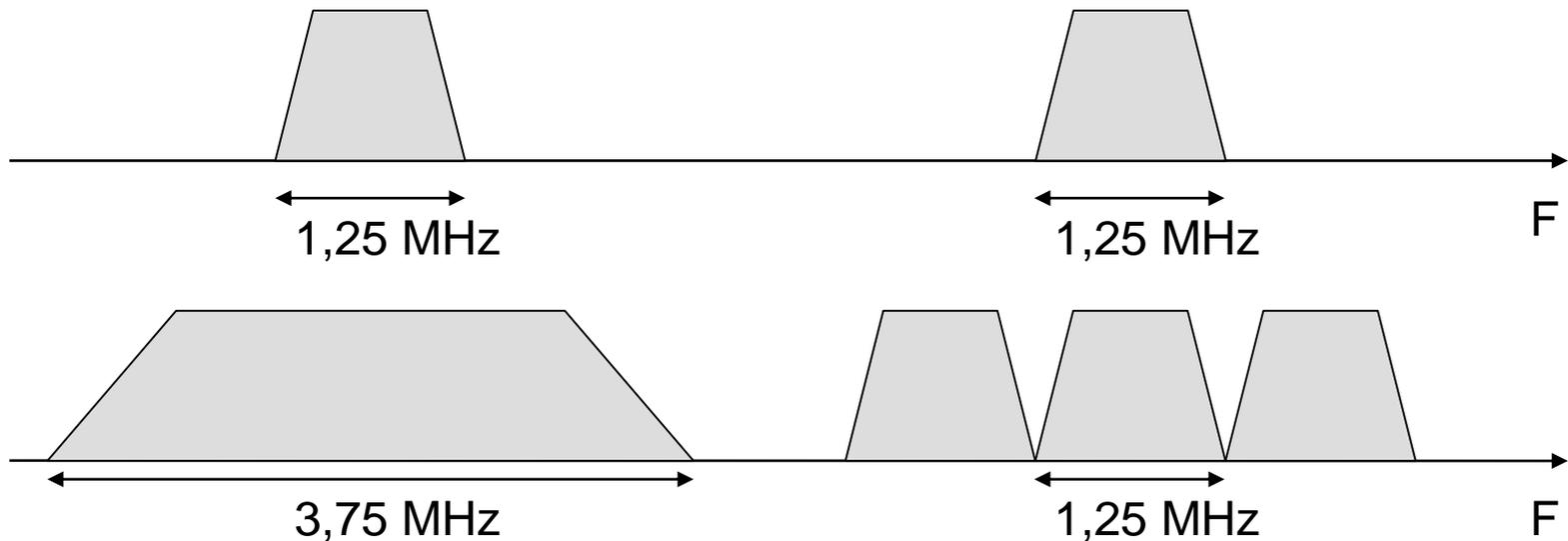
- Né lors d'une conférence internationale de l'UIT en 1992
- Programme IMT2000 (International Mobile Telecommunications System)
- Bande de fréquences de 2 GHz rendue disponible
- Proposition de CDMA2000 (suite de l'IS95 -CDMA-) et UWC136 (suite de l'IS136 -TDMA- concurrent de l'IS95 qui passe en GPRS et EDGE pour augmenter le débit)
- En Europe et Japon, W-CDMA (CDMA large bande) associé au TD-CDMA pour former l'UMTS.

CDMA2000

- Signalisation de la partie filaire régie par le protocole IS41.
- Des accords de compatibilité avec le protocole MAP de l'UMTS (repris du GSM) sont envisagés.
- La bande de fréquences attribuée est déjà occupée (!!!) et seules des bandes de 10MHz sont libres. Les autres devront être libérées en cas de succès commercial.
Pour l'UMTS, les bandes attribuées sont "nouvelles"
- CDMA2000 doit fonctionner quelque soit la taille de cellule, pour piéton, véhicule et en Boucle Locale Radio.

CDMA2000

- CDMA2000 doit co-exister avec IS95. L'étalement prévu est 3 fois supérieur. Pour rester compatible, l'information est découpée en 3 parties qui s'évalent séparément sur 3 bandes étroites. En cas de non sollicitation IS95, la voie montante reste large bande



CDMA2000

- Flexibilité multiporteuse :
 - possibilité d'utiliser 2 ou 3 porteuses adjacentes pour un même signal (qui est alors reconstruit à partir des 2 ou 3 signaux)
 - débit de 1,2288 Mchip/s pour chaque partie.

CDMA2000 - Architecture

- 3 plans ayant chacun 7 couches : Plan mode circuit, plan mode paquet, plan de signalisation
 - Couches hautes 3 à 7
 - Couche liaison
 - Couche physique

CDMA2000 - couches hautes

- Le **plan circuit** met en service et garantit une communication
- Le **plan paquet** assure l'acheminement des flux paquet par paquet depuis ou vers un mobile. Il les rend compatibles avec les autres réseaux (TCP/IP par exemple)
Il fournit un service de SMS
- Le **plan de signalisation** contrôle le fonctionnement du mobile

CDMA2000 - couche liaison

- 2 sous-couches :
 - LAC = Link Access Control
 - MAC = Media Access Control

Dans les couches supérieures, les performances de la couche physique ne sont pas connues.

Lors d'une requête, la couche 2 est traversée et la couche MAC multiplexe l'information hétérogène sur un canal physique.

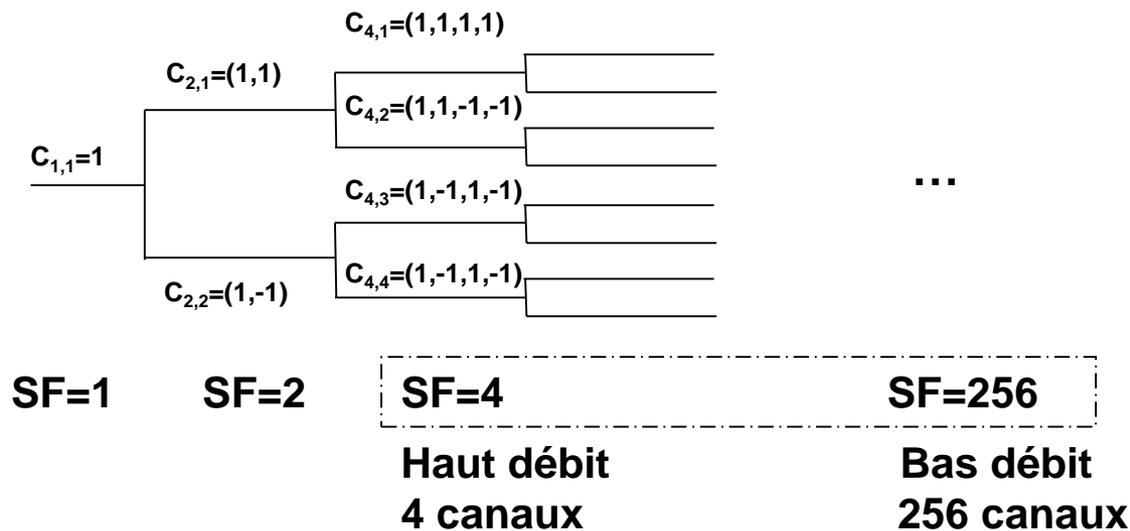
- PLICF = Physical Layer Independant Convergence Function
- PLDCF = Physical Layer Dependant Convergence Function
 - Instance-Specific PLDCF
 - PLDCF MUX et QoS

CDMA2000 - couche liaison

- La couche PLICF comporte de nombreux canaux logiques (**f**orward/**r**everse, **c**ommun ou **d**édié, fonction)
Trafic Channel : f/r-dtch, f/r-ctch
MAC Channel : f/r-dmch_control, r-cmch_control, f-cmch_control
Signaling Channel : dsch, csch
- La couche PLDCF transforme les canaux logiques de la couche PLICF en canaux physiques conformes à la couche de transmission utilisée.
Elle gère la QoS des flux de données en fonction de 2 priorités : le délai de livraison, le débit de la liaison
Utilise les méthodes de retransmission ARQ (Automatic Repeat reQuest) en cas d'erreur.

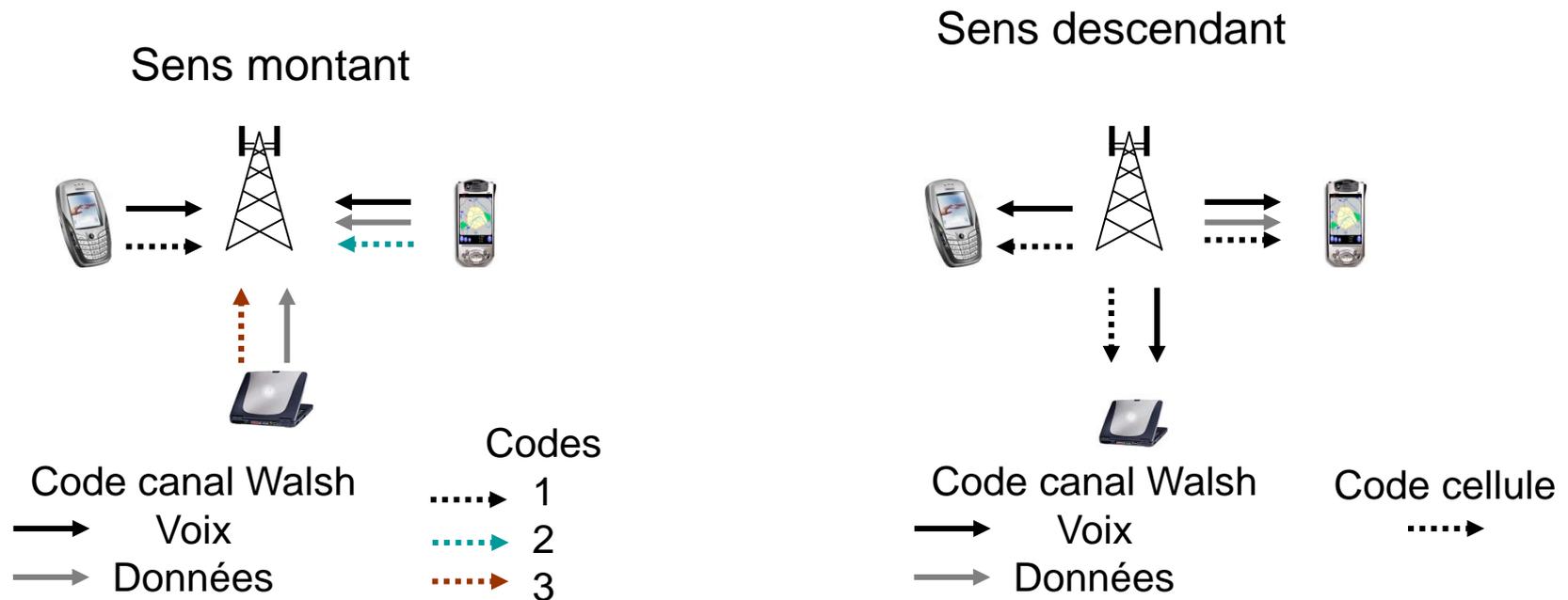
CDMA2000 - couche physique

- canal physique = combinaison d'un code canal et d'une séquence aléatoire
- possibilité d'utiliser un Spreading Factor de 4 à 256
- possibilité de multiplexer des codes à débit variable 2 de SF=4 et 128 de SF=256



CDMA2000 - couche physique

- Sens montant : chaque utilisateur a sa propre séquence pseudo-aléatoire
- Sens descendant : une seule séquence est allouée (code cellule)



CDMA2000 - canaux logiques

F-PICH	Forward Pilot CHannel	Descendant
F-TDPICH	Forward Transmit Diversity Pilot CHannel	
F-PCH	Forward Paging CHannel	
F-SYNC	Forward SYNC CHannel	
F-CCCH	Forward Common Control CHannel	
F-BCCH	Forward Broadcast Control CHannel	
F-QPCH	Forward Quick Paging CHannel	
F-CACH	Forward Channel Assignment CHannel	
F-CPCCH	Forward Common Power Control CHannel	
R-ACH	Reverse Access CHannel	Montant
R-CCCH	Reverse Common Control CHannel	
R-EACH	Reverse Enhanced Access CHannel	

CDMA2000 - canaux logiques

- F-PICH (Pilot)
 - Permet de sélectionner la "meilleure" station de base.
 - Synchronisation identique à IS95 (PN_Offset)
 - Si plusieurs antennes pour une BS, plusieurs pilotes : F-TDPICH est alors nécessaire
- Le mobile se synchronise sur F-SYNC avec la base et utilise le canal F-BCCH pour récupérer les informations nécessaires et est ensuite en état "idle".
- Le mobile peut capter un appel grâce au Paging ou être à l'origine d'un appel. R-ACH sert à répondre au Paging ou à initier un appel

CDMA2000 - canaux logiques

- Service paquet : un utilisateur s'attache à un point d'accès et écoute (pas de réservation). Un slot transporte un F-QPCH pour l'informer de l'arrivée d'un paquet. Le terminal reçoit alors le message dans le F-CCCH
- Dans le sens montant, pour envoyer un message :
 - soit avec le canal R-EACH (accès aléatoire)
 - soit requête au R-ACH puis réponse par le F-CACH et envoi par le R-CCCH (utilisé par le seul utilisateur qui en a fait la demande – pas de collision)

CDMA2000 - canaux logiques

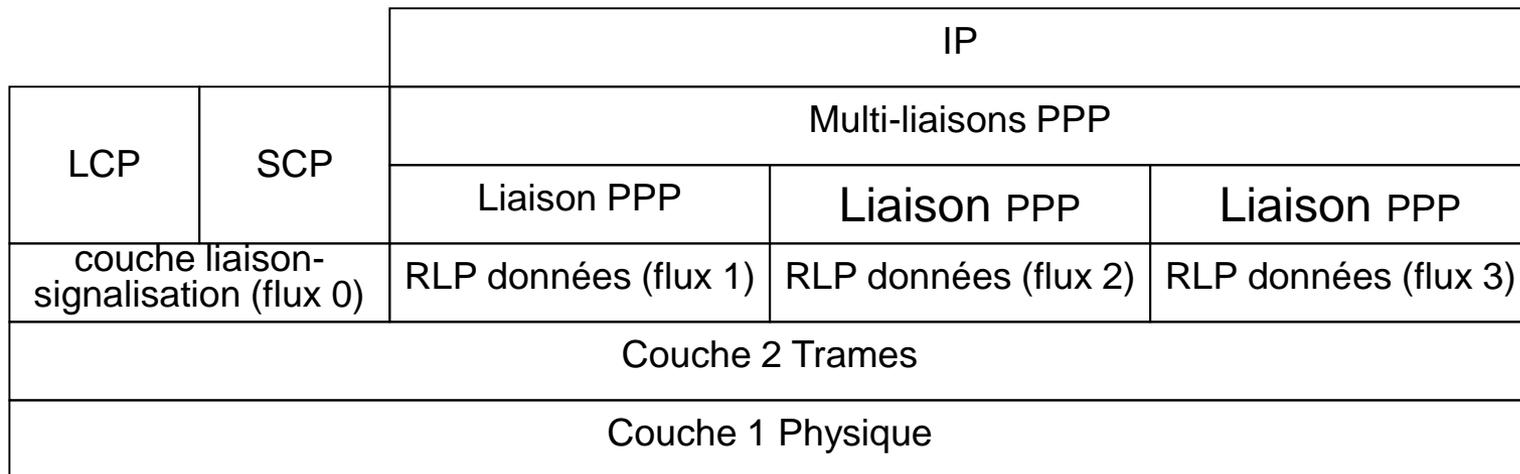
- D'autres canaux dédiés existent, par exemple :
 - F-FCH = Forward Fundamental Channel peut être attribué à un terminal. Pour des débits supérieurs, d'autres canaux F-SCH1, F-SCH2 (Supplement) peuvent être affectés
- A la demande d'un canal dédié, le terminal et le réseau négocient dans une procédure appelée "configuration de service" où sont définis le facteur d'étalement, le débit, la taille des trames, le type de code correcteur... pour la voie montante et descendante avec des numéros de configuration prédéfinis.

CDMA2000 - HDR

- High Data Rate : proposition de la société Qualcomm pour mettre en place un service IP sur la couche physique de CDMA2000. Le protocole IP à la fonction d'un réseau fédérateur ou de transport. Le CDMA2000 devient un réseau d'accès au transport IP.
- La complexité de gestion des différents canaux fait baisser le débit. Pour cela l'accès TDMA est introduit où tous les utilisateurs sont multiplexés dans le temps avec des intervalles modulables et les hauts débits sont envoyés dans les fréquences les plus élevées.

CDMA2000 - HDR

- Le protocole PPP (Point-to-Point Protocol) a été choisi pour s'intercaler entre CDMA2000 et IP
- 2 protocoles LCP (Link Control Protocol) et SCP (Stream Control Protocol) instruisent la signalisation
LCP négocie l'octroi d'une liaison radio avec tous les paramètres nécessaires. SCP contrôle la retransmission des segments perdus.
- RLP (Radio Link Protocol) se situe juste en dessous.



CDMA2000 - Réseau d'accès

- L'adresse IP d'un utilisateur est modifiée par le protocole IP Mobile.
- L'obtention et la résolution de l'adresse IP sont réalisées par des serveurs DHCP et DNS.
- Un serveur RADIUS sécurise les liaisons PPP.
- L'ensemble est régi par 2 protocoles SNMP (Simple Network Management Protocol) pour la gestion et HTTPS (HyperText Transfer Protocole Secure) pour la sécurité.
- CDMA a l'avantage de liaisons flexibles (multiporteuses, QoS adaptées à la demande et une interconnexion aisée avec IP
- HDR est une solution pour faire converger CDMA2000 et IP.

Perspectives

Consommation données

Figure 2. Cisco Forecasts 77 Exabytes per Month of Mobile Data Traffic by 2022

By 2022, they project that:

- Mobile will represent 20% of total IP traffic.
- The number of mobile-connected devices per capita will reach 1.5.
- The average global smartphone connection speed will surpass 40 Mbps.
- Smartphones will surpass 90% of mobile data traffic
- 4G traffic will be 71%, and 5G traffic will be 12% of the total mobile traffic

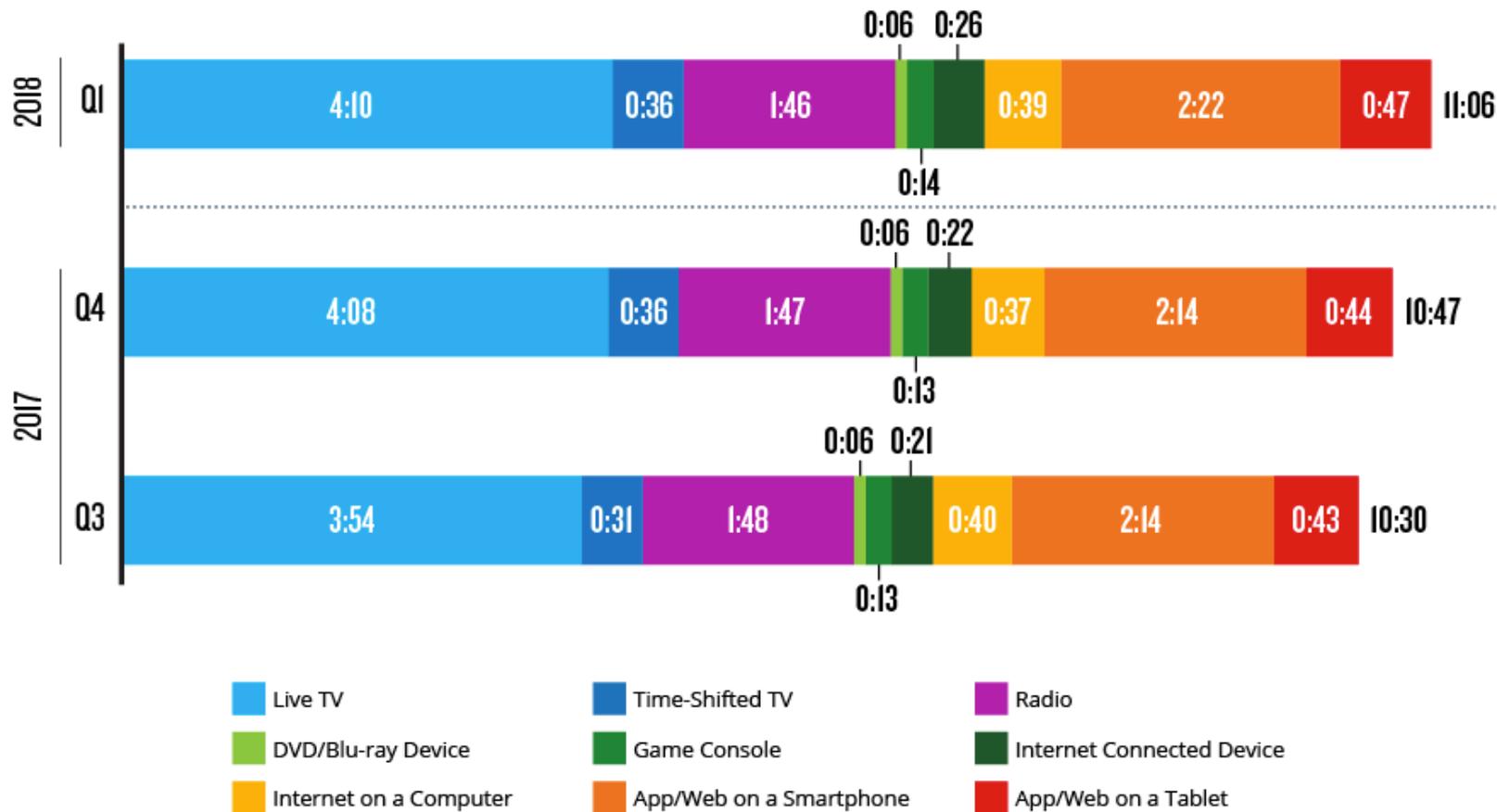


Source: Cisco VNI Mobile, 2019

1 Exaoctet = 10^9 Gigaoctets

AVERAGE TIME SPENT PER ADULT 18+ PER DAY

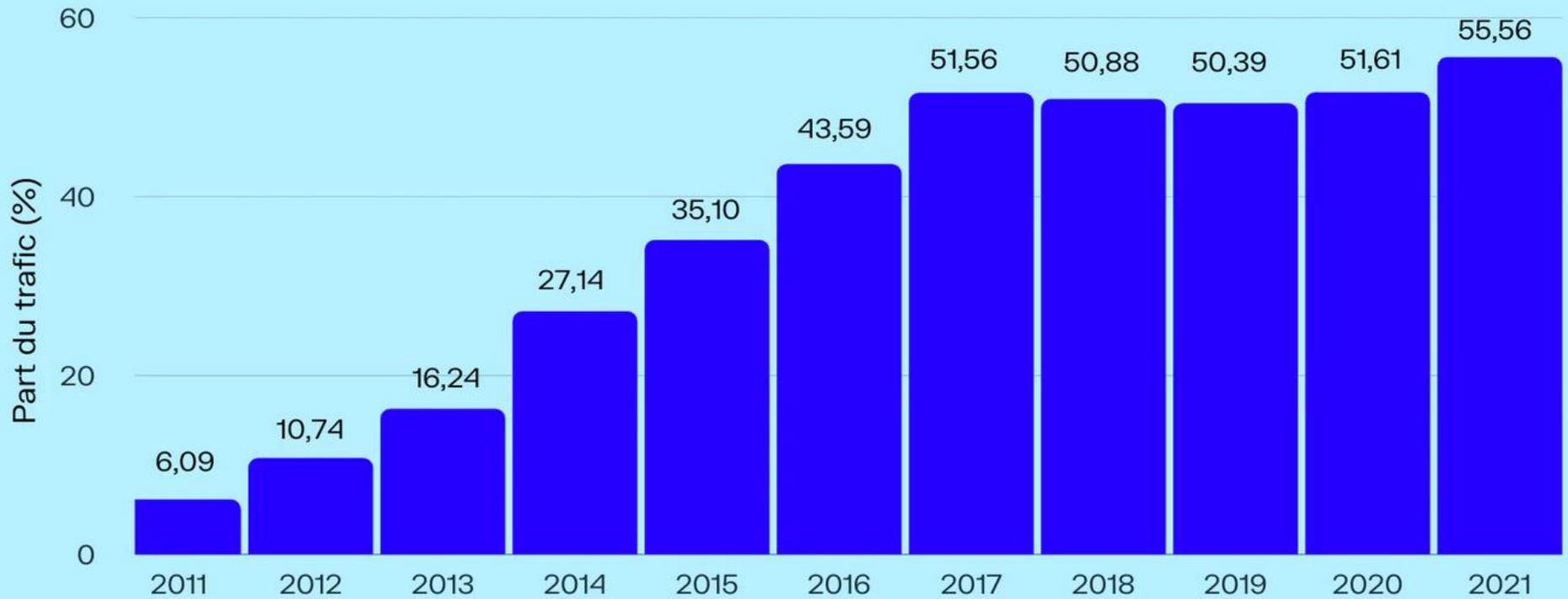
Based on Total U.S. Population



Note: Some amount of simultaneous usage may occur across devices.

Source: Q1 2018 Nielsen Total Audience Report

Part du trafic Internet mobile mondial entre 2011 et 2021

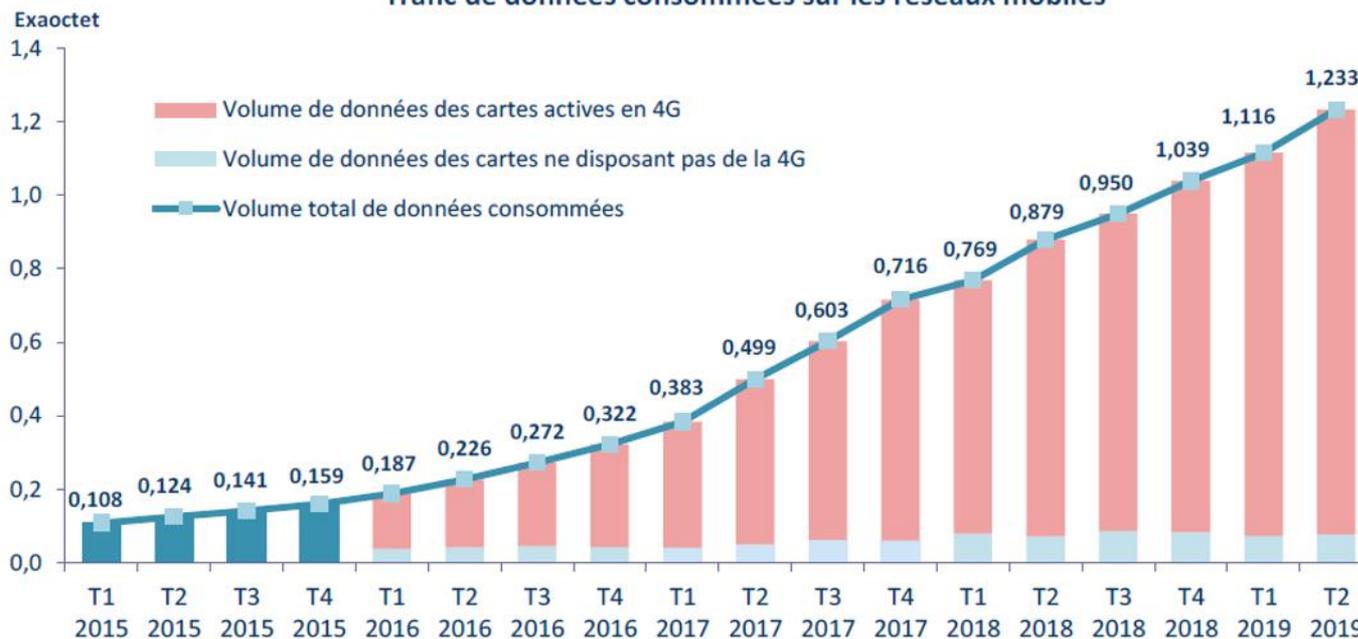


Source : Gs.statcounter.com

OBERLO

Trafic de données consommées sur les réseaux mobiles

Source : ARCEP



Taux annuel d'accroissement du volume de données mobiles

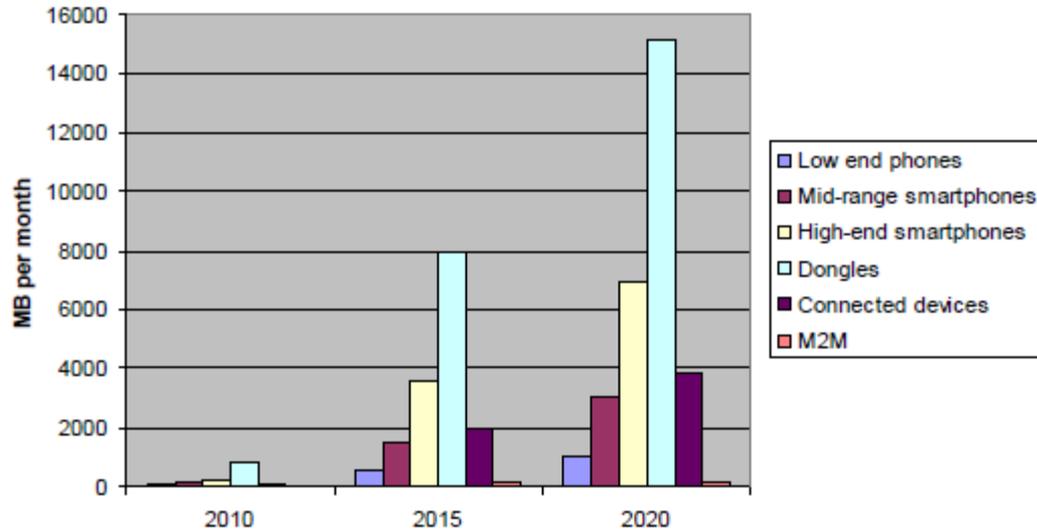


Consommation données

Abonnements

Global Base (million)	2010	2015	2020
Europe	1 033	1 222	1 427
Americas	915	1 166	1 437
Asia	2 579	3 825	4 957
Rest of the world	801	1 276	1 863
World	5 328	7 490	9 684

Representative Western European Country

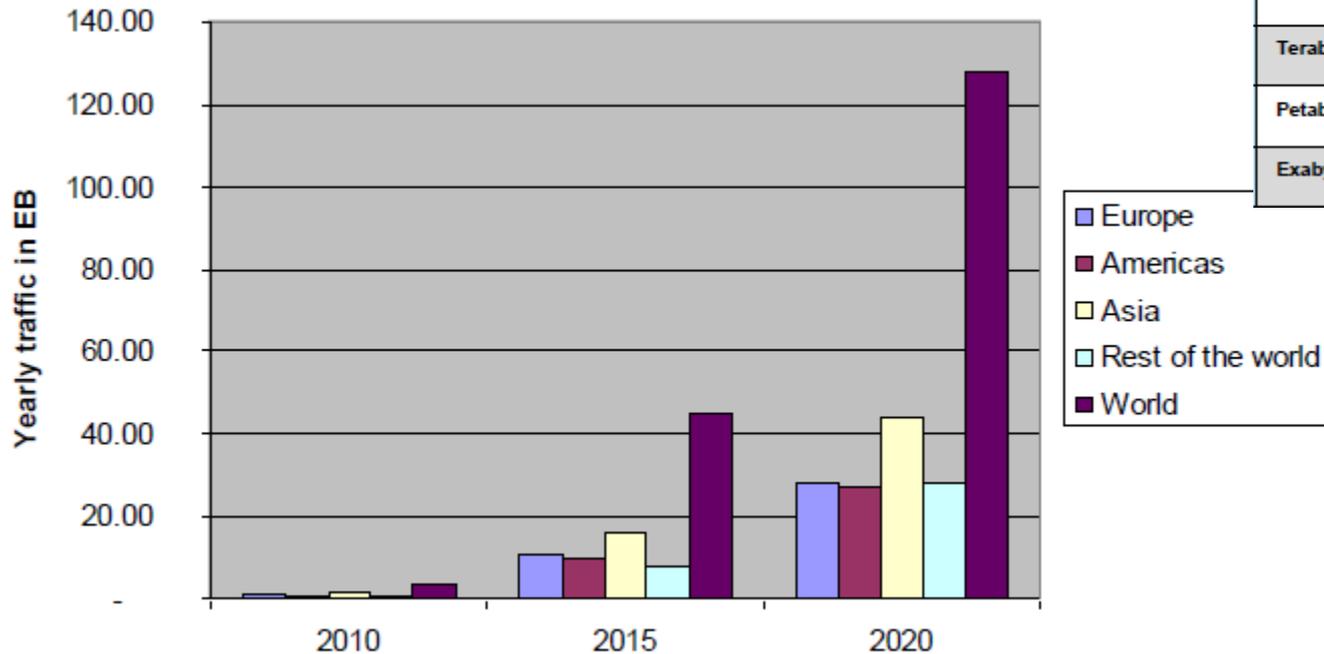


- A Representative Western European :
- ▶ 50 million population in 2010 and 50.2 million in 2020
 - ▶ 62.6 million subscriptions in 2010 and 85.4 million subscriptions in 2020.

Source : UMTS Forum Report

Consommation données

- Mobile : 2010 – 2020 (x33)

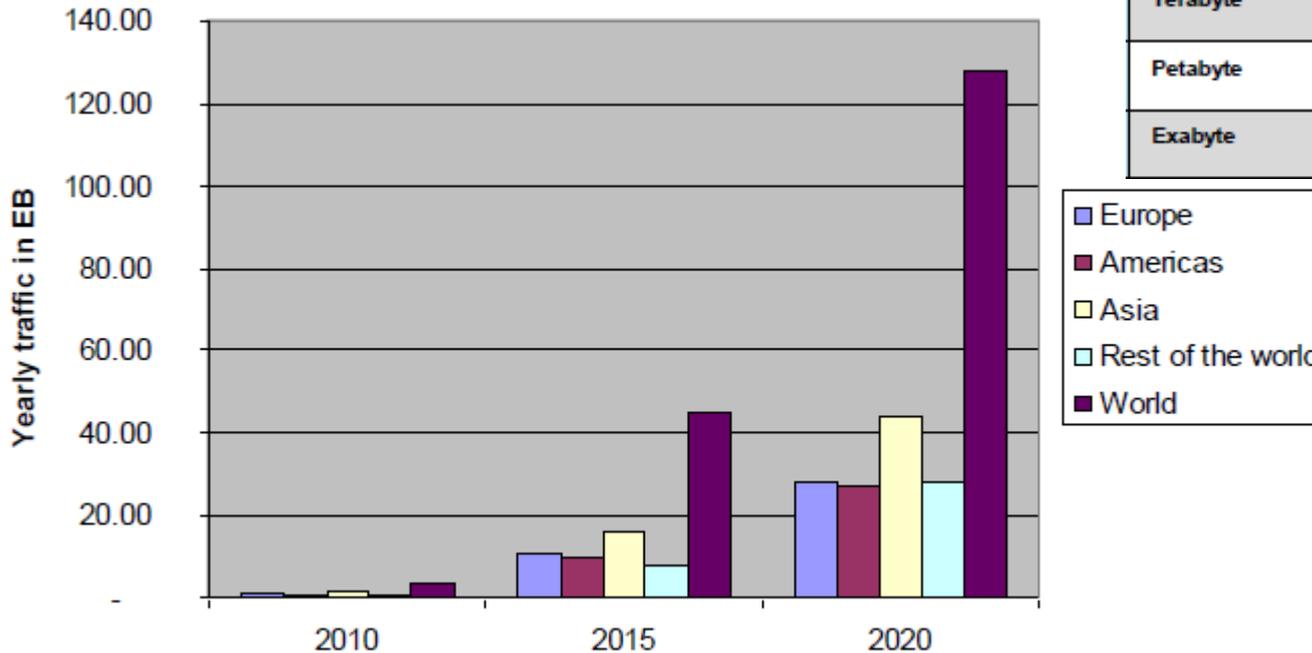


Kilobyte	kB	10^3
Megabyte	MB	10^6
Gigabyte	GB	10^9
Terabyte	TB	10^{12}
Petabyte	PB	10^{15}
Exabyte	EB	10^{18}

Consommation données

- Mobile : 2010 – 2020 (x33)
En 2020 : 127 EB= 127 000 000 TB

Kilobyte	kB	10 ³
Megabyte	MB	10 ⁶
Gigabyte	GB	10 ⁹
Terabyte	TB	10 ¹²
Petabyte	PB	10 ¹⁵
Exabyte	EB	10 ¹⁸



En 2025 : 351 EB +174% / 2020

Consommation données

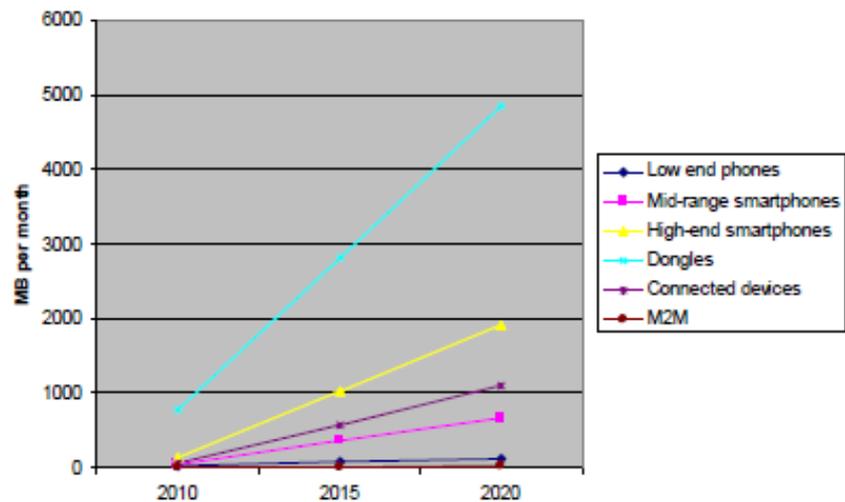
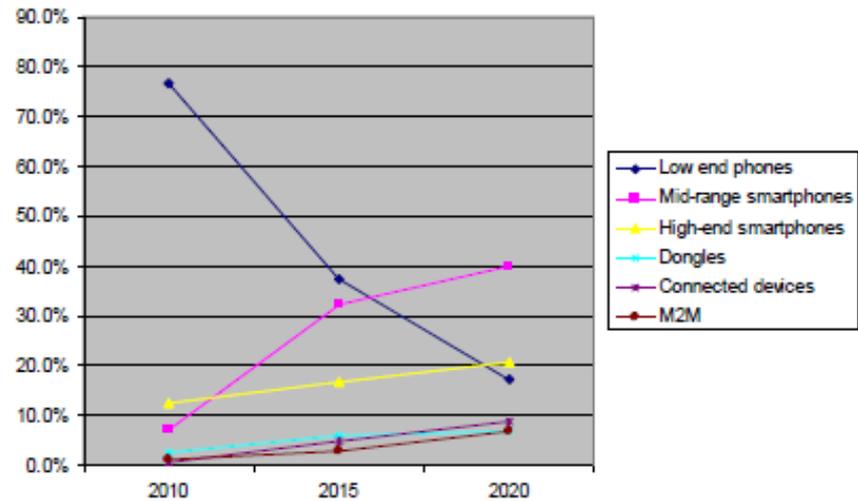
- Mobile en Europe : 2010 – 2020 (x67)
12540 TB / jour

Total daily mobile traffic	2010	2015	2020
Representative Western European Country (TB per day)	186	5,098	12,540

Daily mobile traffic per subscription	2010	2015	2020
Mobile Broadband (MB per day)	10	155	294
Dongles (MB per day)	26.7	265	503

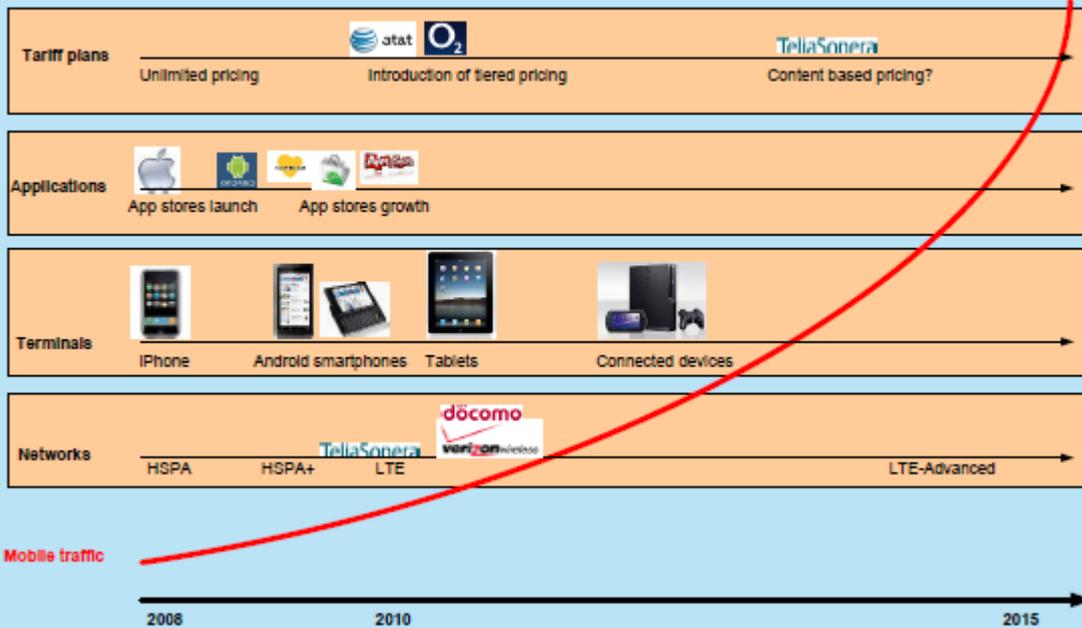
Consommation données

- Nature des terminaux
- Consommation en fonction de la nature des terminaux

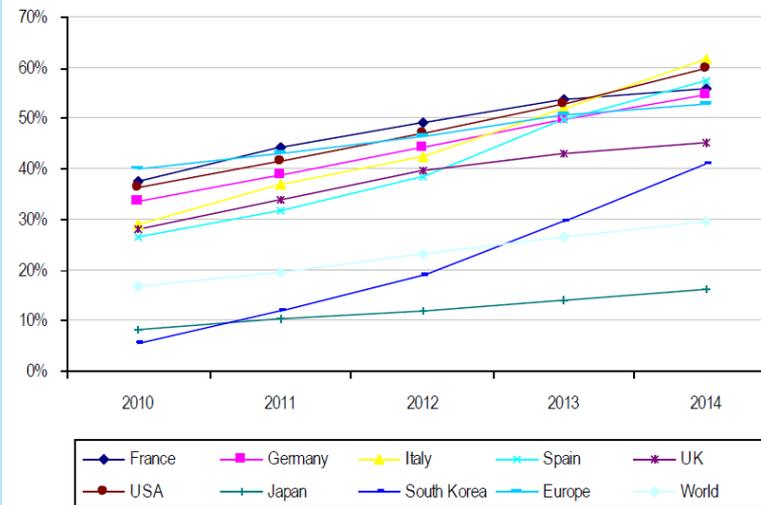


Acteurs du domaine

Enablers of mobile Internet

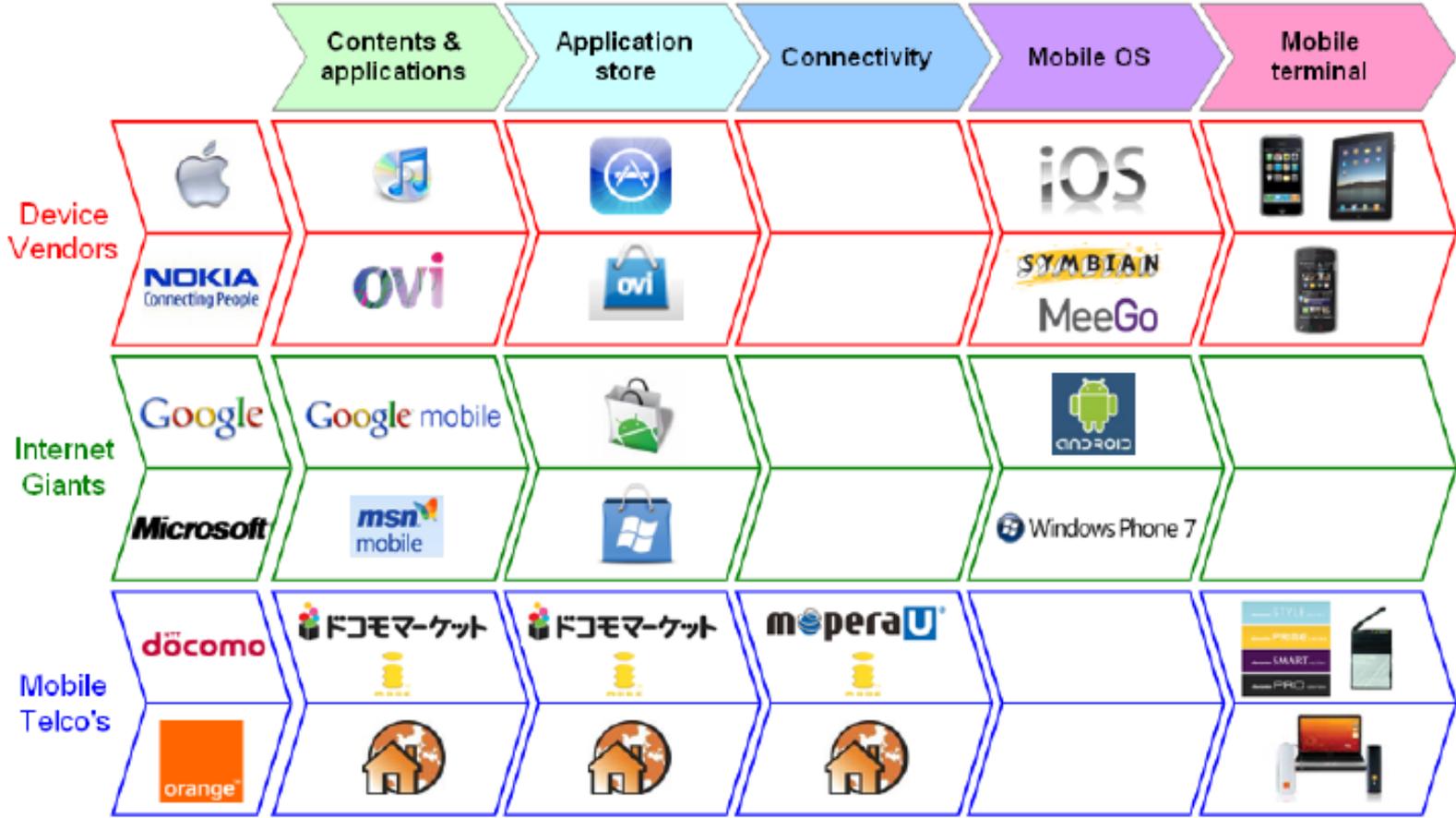


Part de marché des Smartphones



Acteurs du domaine

- Evolution

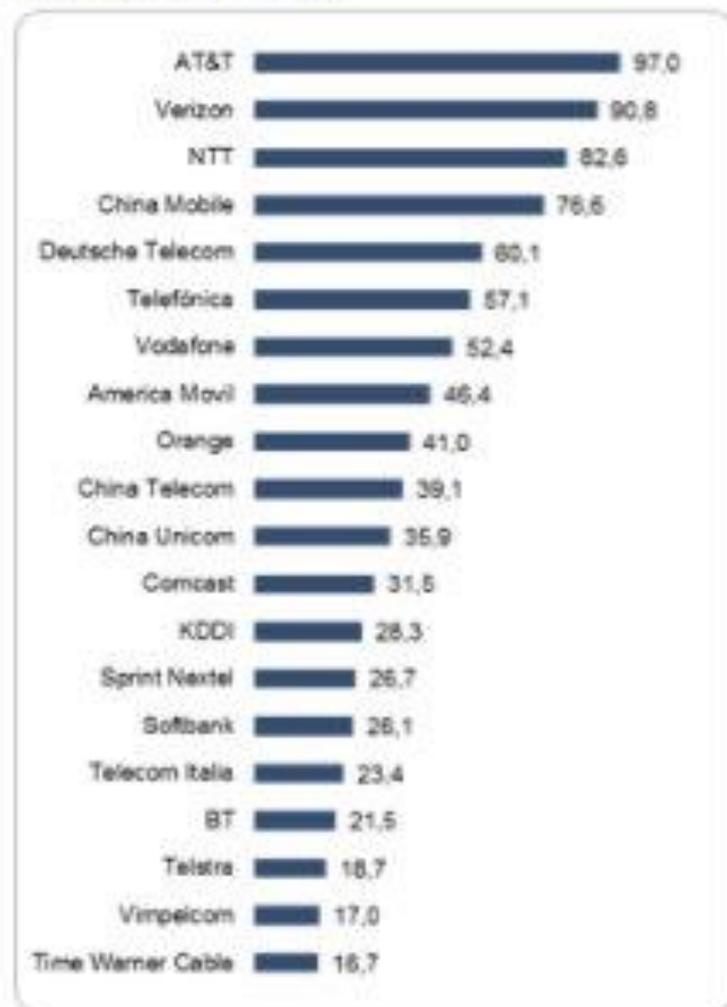


Operator-group ranking, consolidated ownership, Q2 2014

		Connections (million) ¹	Rank	12-month mobile revenue (£ billion)	Rank
1	China Mobile, China	790.6	1	£66.4	1
2	Vodafone Group ³	435.9	2	£42.1	5
3	China Unicom, China	295.0	3	£21.5	10
4	Telefónica Group	249.4	6	£30.2	7
5	América Móvil Group ³	266.9	5	£25.5	9
6	Deutsche Telekom Group ³	146.9	12	£30.8	6
7	Orange Group	184.6	8	£16.1	11
8	AT&T, United States	116.6	16	£44.8	3
9	VimpelCom Group	218.2	7	£11.4	14
10	China Telecom, China	180.2	9	£16.0	12
11	Bharti Airtel Group	287.2	4	£7.9	18
12	SoftBank Group	105.0	20	£43.0	4
13	Verizon Wireless, United States	104.6	22	£52.4	2
14	Telenor Group	175.6	10	£8.7	17
15	MTN Group ³	169.7	11	£8.9	16
16	Etisalat Group ^{2, 3}	119.7	15	£7.1	21
17	Telecom Italia Group	104.8	21	£10.6	15
18	Sistema Group ³	113.9	18	£7.6	19
19	NTT DOCOMO Group	63.6	31	£26.6	8
20	Hutchison Whampoa Group	72.7	26	£6.7	23
21	Ooredoo Group	93.2	23	£5.0	30
22	TeliaSonera Group ³	64.2	30	£6.4	24
23	au (KDDI), Japan	41.0	41	£12.3	13
24	Telkomsel, Indonesia	137.4	14	£3.3	41
25	Axiata Group ³	115.7	17	£3.6	38
26	MegaFon Group	70.2	28	£5.5	28
27	Idea Cellular, India	139.0	13	£2.8	47
28	Oi Group ^{2, 3}	62.4	33	£5.2	29
29	KPN Group ³	38.7	43	£6.9	22
30	SK Telecom, South Korea ³	28.0	46	£7.6	20

Source: GSMA Intelligence

Classement des 20 premiers opérateurs télécoms selon leur chiffre d'affaires en 2013 (milliards EUR)



Classement des pays selon le nombre de clients mobiles (millions)

	2009	2013	2015
World	4 535,8	6 605,9	7 209,6
1 China	747,4	1 233,9	1 391,8
2 India	525,1	886,3	952,5
3 USA	285,6	339,1	355,8
4 Indonesia	146,0	306,8	340,8
5 Brazil	174,0	271,1	282,6
6 Russia	207,9	242,5	256,6
7 Japan	110,6	141,1	152,1
8 Nigeria	74,5	124,0	158,0
9 Germany	108,3	115,2	117,6
10 Mexico	83,5	103,7	109,2
11 Italy	90,6	97,9	100,6
12 UK	81,7	85,3	86,6
13 France	61,5	76,8	81,4
14 South Africa	51,0	69,4	70,8
15 Turkey	62,9	69,4	73,4
16 Argentina	48,2	63,8	68,0
17 Poland	45,1	55,0	57,2
18 South Korea	47,9	54,7	56,3
19 Spain	54,6	52,4	52,8
20 Saudi Arabia	44,8	51,8	55,5

Source : IDATE, Marché mondial des services et acteurs télécoms, juin 2014

[Lien](#)

[Lien](#)

UMTS

UMTS

- (*Universal Mobile Telecommunication System*)
- Jusqu'en 1995 : définition des objectifs et contraintes des aspects essentiels de l'UMTS : cadre d'application, services, interfaces radio, plate-forme réseau, gestion, systèmes satellites, etc.
- Spécifications détaillées en 1998 : premiers produits sortent et disponibilité des services à partir de 2005.
- Le principe de l'UMTS est souvent résumé dans la formule *anyone, anywhere, anytime*, signifiant que chacun doit pouvoir joindre/être joint, n'importe où et n'importe quand. Le système doit permettre l'acheminement des communications indépendamment de la localisation de l'abonné, que celui-ci se trouve chez lui, au bureau, en avion, ...

UMTS

- L'UMTS doit répondre aux besoins de toutes les populations d'utilisateurs et en particulier il doit regrouper les fonctionnalités et avantages des systèmes existants :
- qualité de parole élevée et couverture étendue comme les systèmes cellulaires,
- appels de groupe, diffusion de messages, accès rapide et faibles coûts comme les systèmes de radiocommunications privés,
- terminaux de petite taille et couverture dense à l'instar des systèmes de radiomessagerie unilatérale,
- communications de débit élevé et d'excellente qualité comme pour les systèmes sans fil,
- couverture mondiale des systèmes satellites,
- accès à des sites distants comme pour les réseaux de transmission de données.

UMTS

- Quelques caractéristiques importantes permettent ainsi d'identifier les systèmes de troisième génération :
- interface radio pouvant s'adapter aux différentes méthodes d'accès multiple (FDMA/TDMA/CDMA) en fonction des sites,
- terminaux capables de télécharger leur système d'exploitation en fonction du réseau et de l'évolution du système,
- architecture s'appuyant sur les principes du réseau intelligent,
- capacité d'interfonctionnement avec le réseau fixe de façon totalement transparente pour les usagers,
- portabilité des services de type RNIS.

UMTS

- L'UMTS sera donc un réseau structuré autour des trois concepts de réseaux suivants
- réseaux d'accès (*Access Networks*) assurant la transmission de base des informations (signalisation et trafic), la commutation locale pour l'accès au réseau fixe,
- réseaux fédérateurs (*Backbone Networks*) qui intègrent l'infrastructure de base du réseau fixe et les ressources radio (contrôle d'appel et gestion des connexions typiquement),
- réseaux de services (*Services Networks*) assurant le stockage et la gestion des données ainsi que le traitement des services offerts aux usagers.

UMTS

- Cette norme repose sur les technologies W-CDMA (combinaison de CDMA et FDMA) et TD-CDMA (combinaison de TDMA, CDMA et FDMA).
- Le principe de transmission repose sur l'étalement de spectre et la modulation QPSK.
- Les fréquences utilisées sont 2 bandes appairées (1920-1980 MHz et 2110-2170 MHz) et 2 bandes non appairées (1900-1920 MHz et 2010-2025 MHz).
- Cette technologie va permettre la transmission de données en mode paquet (et en mode circuit) à des débits d'environ 2 Mbit/s.
- Principales innovations

Consortium 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*)

- ARIB (Association of Radio Industries and Business) et TTC (Telecommunication Technology Committee) pour le Japon
- ATIS (Alliance for Telecommunications Industry Solutions) pour les États-Unis
- CWTS (China Wireless Telecommunication Standard Group) pour la Chine
- ETSI (European Telecommunications Standards Institute) pour l'Europe
- TTA (Telecommunication Technology Association) pour la Corée du Sud.



UMTS

Consortium 3GPP

1^{ère} version : UMTS Release 99

- utilise la technologie W-CDMA (Wideband CDMA)
- basée sur une technique d'accès multiples CDMA avec possibilité de multiplexage FDD et TDD.
- Le signal utile étalé sur une largeur de bande de 3.84 MHz avant modulation
- La porteuse occupe un canal de 5 MHz.
- Le W-CDMA autorise la connexion simultanée à plusieurs cellules

Version limitée à un débit maximal de 384 Kbits/s dans le sens montant et le sens descendant.

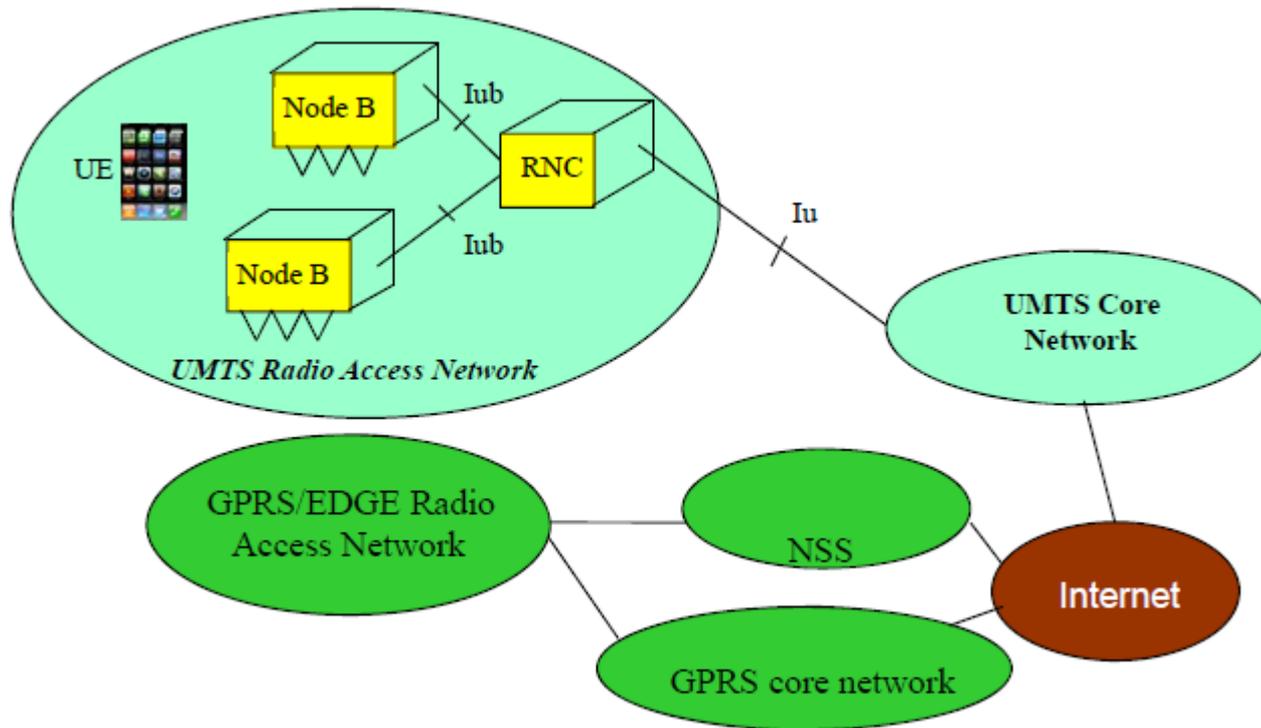
UMTS

- Classes de service

Classe de trafic	Conversational	Streaming	Interactif	Background
Caractéristiques	Préserver les relations temporelles entre les entités du flux Délai très courts	Préserver les relations temporelles entre les entités du flux Taux d'erreurs faible	Modèle de requête/réponse Taux d'erreurs nul	Aucune contrainte de temps Taux d'erreurs nul
Exemples d'applications	Téléphonie, Vidéo téléphonie, Jeux vidéo	Streaming multimédia	Web browsing, Jeux en réseau	Téléchargement, emails

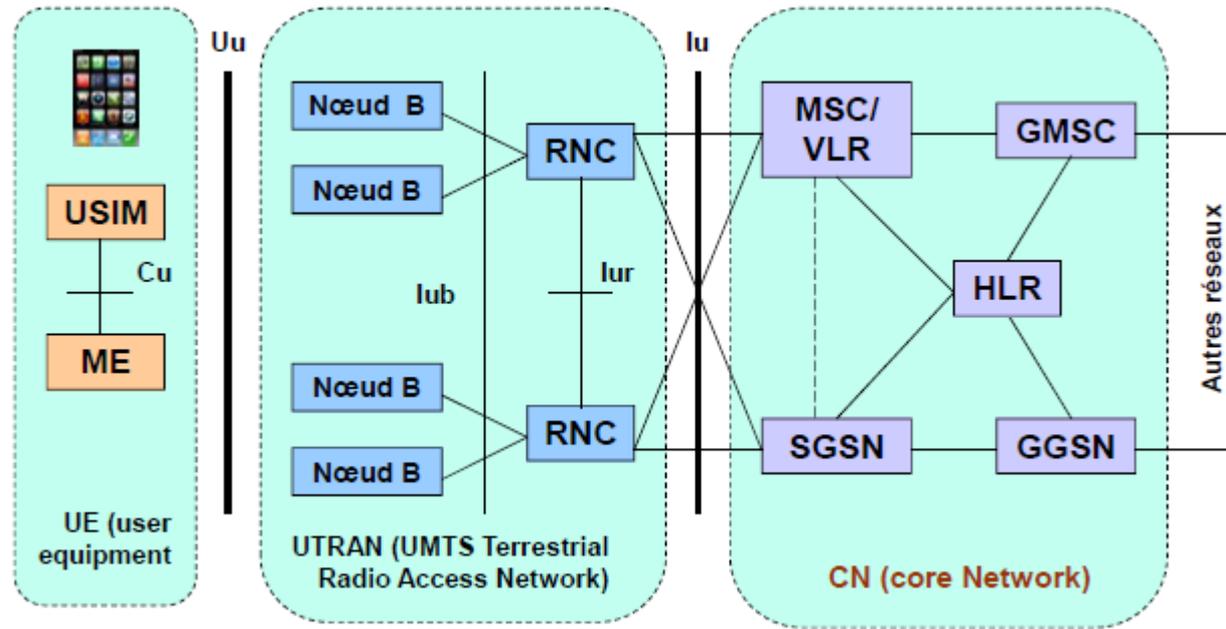
UMTS

- Architecture



UMTS

- Architecture



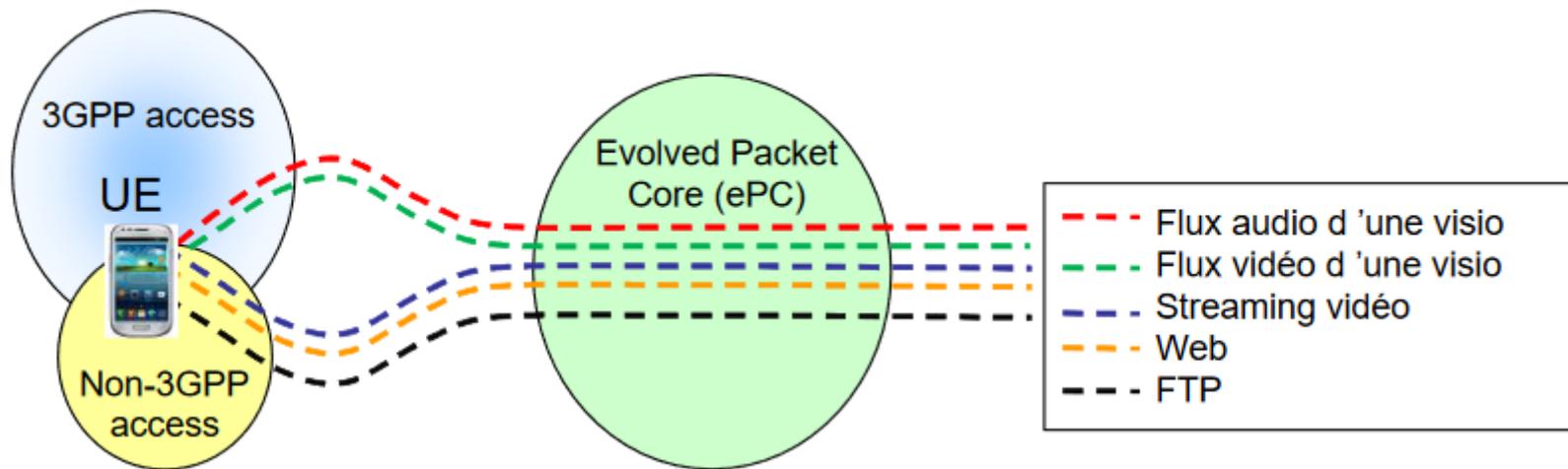
Node B (Station de base)

RNS (Radio Network SubSystem) : Node B + RNC (Radio Network Controller)

UTRAN (1 ou plusieurs RNC)

IP Flow Mobility

- Exemple



UMTS Evolutions

UMTS : débit vite limité

→ 2 évolutions majeures :

❑ HSPA (*High Speed Packet Access*)

- HSDPA (High Speed Downlink Packet Access)
pour la voie descendante
- HSUPA (High Speed Uplink Packet Access)
pour la voie montante

❑ HSPA+ (*High Speed Packet Access+*)

HSPA

Normalisation par 3GPP :

- Release 5 (2002) évolution HSDPA pour le réseau d'accès UMTS
- Release 6 (2005) évolution HSUPA pour le réseau d'accès UMTS
- Release 7 : introduction du HSPA+ MIMO

Comparaison des technologies

	GSM/GPRS/EDGE	UMTS Release 99	HSPA	HSPA+ Release 8
Débit maximal UL	118 Kbit/s	384 Kbit/s	5,8 Mbit/s	11,5 Mbit/s
Débit maximal DL	236 Kbit/s	384 Kbit/s	14,4 Mbit/s	42 Mbit/s
Latence	300 ms	250 ms	70 ms	30 ms
Largeur de canal	200 kHz	5 MHz	5 MHz	5 MHz avec possibilité de deux canaux simultanés
Technique d'accès multiples	FDMA/TDMA	CDMA	CDMA/TDMA	CDMA/TDMA
Modulation DL Modulation UL	GMSK 8PSK	QPSK BPSK	QPSK, 16QAM BPSK, QPSK	QPSK, 16QAM, 64QAM BPSK, QPSK, 16QAM
Bandes de fréquences usuelles (MHz)	900/1800	900/2100	900/2100	900/2100

LTE

Long Term Evolution

UMTS → LTE

Passer en mobile tout IP

(plus de conversion réseau classique / IP)

Besoin d'un système agile en fréquence

Solution :

- WCDMA remplacé par OFDM
- Supprimer la limitation de 5MHz pour la largeur de canal et optimiser l'utilisation de canaux plus étroits

- 3GPP release 8 :

Naissance de LTE (Long Term Evolution) et HSPA (High-Speed Packet Access)

Introduction de MIMO et 64-QAM

- 3GPP release 9 :

auto-organisation et introduction de nouvelles cellules (eNodeB et Home eNodeB).

Introduction de nouvelles interfaces OFDM permettant d'atteindre les débits de 50-100 Mb/s

- 3GPP release 10 :

LTE Advanced (2010) conforme à IMT (International Mobile Telecommunications Advanced)

Multiporteuse sur HSDPA (jusqu'à 4 porteuses : 20 MHz)

- 3GPP release 11 :

«Overview of 3GPP Release 11» V0.0.8, 09/2011
définit la réalisation de LTE

- 3GPP release 12 :

«Overview of 3GPP Release 12»

V0.0.5, 09/2012 récentes extensions

LTE - Attentes

- **Débits attendus :**

- 100 Mbit/s en voie descendante pour 20Mhz
soit une efficacité spectrale de 5 bit/s/Hz

- 50 Mbit/s en voie montante pour 20Mhz
soit une efficacité spectrale de 2,5 bit/s/Hz

Amélioration du débit moyen, du débit en bord de cellule

- **Latence :** réduction

- <100 ms plan de contrôle (état veille -> actif)

- <5 ms plan usager (délai transmission paquet IP de petite taille)

- **Agilité en fréquence** (sens montant et descendant)

- 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz

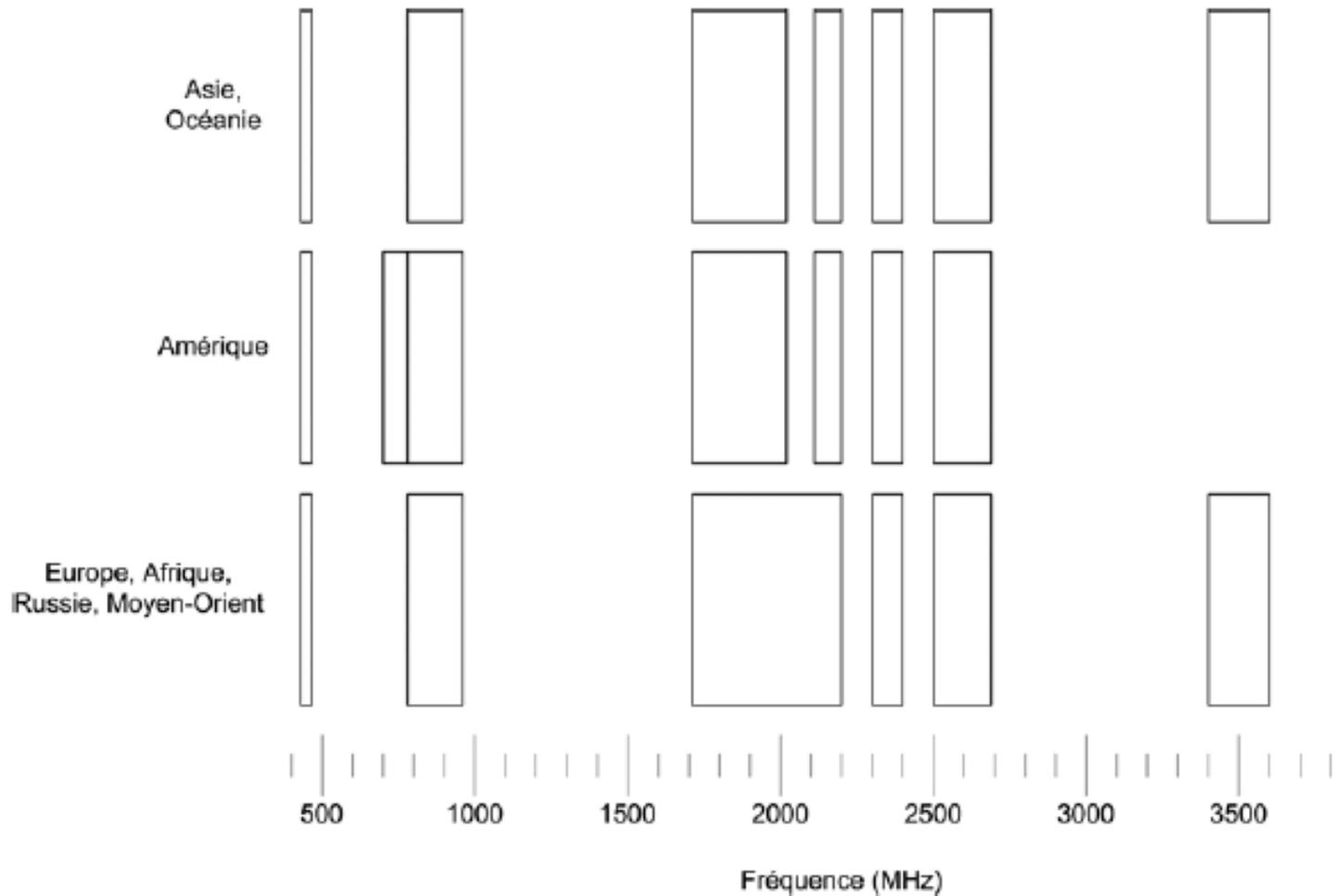
LTE - Attentes

- Mobilité
 - Optimisé pour 0 à 15 km/h
 - 350km/h voire 500km/h
 - Gestion handover améliorée

temps d'interruption de service lors d'un handover entre LTE et GSM ou UMTS :

- < 300 ms pour les services temps-réel
- < 500 ms pour les autres services

Bandes de fréquences (Monde)

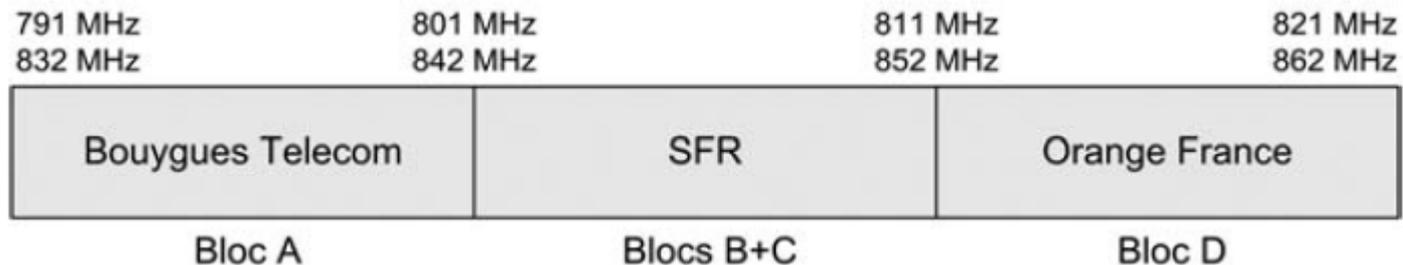


Bandes de fréquences (Europe)

- Harmonisation niveau européen :
 - Bandes 800 MHz (2010) et 2,6 GHz (2008)
- 2,6 GHz
 - un duplex de 70 MHz de spectre FDD
 - 50 MHz de spectre TDD
- 800 MHz (bande plus étroite)
 - un duplex de 30 MHz de spectre FDD
 - Pas de contrainte TDD
 - Meilleure couverture, mais bande plus étroite partagée par tous les opérateurs, bande proche de la TNT

Bandes de fréquences (France)

- 800 MHz
 - Meilleure couverture et propagation, mais bande plus étroite partagée par les opérateurs,
 - Bande proche de la TNT
 - Prix plus élevé, total de 2 639 087 005 €
 - 10 MHz (duplex) par opérateur



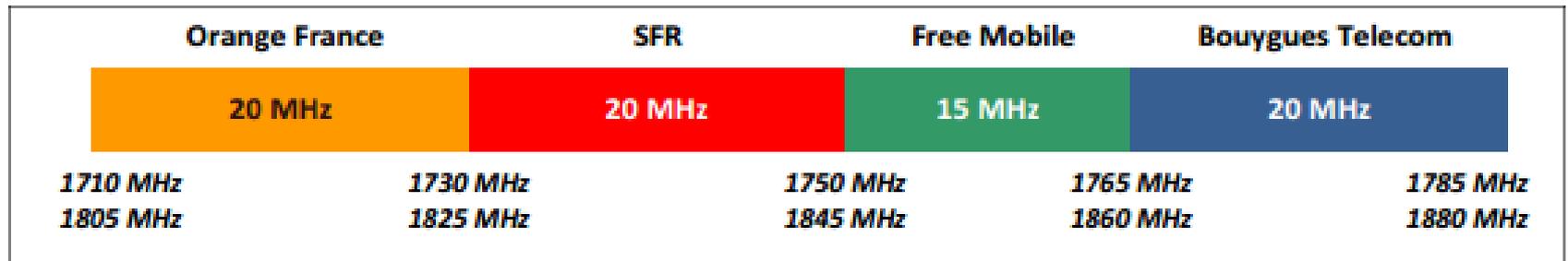
Bandes de fréquences (France)

- 2,6 GHz
 - Bande de 70 MHz (duplex), meilleur débit
 - Bande valorisée à 936 129 513 €.
 - Orange France et Free Mobile bénéficient d'un duplex de 20 MHz tandis que SFR et Bouygues Télécom en ont un de 15 MHz.

2500 MHz 2620 MHz	2515 MHz 2635 MHz	2535 MHz 2655 MHz	2550 MHz 2670 MHz	2570 MHz 2690 MHz
SFR	Orange France	Bouygues Telecom	Free Mobile	

Bandes de fréquences (France)

- Autorisation récente de l'ARCEP : utilisation d'une 3^{ème} bande de fréquence 1800 Mhz (utilisée pour la 2G)



Avantage pour Bouygues déjà présent dans cette bande.
Coût : part fixe de 3231€ / KHz alloué
+ part variable 1% du CA dans la 4G

Bandes de fréquences (France)

- Bilan

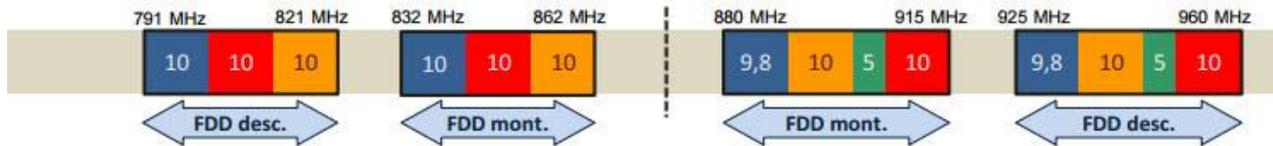
	BANDES BASSES		BANDES HAUTES			TOTAL (DONT BANDES HAUTES)
	800 MHz	900 MHz	1800 MHz	2100 MHz	2600 MHz	
BOUYGUES TELECOM	2 x 10	2 x 10	2 x 26,6*	2 x 14,8 + 5	2 x 15	157,8 MHz (117,8)
ORANGE FRANCE	2 x 10	2 x 10	2 x 23,8	2 x 19,6 + 5	2 x 20	171,8 MHz (131,8)
FREE MOBILE	0**	2 x 5	0	2 x 5	2 x 20	60 MHz (50)
SFR	2 x 10	2 x 10	2 x 23,8	2 x 19,8 + 5	2 x 15	162,2 MHz (122,2)

* *Bouygues Telecom dispose de 26,6 MHz duplex dans les zones très denses et de 21,6 MHz duplex sur le reste du territoire*

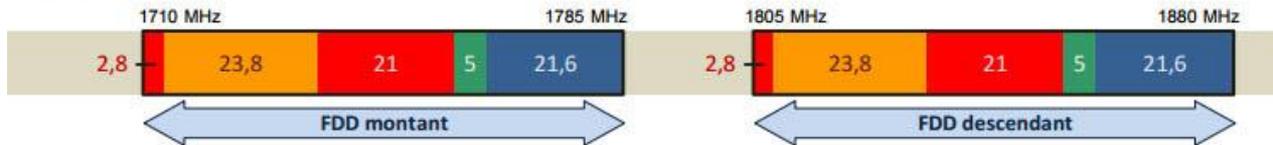
** *Free Mobile dispose, de droit, d'un accès en itinérance sur les fréquences à 800 MHz de SFR au sein de la zone de déploiement prioritaire ».*

Bandes de fréquences (France)

Bandes 800 MHz et 900 MHz



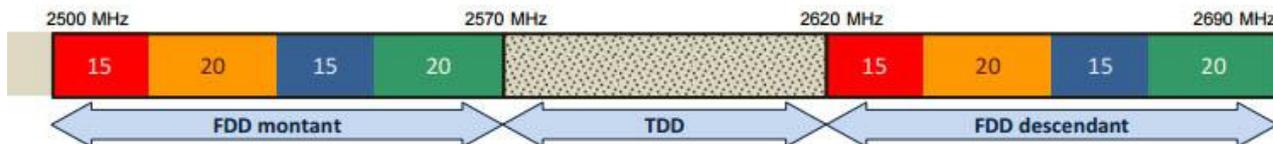
Bande 1800 MHz



Bande 2,1 GHz



Bande 2,6 GHz



Fréquences en OR (bande des 700MHz)

- Novembre 2015 : le prix a atteint 466 millions d'euros par bloc de 5 MHz duplex après 11 tours d'enchère (+5M€/tour/bloc), soit au total, 2,796 milliards d'euros.

Free Mobile : 2 blocs
Orange : 2 blocs

Bouygues Telecom : 1 bloc
SFR : 1 bloc

4 positions possibles dans la bande :



Les lauréats indiquent le montant qu'ils sont prêts à payer pour avoir leur 1^{er} choix. S'ils obtiennent leur 2^e choix, ils paieront 2/3 de ce montant, 3^e choix, 1/3, dernier choix, ils ne paieront rien.

Services

- Nouveaux services à inventer...
- Qualité de service :
 - Service temps réel (appel voix, appel vidéo)
tolère les erreurs de transmission, mais délai de transmission court

GBR (Guaranteed Bit Rate), ou non GBR

Débits

- Dépend de la modulation, du nombre de flux indépendants, capacité du terminal (traitement et mémoire)
- 5 catégories en Release 8
(les terminaux indiquent leurs capacités)

Catégorie d'UE	Débit crête (Mbit/s)		Modulations		Nombre d'antennes de réception	Nombre maximal de couches spatiales en DL
	DL	UL	DL	UL		
1	10	5	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM	2	1
2	50	25			2	2
3	100	50			2	2
4	150	50			2	2
5	300	75		QPSK, 16QAM, 64QAM	4	4

Débits

- Efficacité spectrale maximale d'un terminal LTE

Voie	Configuration d'antennes (modulation)	Efficacité spectrale crête (bit/s/Hz)
DL	2x2 (64QAM)	7.5
	4x4 (64QAM)	15.0
UL	1x2 (16QAM)	2.5
	1x2 (64QAM)	3.75

- Efficacité spectrale maximale en bord de cellule

Voie	Configuration d'antennes	Efficacité spectrale cellulaire (bit/s/Hz/cellule)		Efficacité spectrale en bordure de cellule (bit/s/Hz/UE)	
		FDD	TDD	FDD	TDD
DL	2x2	2.23	2.17	0.079	0.083
	4x2	2.53	2.52	0.100	0.096
	4x4	3.41	3.28	0.143	0.154
UL	1x2	1.33	1.24	0.047	0.045
	1x4	2.00	1.83	0.075	0.064

Capacité voix

- LTE : Capacité voix en VoIP

Capacité VoIP (nombre d'UE/cellule/MHz)	
FDD	TDD
69	67

- Exemple : sur une bande 10 MHz
(si pas d'autre service ou traffic)
 - FDD 690 communications
 - TDD 670 communications

Latence

- Latence du plan usager :
durée des procédures liées à l'émission et la réception d'un paquet sur l'interface radio
- Latence du plan de contrôle :
temps nécessaire aux procédures d'activation de la connexion

Latence du plan usager (ms)		Latence du plan de contrôle pour la transition de l'état de veille à actif (ms)	
FDD	TDD	FDD	TDD
< 5	≤ 6.2 en DL ≤ 9.5 en UL	80	85

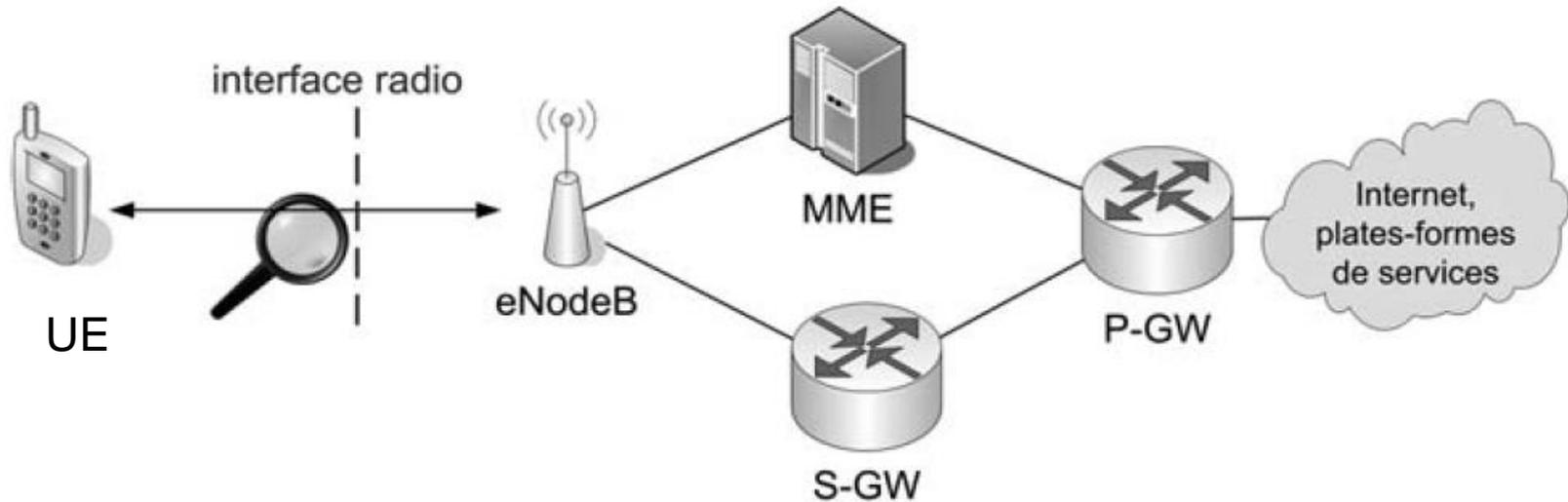
Handover

- Temps d'interruption du plan usager (interruption de la communication que peut subir un utilisateur)

Temps d'interruption du plan usager lors d'un handover (ms)	
FDD	TDD
10.5	12.5

Temps les plus courts mesurés

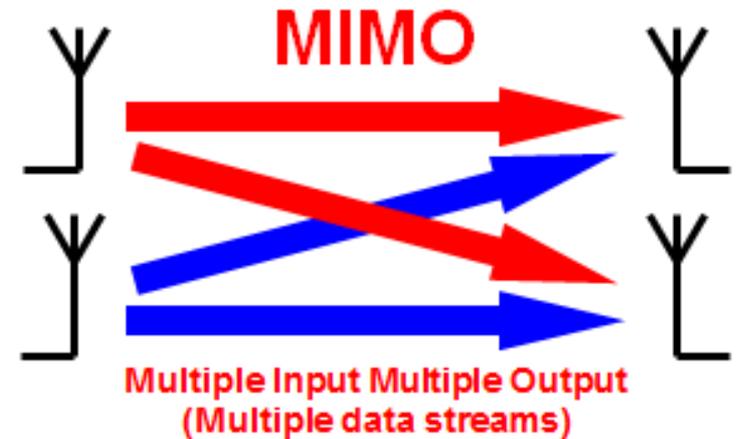
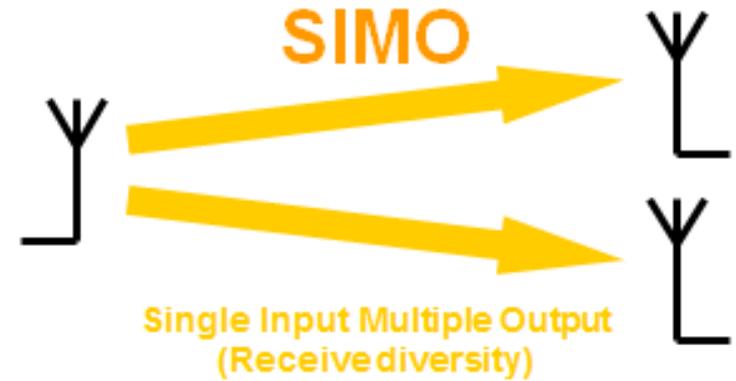
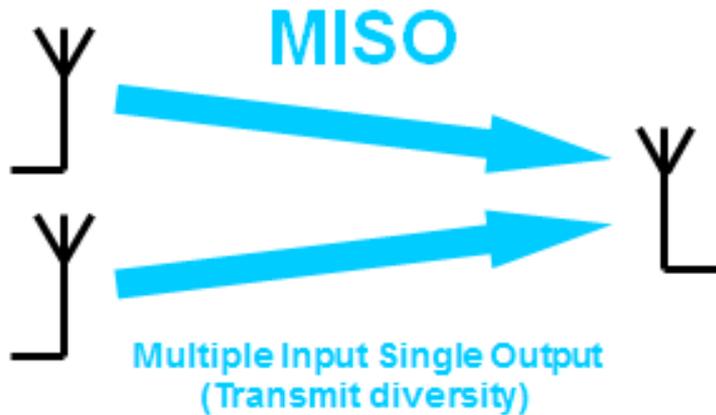
LTE - Architecture



- UE : User Equipment
- S-GW (Serving Gateway)
- MME (Mobility Management Entity)
- P-GW (PDN Gateway)

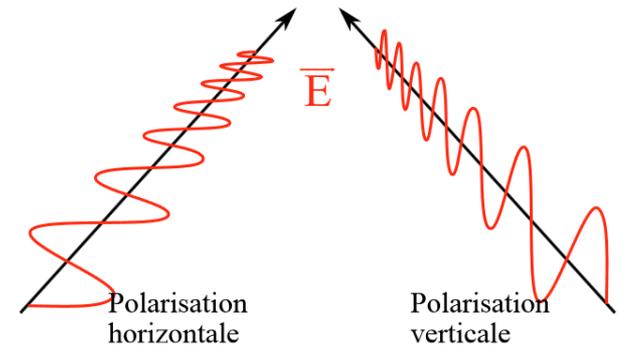
- HSS (Home Subscriber Server)
- ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function)
- ePDG (Evolved Packet Data Gateway)

LTE : MIMO

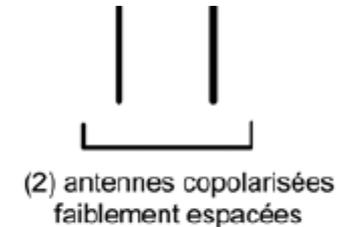
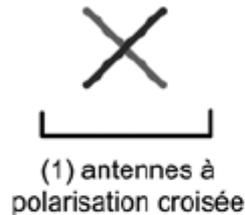


LTE : MIMO

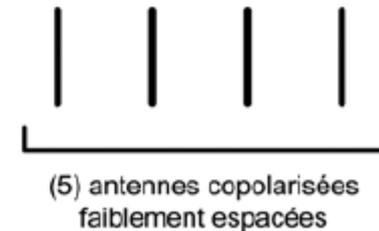
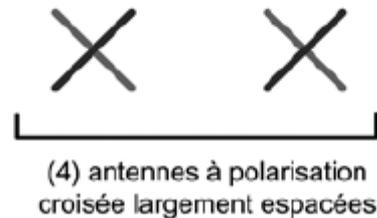
- Polarisation des antennes
- En fonction des angles d'arrivée :
décalage temporel
mesure de corrélation entre antennes



2 antennes

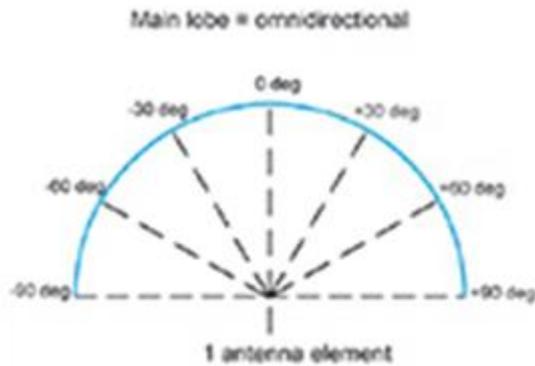


4 antennes

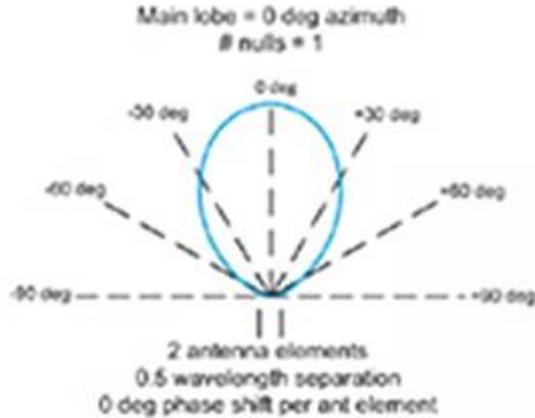


- Exploitation de plusieurs antennes en émission et en réception :
MIMO : Multiple Input Multiple Output, principe appelé multiplexage spatial

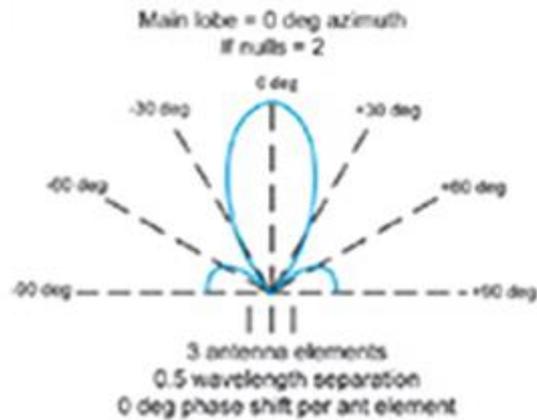
LTE : MIMO



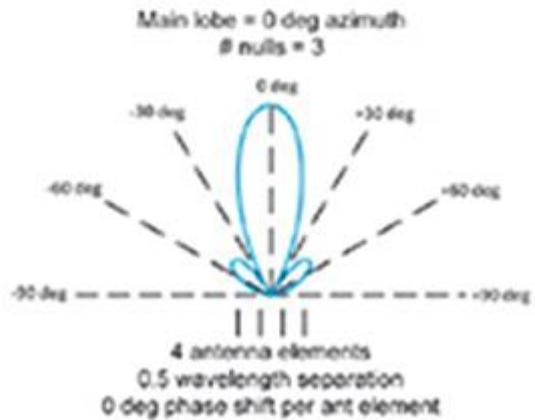
(a)



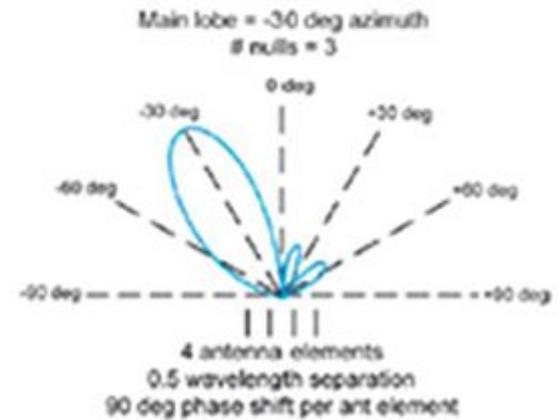
(b)



(c)

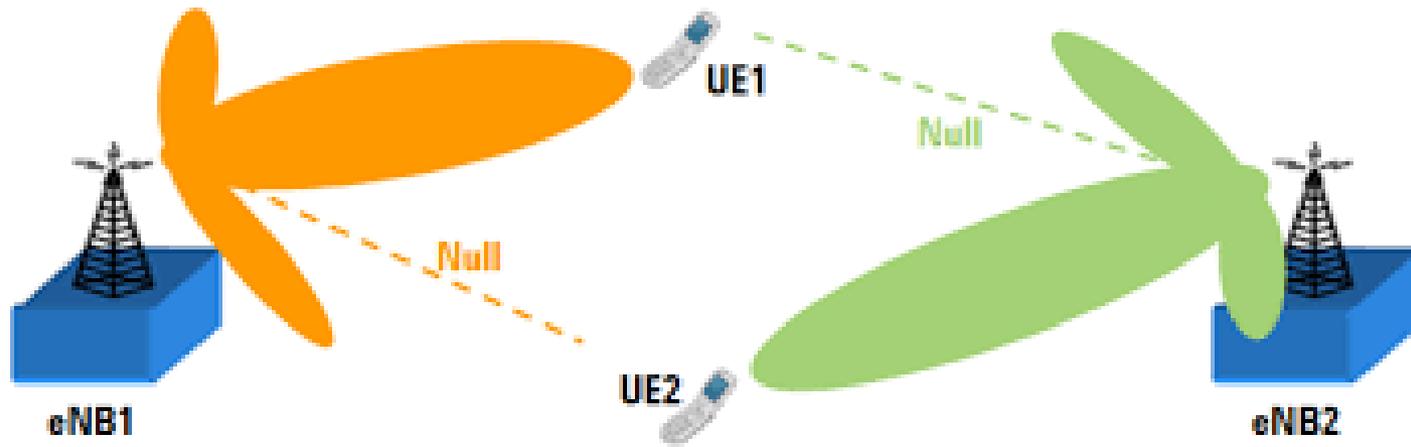


(d)



(e)

LTE : MIMO



Transmission modes in LTE Release 9

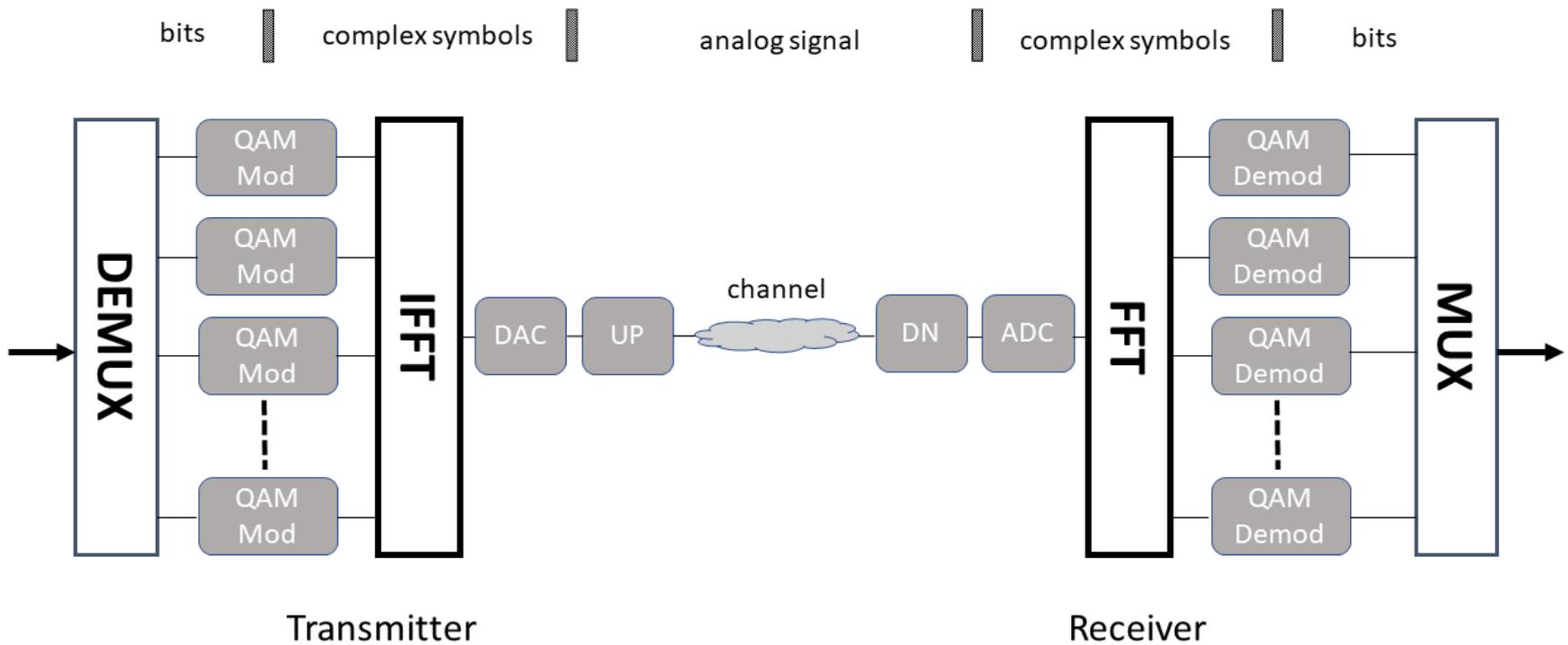
Transmission modes	Description	Comment
1	Single transmit antenna	single antenna port; port 0
2	Transmit diversity	2 or 4 antennas
3	Open loop spatial multiplexing with cyclic delay diversity (CDD)	2 or 4 antennas
4	Closed loop spatial multiplexing	2 or 4 antennas
5	Multi-user MIMO	2 or 4 antennas
6	Closed loop spatial multiplexing using a single transmission layer	1 layer (rank 1), 2 or 4 antennas
7	Beamforming	single antenna port, port 5 (virtual antenna port, actual antenna configuration depends on implementation)
8	Dual-layer beamforming	dual-layer transmission, antenna ports 7 and 8

Table 3: Overview of the eight transmission modes in LTE Release 9.

Transmission LTE : OFDM

- OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- Modulation multiporteuses avec OFDMA
utilisée en voie descendante
- SC-FDMA Single Carrier Frequency Division Multiplexing
en voie montante

OFDM



5G

- **ETSI**

<https://www.etsi.org/technologies/5G>

- **ARCEP**

<https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/experimentations-5g-en-france/tableau-deploiements-5g.html>

- Bandes de fréquence :

- **bande 3,5 GHz (3,4 - 3,8 GHz)** Jusqu'en juillet 2026
- **bande 26 GHz (24,25 - 27,5 GHz)**

LA 5G EN FRANCE

LE PLAN DE BATAILLE DE L'ARCEP

Mise à jour
30 janvier 2019



- Janvier 2017**
Consultation publique :
 « De nouvelles fréquences pour le très haut débit dans les territoires, pour les entreprises, la 5G et l'innovation ».
- Mars 2017**
Publication du rapport sur « **Les enjeux de la 5G** ».
- Janvier 2018**
 Ouverture du **guichet** « pilotes 5G ».
- Février 2018**
 Autorisation d'expérimentations 5G à Lille, Douai, Bordeaux et Lyon.
- Mai 2018**
Consultation publique sur la libération de la bande 26 GHz, bande « pionnière ».
- Juin / Juillet 2018**
 Autorisations d'expérimentations 5G à Marseille, Nantes, Toulouse et en Ile-de-France (quatorze expérimentations).
- 16 juillet 2018**
 Publication de la **feuille de route** 5G de la France et du **programme de travail** de l'Arcep.
- Été 2018**
 Libération de nouvelles bandes de fréquences : consultation publique sur la bande L.
- Septembre 2018**
 Mise en place du **comité prospectif** sur les réseaux du futur.
- Octobre 2018**
 Lancement des travaux sur les **réseaux du futur**.
 Lancement de la consultation publique sur l'**attribution des bandes de fréquence**.
- Novembre-Décembre 2018**
 Échanges avec les acteurs et travaux techniques.
- Décembre 2018**
 Co-organisation, avec le Gouvernement, d'un échange avec les acteurs du transport.
 Publication du **tableau de bord** de suivi des expérimentations 5G.

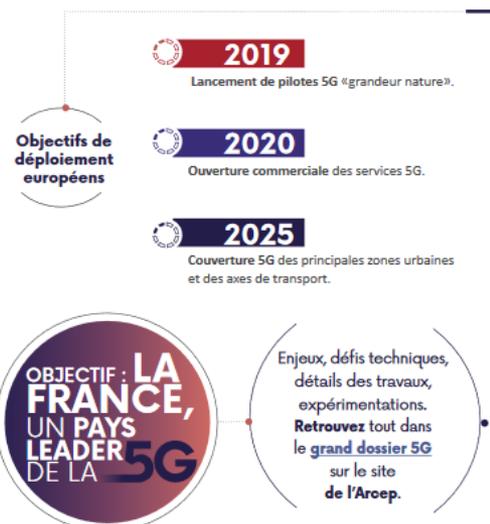
Janvier 2019
 Lancement d'un guichet pour les plateformes ouvertes d'expérimentation 5G en bande 26 GHz.

1^{er} semestre 2019
 Poursuite des échanges avec le Gouvernement et les acteurs autour d'**usages ciblés** (industrie du futur...).
 Co-organisation avec le Gouvernement d'un événement sur la 5G en France.
 Seconde consultation publique sur l'**appel à candidatures pour l'attribution des bandes de fréquences**.
 Définition des modalités d'attribution.

À partir de mi-2019
 Attribution des fréquences : lancement de l'**appel à candidatures**.

Début 2020
 Attributions de fréquences : **publication des décisions**.

2020
 Premiers déploiements.



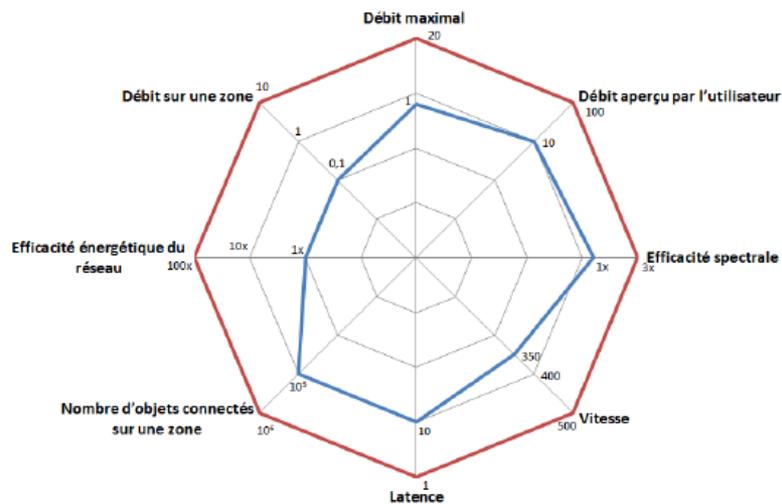
Les perspectives de la 5G

- Les innovations de la 5G conduiront à une **amélioration** des communications interpersonnelles pour les services au grand public, et permettront également la **cohabitation** d'applications et d'usages extrêmement différents.
- La 5G devrait agir comme facilitateur de la **numérisation** de la société, en autorisant le développement de nouveaux usages. Elle intéressera les **verticales*** de secteurs très variés, par exemple : l'énergie, la santé, les médias, l'industrie, le transport...
- La technologie 5G est toujours **en cours de définition** par le 3GPP et l'UIT : en pratique, les fonctionnalités de la 5G seront introduites progressivement et certains gains de performance apparaîtront dans quelques années.

* Les entreprises du secteur privé, quel que soit leur domaine d'activité et, par extension, les structures du secteur public, dont les besoins en communications électroniques sont comparables à ceux des acteurs privés

Les gains de performance

Huit indicateurs de performance ont été établis par l'UIT pour préciser, quantifier et mesurer les caractéristiques de systèmes IMT 2020 (5G) :



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

Les fonctionnalités de la 5G seront introduites progressivement, en commençant par la capacité.

Les grandes familles d'usage 5G

eMBB

Enhanced Mobile Broadband : correspond aux applications et services qui nécessitent une connexion toujours plus **rapide**, par exemple pour la ultra haute définition (8K), la réalité virtuelle ou augmentée. Cette famille représente l'évolution de la plupart des services proposés par les **réseaux 4G**.

mMTC

Massive Machine Type Communications : regroupe principalement les usages liés à **l'Internet des objets**. Ces services nécessitent une couverture étendue, une consommation énergétique contenue et des débits relativement restreints.

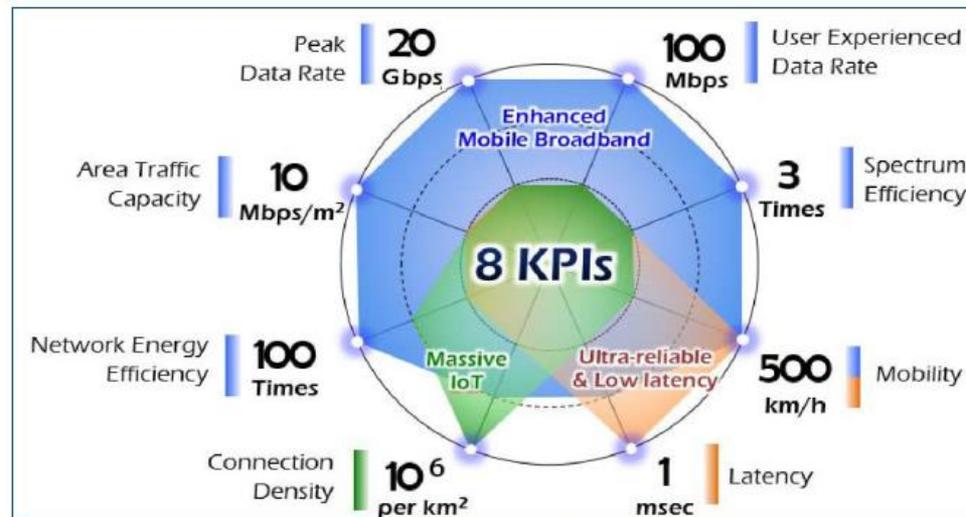
uRLLC

Ultra-reliable and Low Latency Communications : regroupe toutes les applications nécessitant une **réactivité** extrêmement importante ainsi qu'une **garantie** très forte de transmission du message.

C'est dans un premier temps l'usage eMBB qui sera activé, en attendant que la technologie, les produits et les déploiements permettent les autres types d'usage.

Le « network slicing » : qu'est ce que c'est ?

- Chaque famille (mMTC, eMBB & uRLLC) est caractérisée par des usages qui lui sont propres et une enveloppe de performances appropriée.
- Les indicateurs ne pourront être tous satisfaits **simultanément** sur un même réseau : les réseaux 5G seront configurés en « tranches » (slices), ils devront s'adapter dynamiquement à la demande, en fonction des usages, ce qui est réalisable grâce à la « virtualisation » logicielle des fonctions.
- Cette fonctionnalité est potentiellement **la plus innovante** de la 5G. Son support dans les réseaux est attendu à partir de 2023.



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.

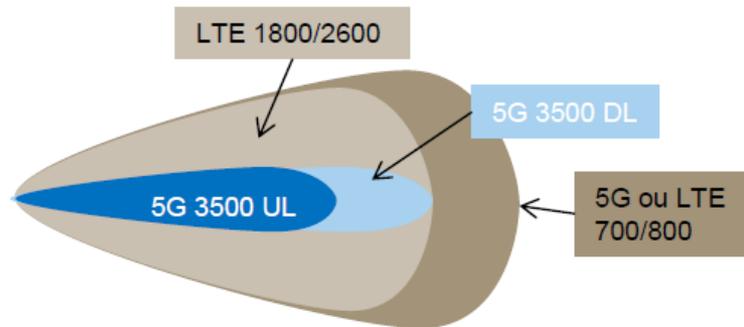
	<i>PÉNÉTRATION À L'INTÉRIEUR</i>	<i>PORTÉE</i>	<i>DÉBIT</i>
La bande 700 MHz : déjà attribuée aux opérateurs (depuis fin 2015), qui peuvent d'ores et déjà y déployer la 4G, et pleinement disponible mi-2019.	++	++	--
La bande 3400 – 3800 MHz : en cours de réorganisation pour permettre l'attribution d'une 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.	--	--	++

Quelques défis du déploiement de la 5G

La couverture

La couverture avec la bande 3,5 GHz 5G *massive MIMO* est limitée, ce qui se ressent en particulier pour couvrir de grandes étendues rurales.

La bande 3,5 GHz connaît un écart de couverture entre sens montant (UL) et descendant (DL), qui est compensé par son appariement avec une bande 700/800 UL. Finalement, la couverture est plus proche des couvertures LTE en 1800 ou 2600, et donc significativement plus faible que la couverture LTE 700 ou 800.

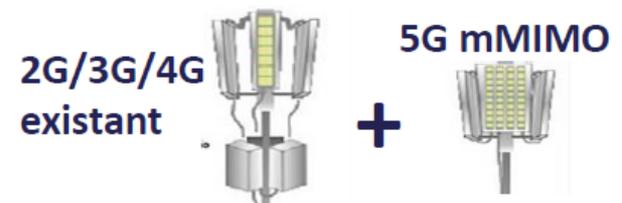


La connectivité duale

Dans un premier temps, la 5G s'appuie sur le réseau 4G (y compris le cœur de réseau) existant, et ne permet pas le « slicing ». Sans 4G, pas de 5G.

Les travaux sur les sites

Les antennes *massive MIMO* doivent être rajoutées sur les sites existants. Le raccordement se fera, selon les cas, en fibre optique ou en faisceaux hertziens.



Les prémices de la 5G dans le monde

Etats-Unis

- **Verizon et AT&T** : 5G sur des fréquences millimétriques (39 GHz) à grand débit et faible portée, mais encore peu de villes (2 et 19) et peu de terminaux (2 et 1).
- **Sprint** : 5G sur la bande 2,5 GHz (depuis mai), avec plus de couverture que ses concurrents, mais seulement 4 villes et un seul terminal.



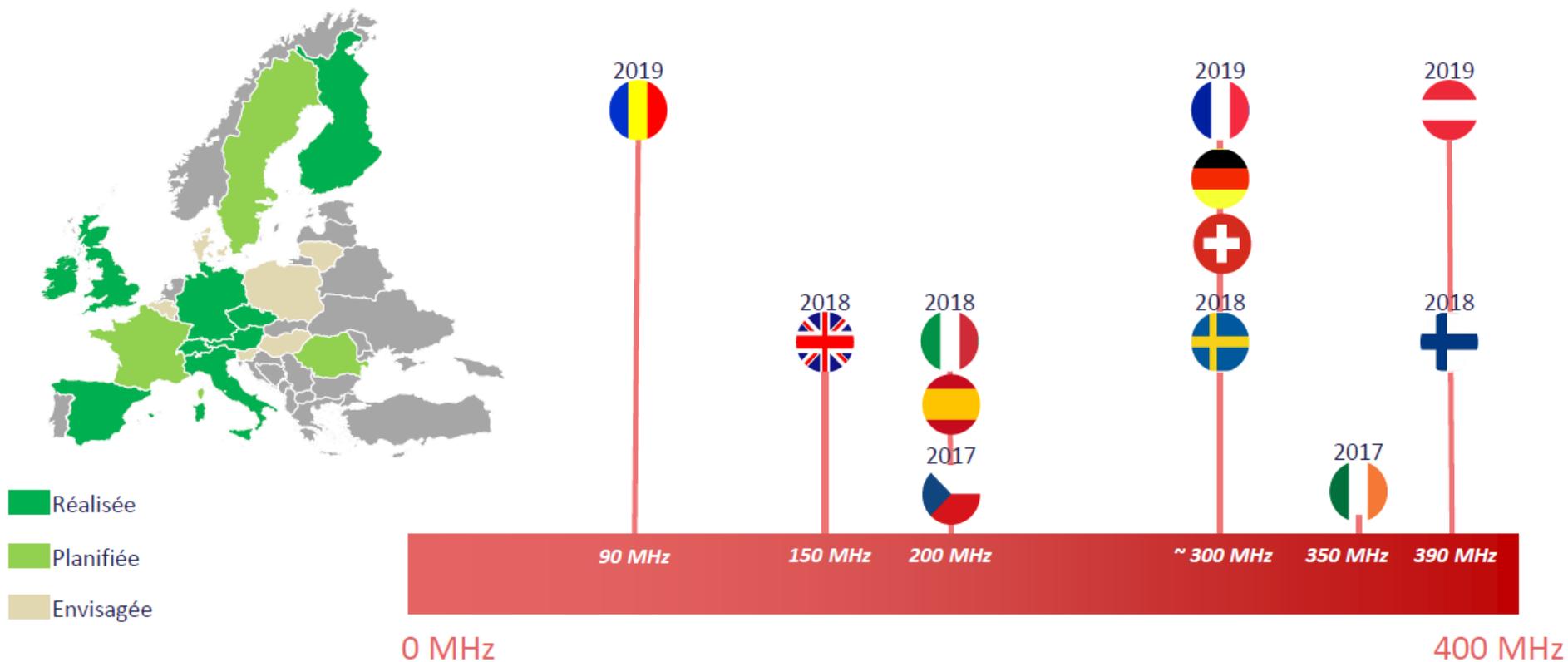
Corée du Sud

Trois opérateurs : 5G sur les fréquences 3,4-3,8 GHz (depuis avril), principalement à Séoul puis expansion dans les villes du pays. A ce jour, deux terminaux disponibles.

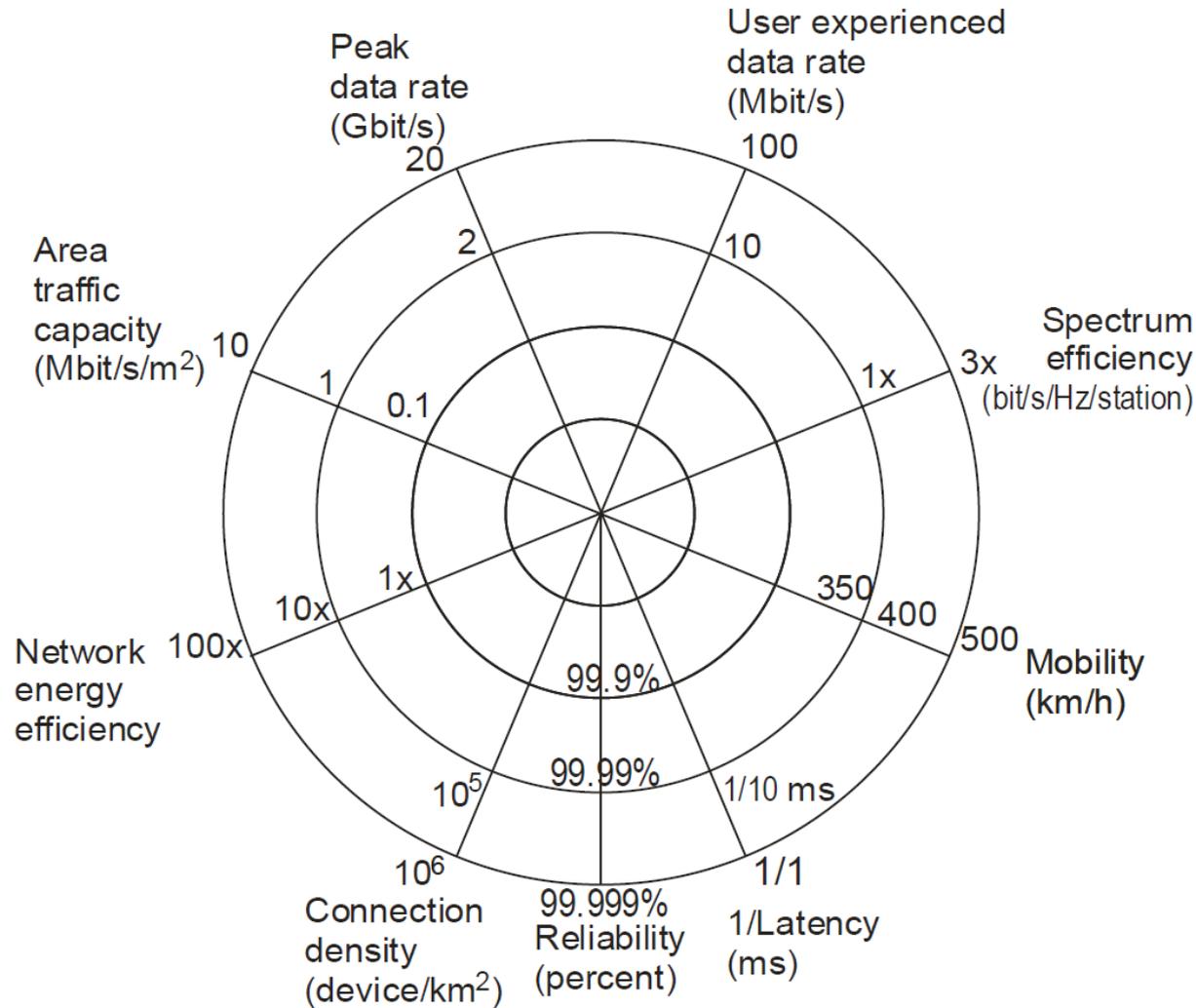
Europe

- Lancement au **Royaume Uni** par EE dans 6 villes avec 3 terminaux en utilisant la bande 3,4-3,6 GHz
- Lancement en **Finlande** par Elisa, principalement à Helsinki.
- ...

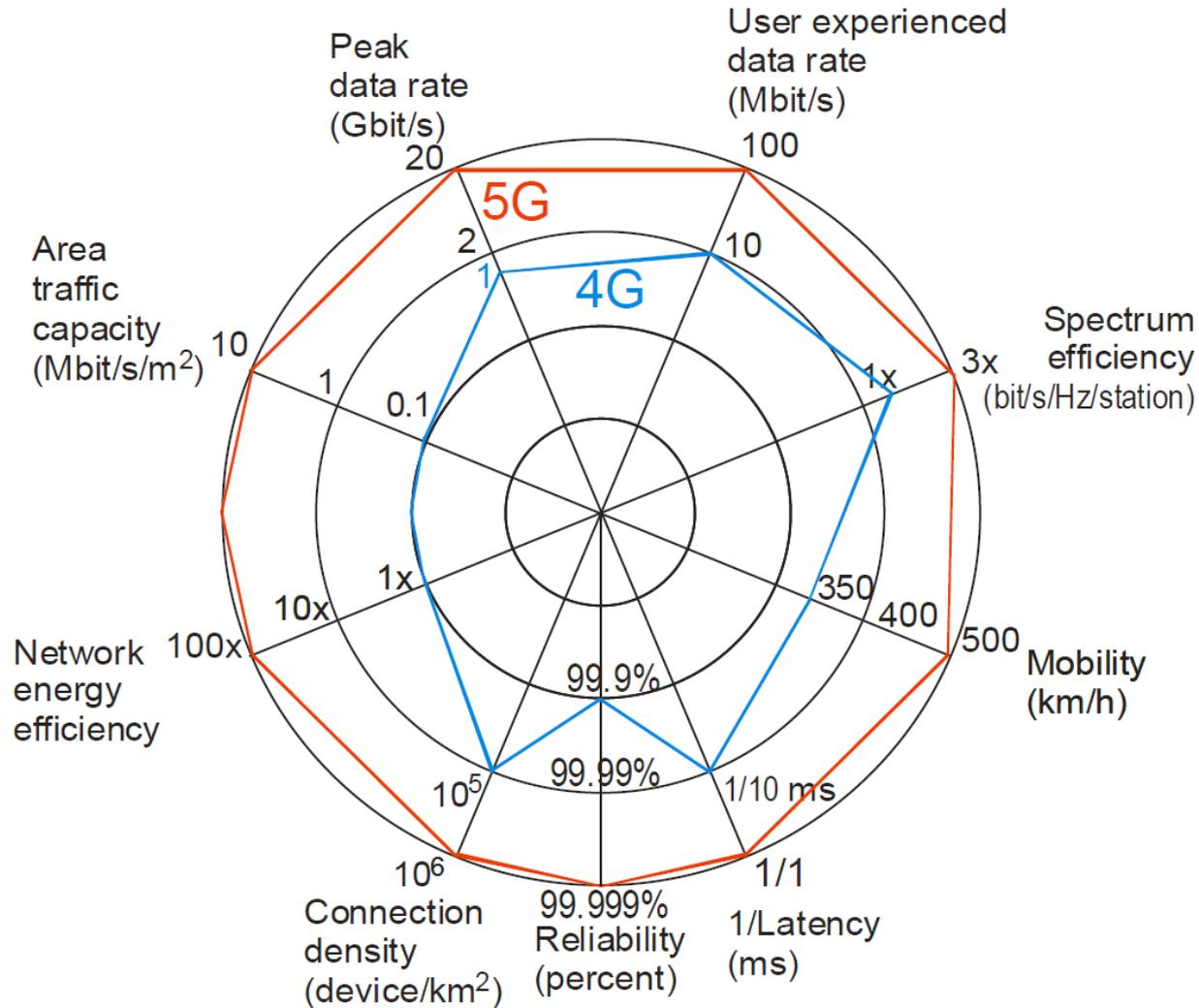
Les attributions de la bande cœur 3,4 - 3,8 GHz en Europe



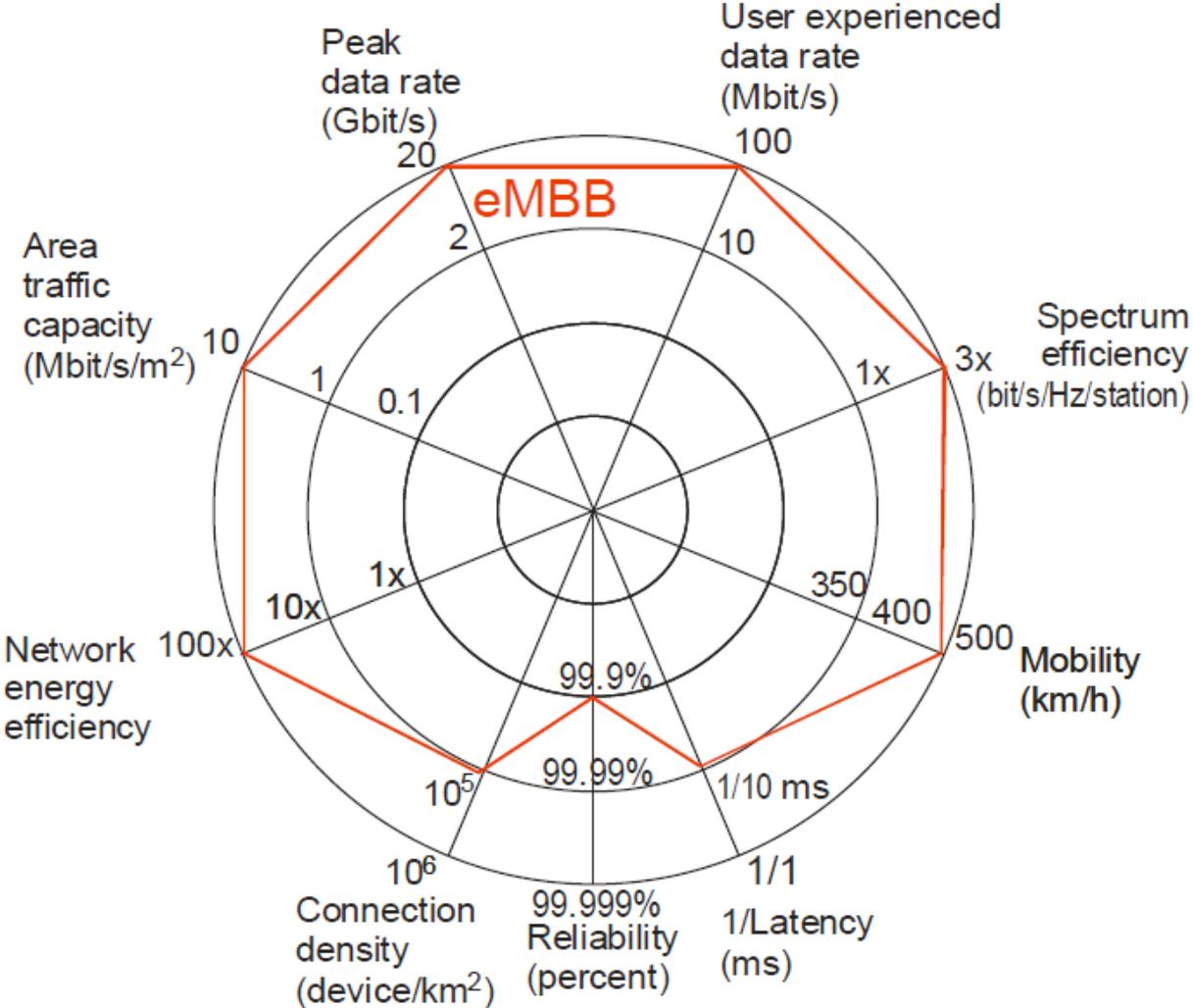
Indicateurs clés en 5G



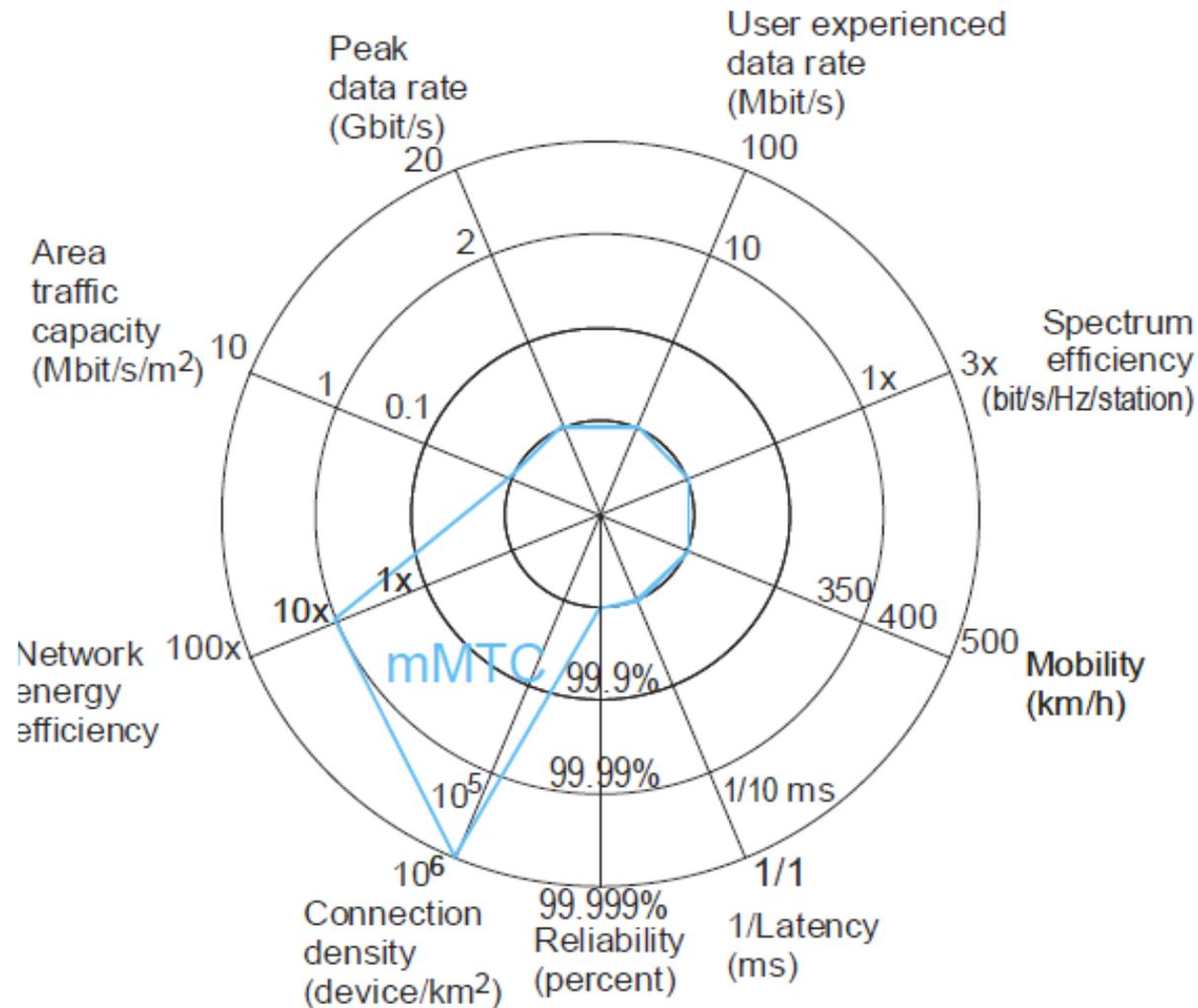
Indicateurs clés en 5G



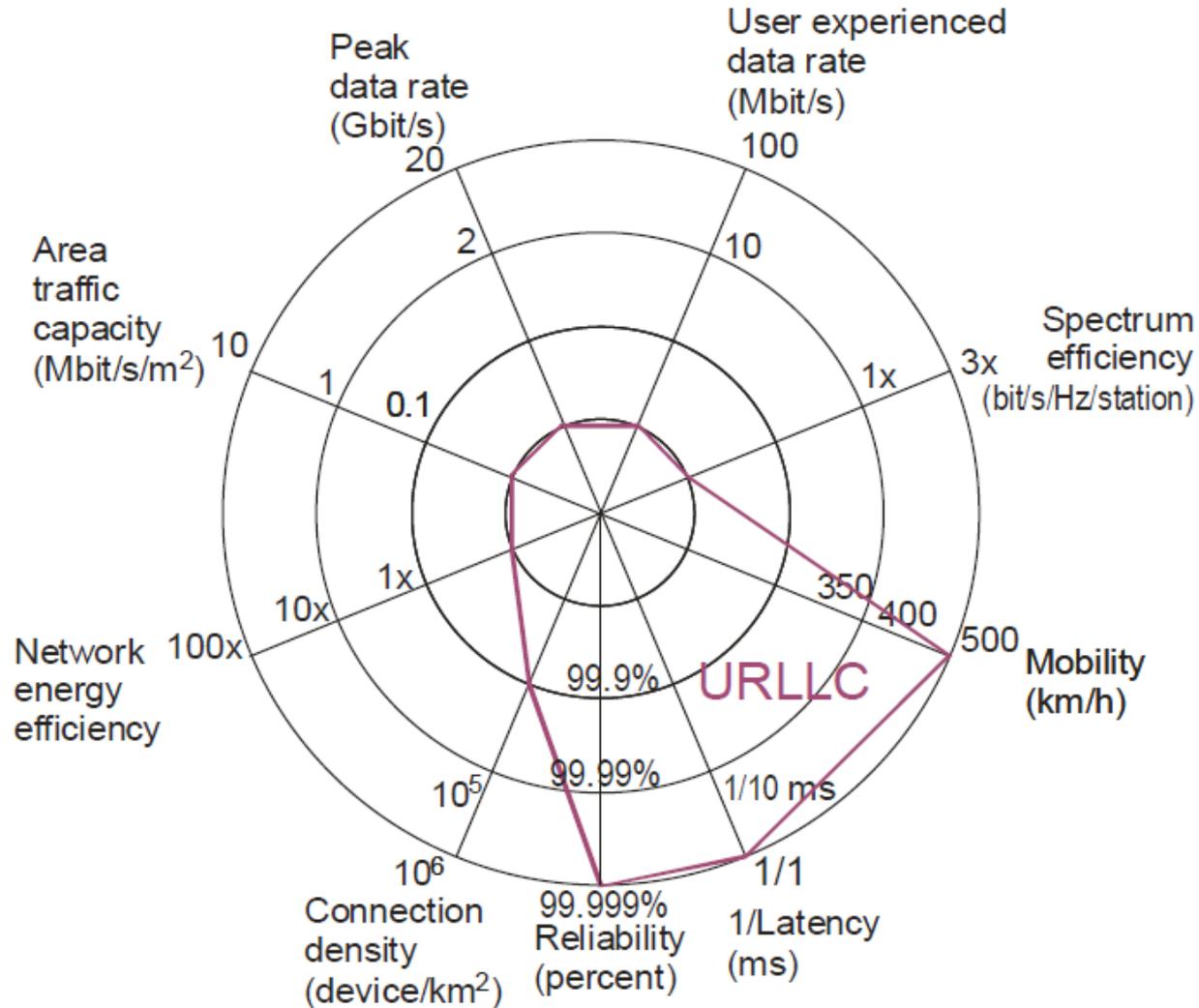
eMBB: enhanced Mobile BroadBand



mMTC: Massive Machine Type Communication



URLLC, Ultra Reliable Low Latency Communication



Connectivité 5G

- Réseaux 5G peuvent fournir une connectivité IP
-> adresse IP
- Ethernet : connectivité -> adresse MAC
- Non structurée

- Concept de PDU (Protocol Data Unit) : tout type de bloc
paquet IP, trame Ethernet
- Service de connectivité PDU :
UE membre d'un réseau grâce à la 5G
- Session PDU : association UE – réseau de données

Connectivité 5G

- SMS (même format que générations antérieures)
 - > 39015 caractères (255×153) si concaténation
- IMS: IP Multimedia System
 - Nombreux services : téléphonie, vidéo, messagerie
 - Utilise le protocole SIP
- Réseau 5G : vu comme un réseau d'accès
- Services de notification ouverts à des tiers :
- Service localisation
- Service de suivi :
localisation, roaming, nombre d'UE dans une zone

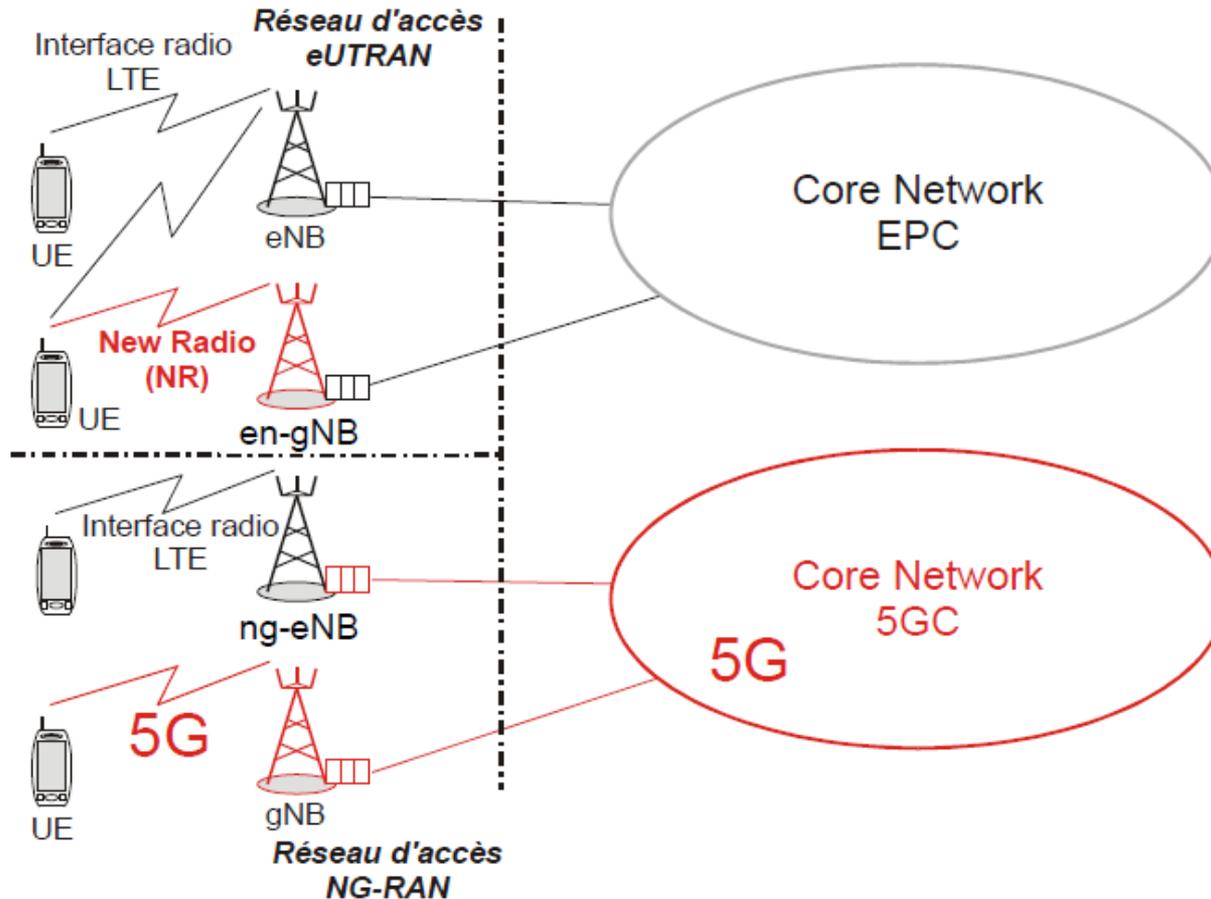
Architecture

- Nouvelle interface radio : NR (New Radio)
- Station de base : nouvelle interface radio, mais cœur 4G (en-gNB)

Puis réseau fédérateur :

- Cœur 5G : gNB (100% 5G), ng-eNB (radio 4G)
- Raccordement stations 4G LTE
- Possibilité connexion (non 3GPP Wireless Access point) : permet de décharger une partie du trafic de données du réseau mobile vers un réseau filaire via des cellules Wifi

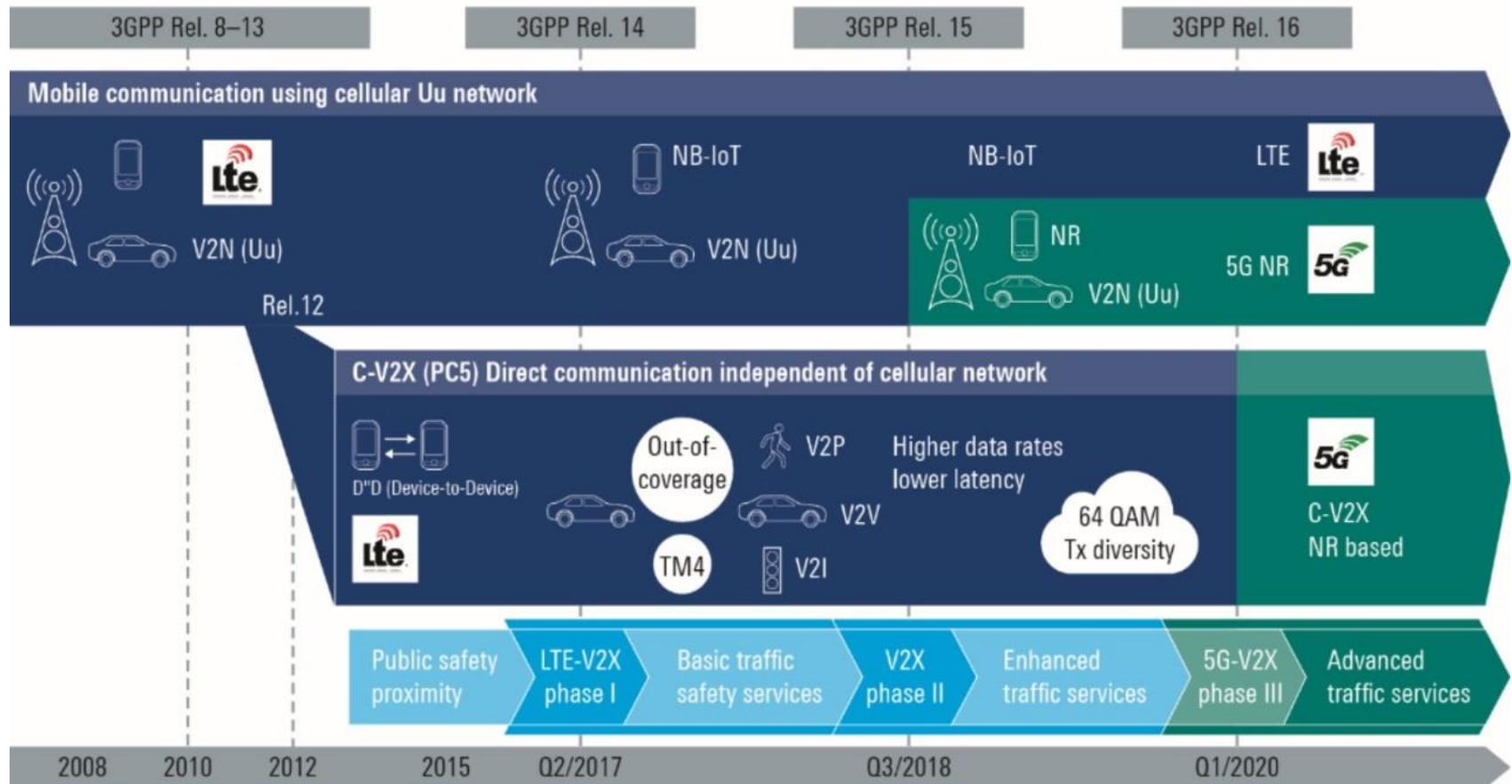
Architecture 4G-5G



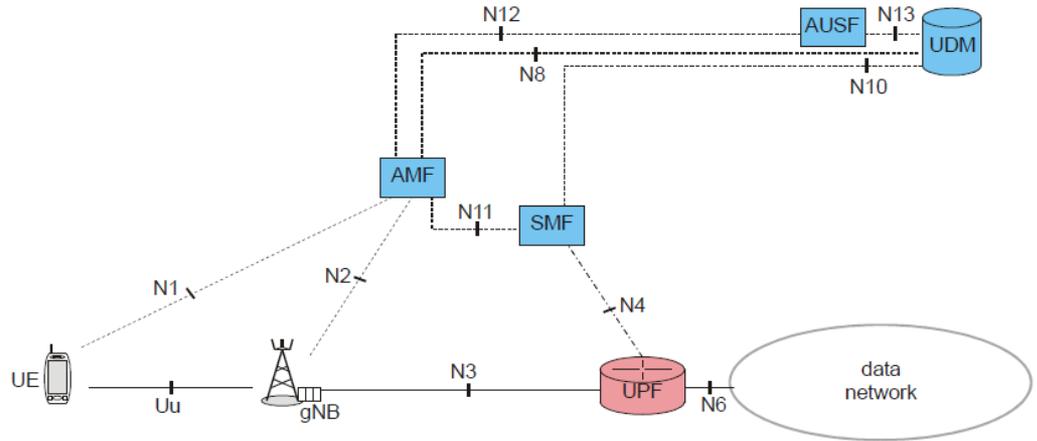
Architecture

- Communication radio directe possible UE-UE

V2X : Vehicule To Everything – V2N Vehicule To Network



Architecture



- Fonctions :

- AMF Access and Mobility management Function :

- UE – gNB -> AMF

- Gestion enregistrement, mobilité, connexion...

- Chiffrement, authentification, transport autres services, notification évènements

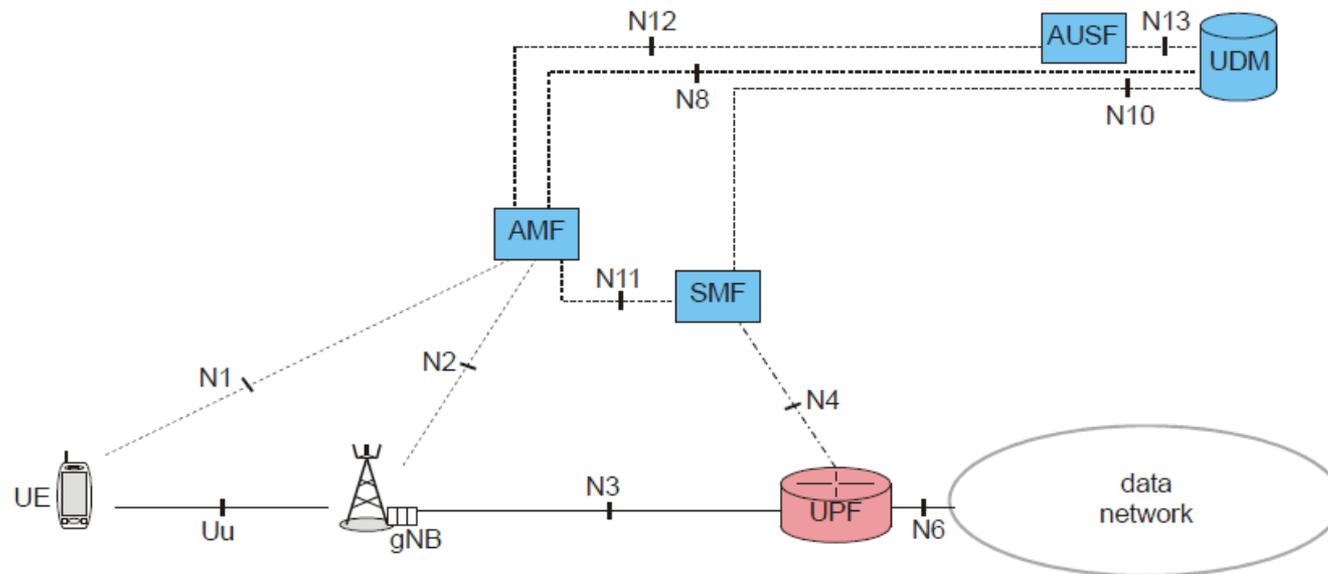
- SMF Session management Function

- UE – gNB -> AMF

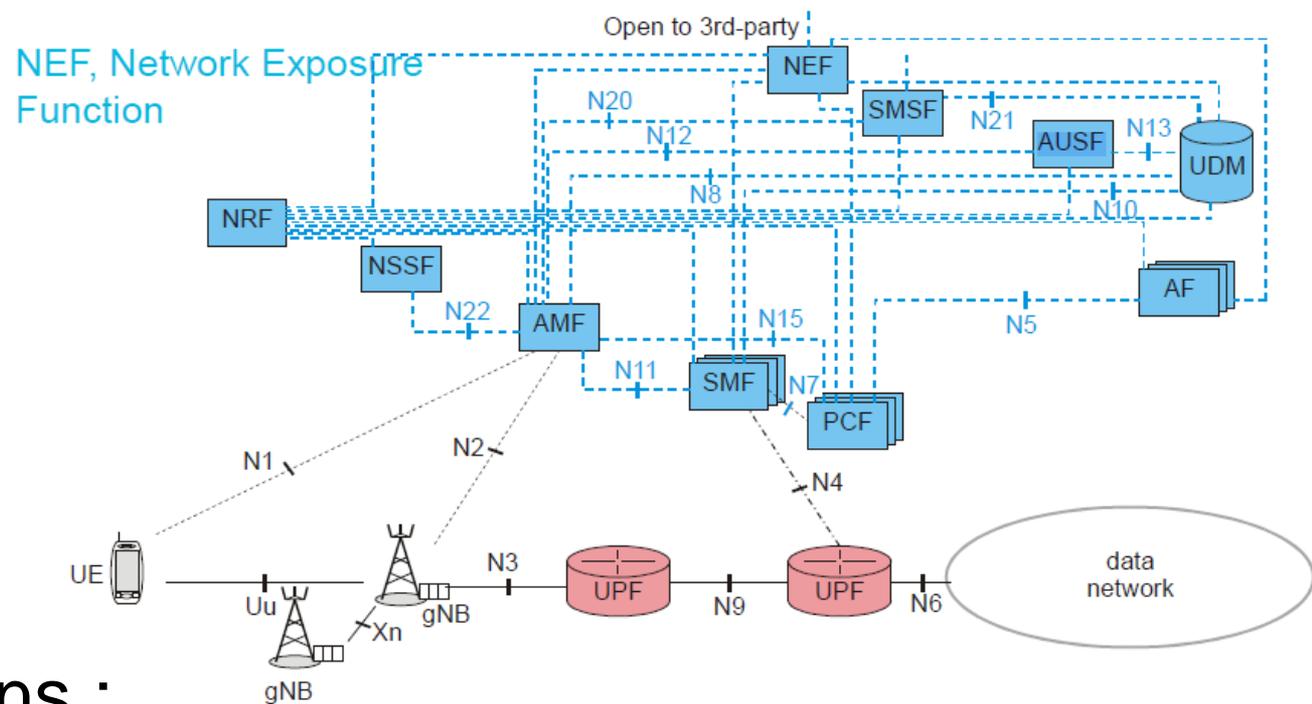
- Gestion session (établissement gestion PDU) et gestion adresse IP

Architecture

- Fonctions :
 - AUSF Authentication Server Function
Authentification des UE et clés
 - UDM Unified Data Management function
Gestion utilisateurs et abonnements



Architecture

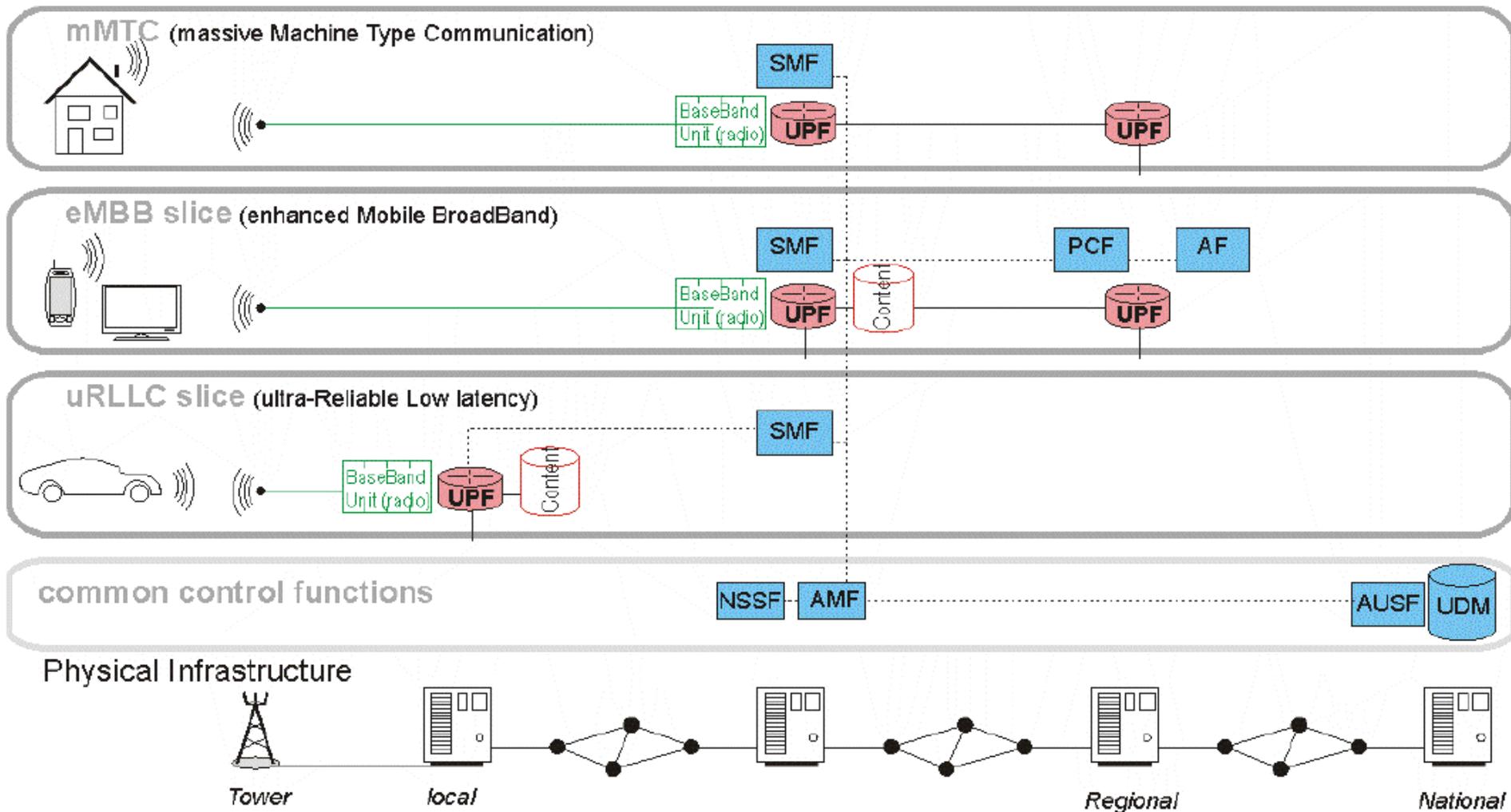


- Autres fonctions :
 - NSSF: Network Slice Selection Function
 - SMSF: Short Message Service Function (via AMF)
 - PCF: Policy Control Function (via SMF)
 - Gestion de la QoS
 - AF: Application Function (via PCF)
 - Gestion particulière des flux de données
 - NEF: Network Exposure Function (Sécurité)

Virtualisation

- Hardware générique, fonctions logicielles
- 5G : AMF, SMF, UPF, UDM sont des fonctions : concept de NFV Network Function Virtualisation
- Elasticité possible grâce au NFV :
 - Orchestrateur (démarrage/arrêt des instances)
 - Serveurs sans état (pas de contexte)
- Network Slicing :
 - plusieurs réseaux virtuels sur une infrastructure physique commune
 - Chaque tranche peut être allouée à un service

Slicing : Exemple



MIMO

- <https://youtu.be/BUvFTKhrhgg>



Global Massive MIMO Market
OPPORTUNITIES AND FORECAST,
2020-2027

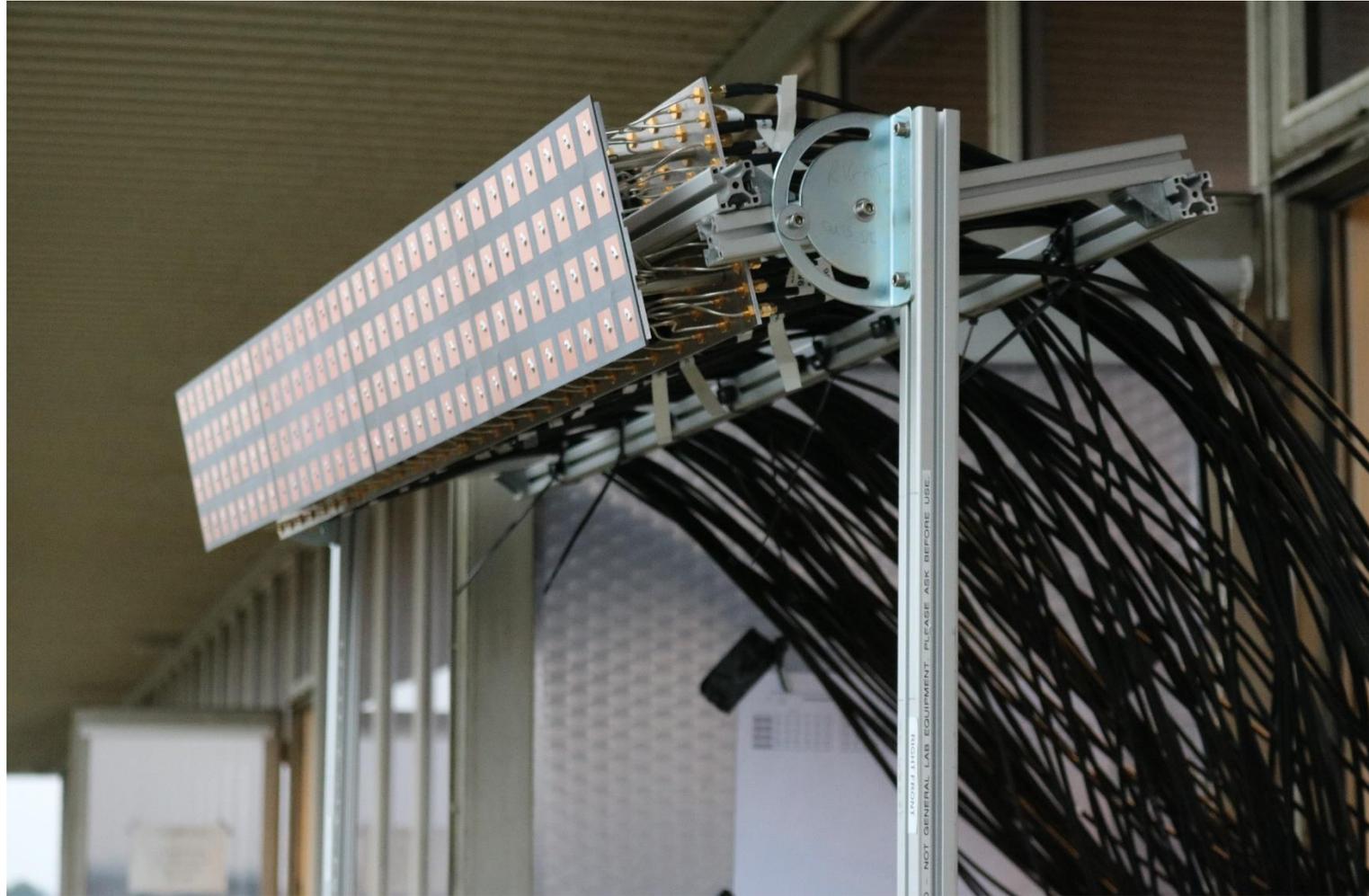
Global Massive MIMO Market is expected to reach **\$15.79 Billion** by 2027.

Growing at a **CAGR of 35.3%** (2020-2027)

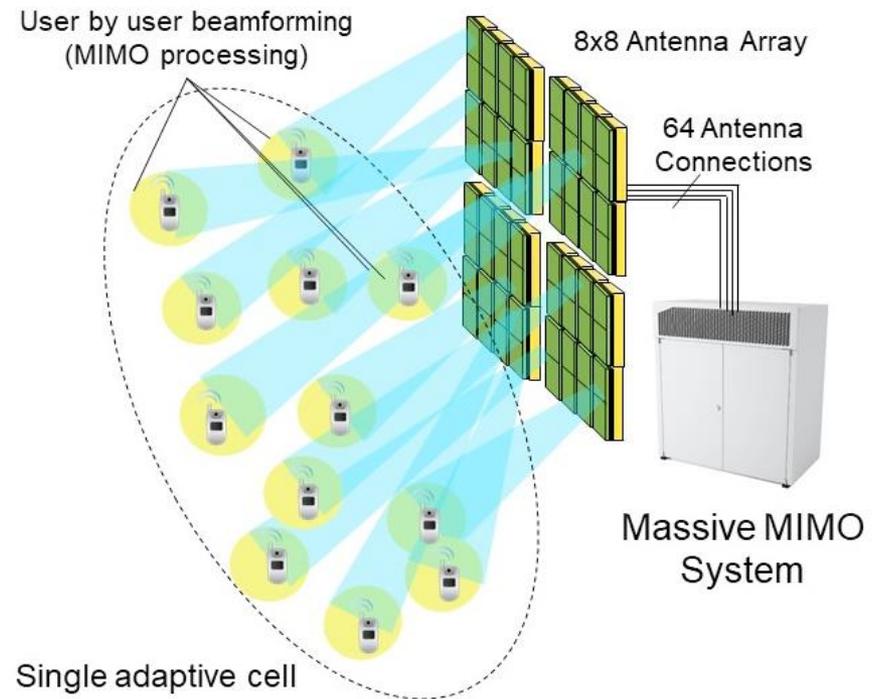
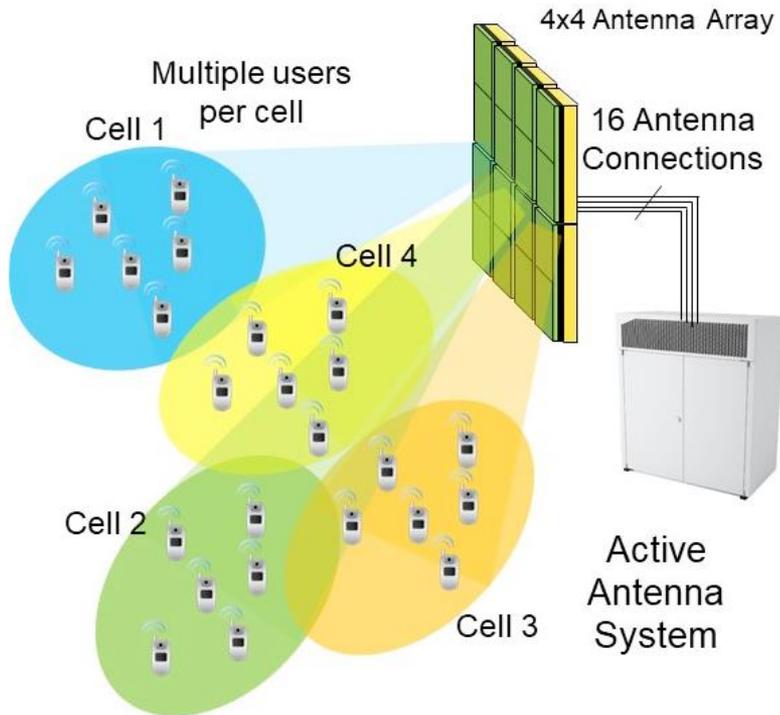


Allied Market Research

Massive MIMO



Antenne active et Massive MIMO



Interface Radio

- New Radio (NR)

