

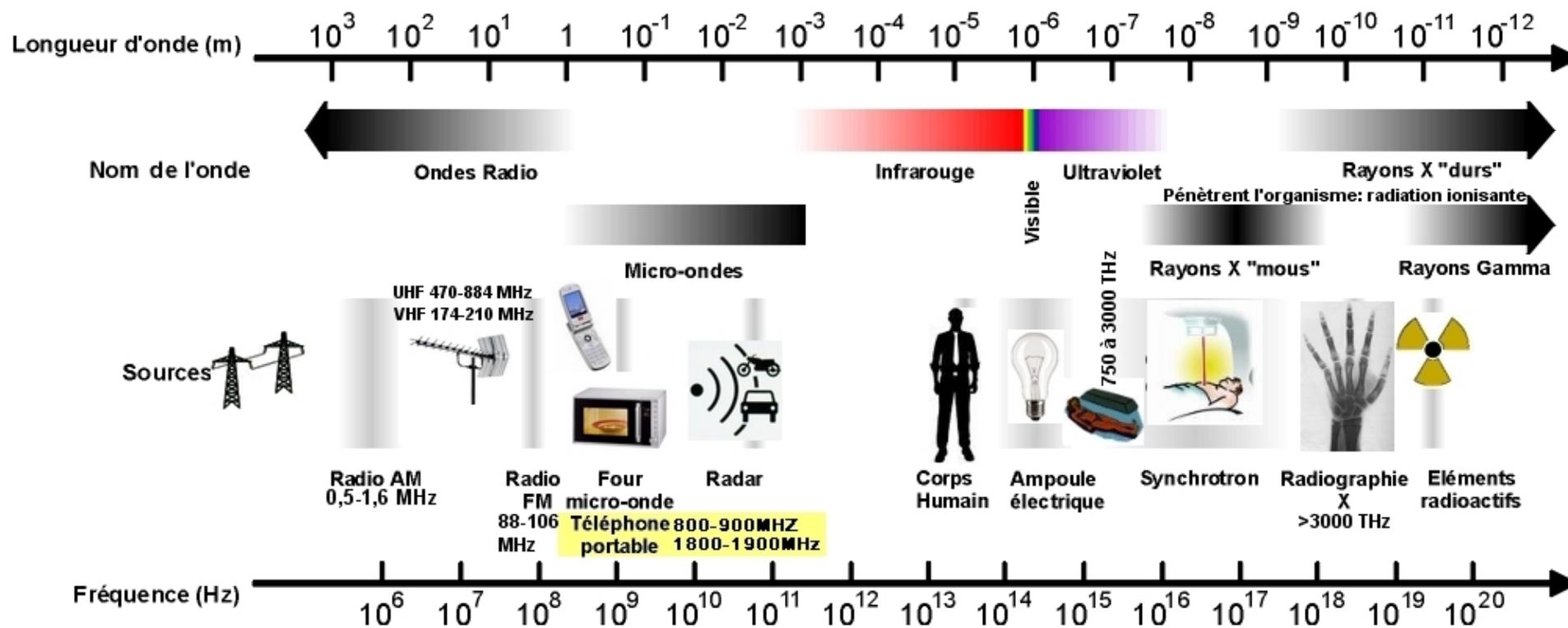
# Réseaux Mobiles

Khaldoun Al Agha

alagha@lisn.fr

# Les fréquences

# Fréquences

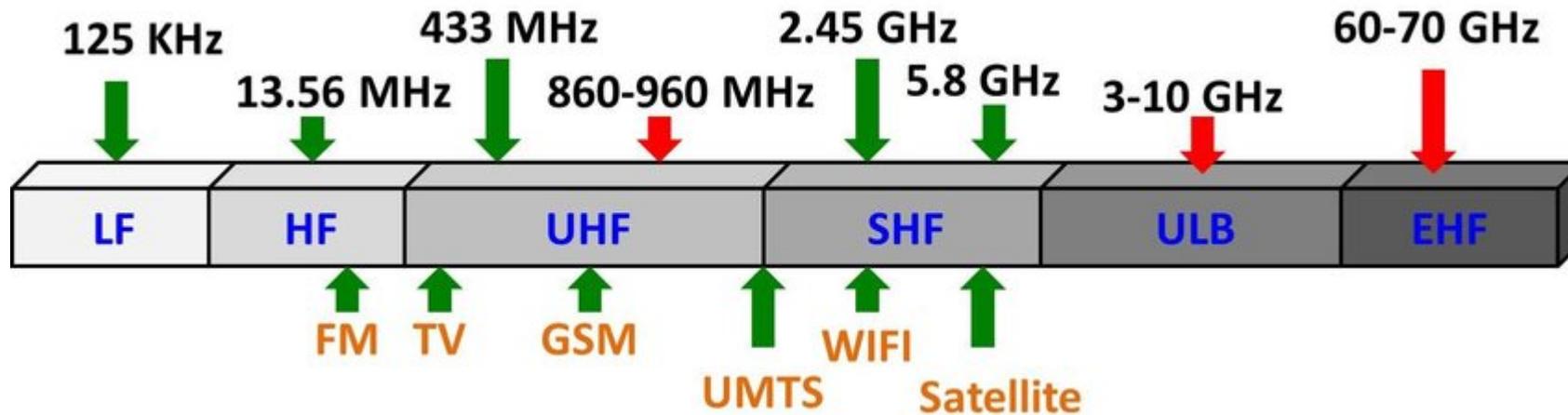


# Les fréquences non-ionisantes

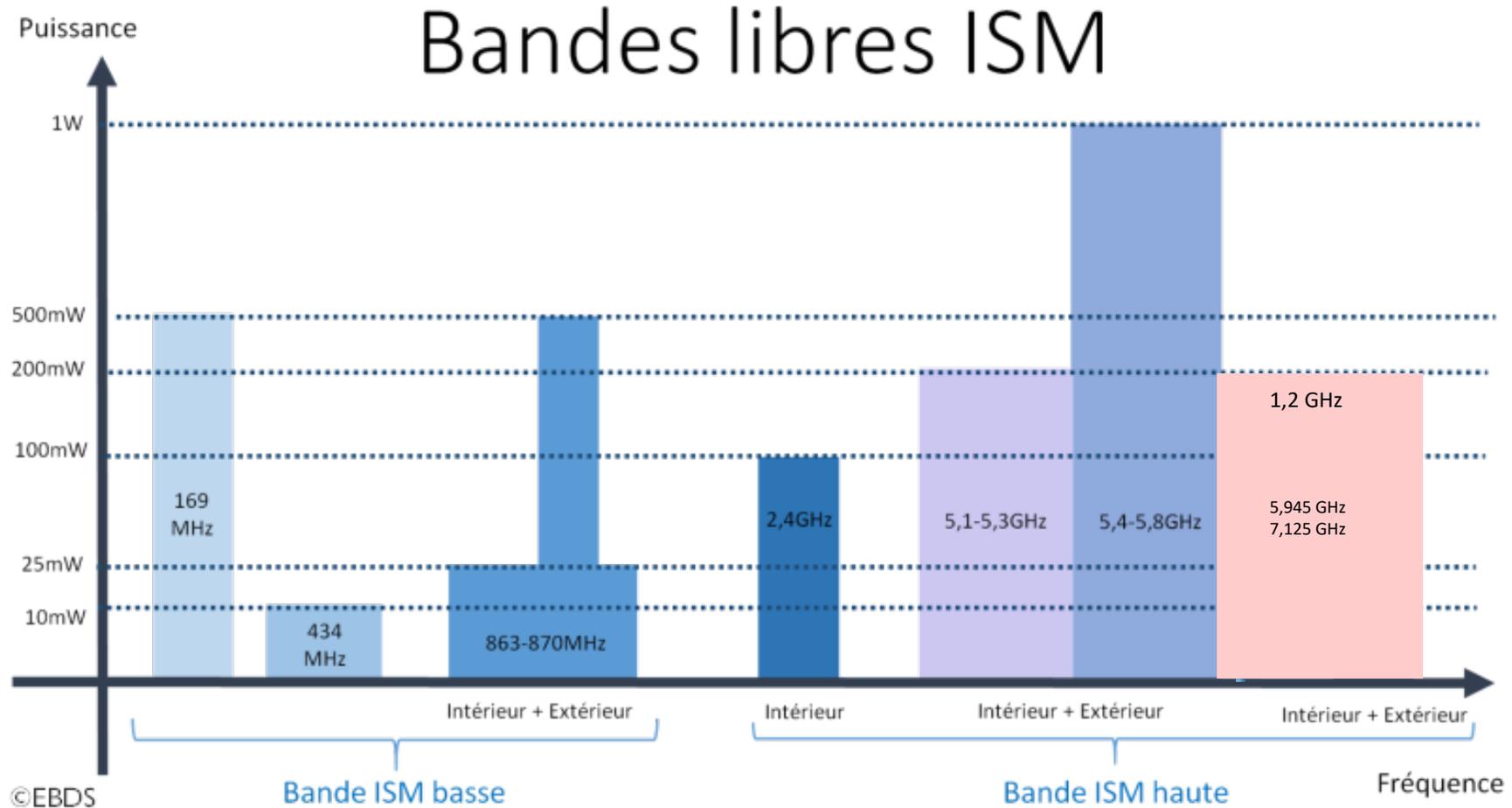
Désignation	Fréquence	Longueur d'onde	Exemples
Fréquences extrêmement basses (ELF)	0 - 300 Hz	$10^5 - 10^3$ km	Réseau électrique 50 Hz, électroménager...
Fréquences audio (VF)	0,3 - 3 kHz	1000 - 100 m	Transmission de données vocales, métallurgie, chauffage par induction...
Très basses fréquences (VLF)	3 - 30 kHz	100 - 10 km	Radio communications...
Basses fréquences (LF)	30 - 300 kHz	10 - 1 km	Radio diffusion GO, Fours à induction...
Fréquences moyennes (MF)	0,3 - 3 MHz	1 km - 100 m	Radio diffusion MO, PO, diathermie médicale...
Hautes fréquences (HF)	3 - 30 MHz	100 - 10 m	CB (Citizen Band), soudage, collage...
Très hautes fréquences (VHF)	30 - 300 MHz	10 - 1 m	Télévision, radio FM...
Fréquences ultra hautes (UHF)	0,3 - 3 GHz	1 - 0,1 m	Télévision, radars, téléphones mobiles, fours à micro-ondes, hyperthermie médicale...
Fréquences super hautes (SHF)	3 - 30 GHz	0,1 - 0,01 m	Radars, alarmes anti-intrusion
Fréquences extrêmement hautes (EHF)	30 - 300 GHz	0,01 - 0,001 m	Radars, communications par satellite...
Infrarouge (IR)	0,3 - 385 THz	1 mm - 780 nm	Spectrométrie IR, chauffage...
Lumière visible	385 - 750 THz	780 - 400 nm	Vision humaine, photosynthèse...
Ultraviolet (UV)	750 THz - 3 PHz	400 - 100 nm	Spectrométrie, lampes germicides, solarium...

# ANFR : Agence Nationale des Fréquences

## Les principales fréquences radio



# 5G privée et Wi-Fi



ISM (industrielles, scientifiques et médicales)

# Ondes électromagnétiques

- **Equation des télécommunications**

Dans sa forme la plus simple (cas idéal, pas de trajets multiples), l'équation de Friis s'exprime :

$$P_{\text{réception}} = A / f(4\pi R)^2 P_{\text{émission}}$$

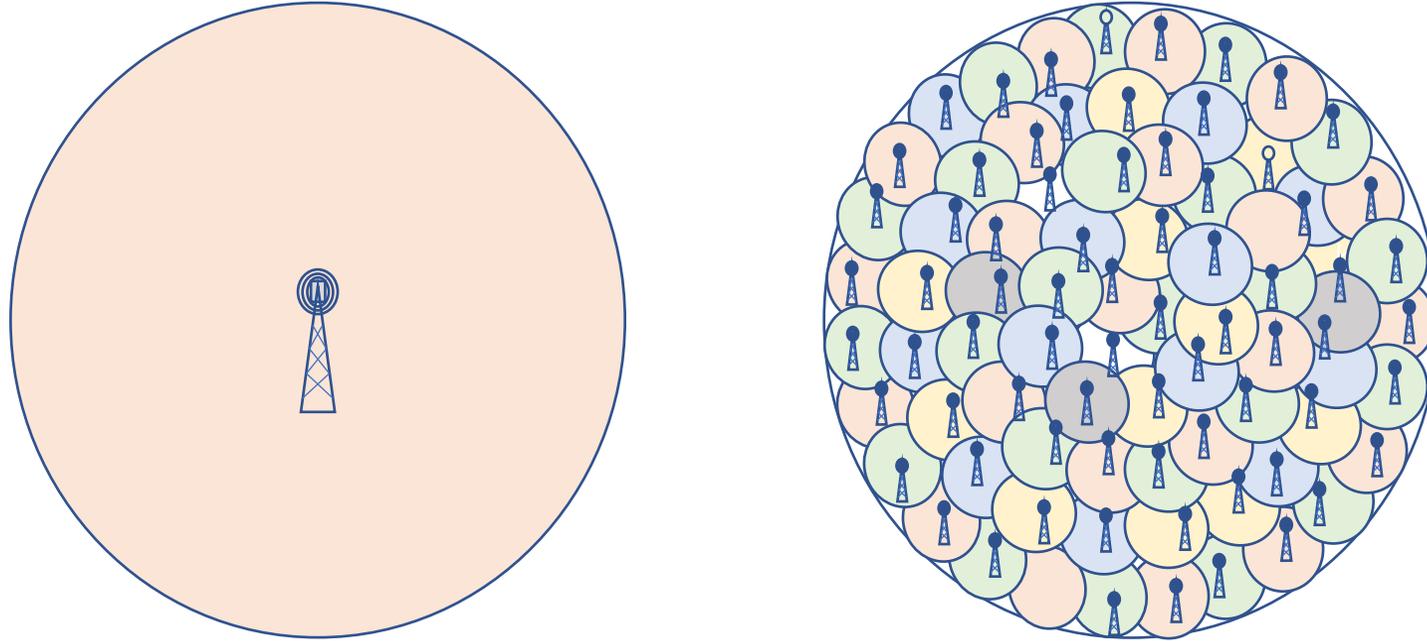
où :

- $P_{\text{émission}}$  est la puissance en **watts** (W) délivrée à l'antenne d'émission (pertes d'adaptation et rendement non compris)
- $P_{\text{réception}}$  est la puissance en watts (W) collectée sur l'antenne de réception (pertes d'adaptation et rendement non compris)
- A dépend des antennes émetteur et récepteur
- R est la distance en mètres (m) séparant les deux antennes
- f est la **fréquence** en hertz (hz) correspondant à la fréquence de travail

# Ondes électromagnétiques

- Trois règles à connaître :
- 1<sup>ère</sup> règle: La puissance reçue est inversement proportionnelle à la fréquence
  - Plus la fréquence est haute et plus il faut de puissance pour atteindre la même portée
  - A partir de 20 GHz, le signal ne traverse plus du tout les obstacles
  - Exemple : en 5G, sur la fréquence de 3,5 GHz, il faut plus d'antennes qu'en 3G sur 1,8 GHz et beaucoup plus qu'en 4G sur 800 GHz
  - Les « petites cellules » vont être privilégiées
  - Wi-Fi se satisfait de très faibles puissances

# Grande cellule versus petite cellule

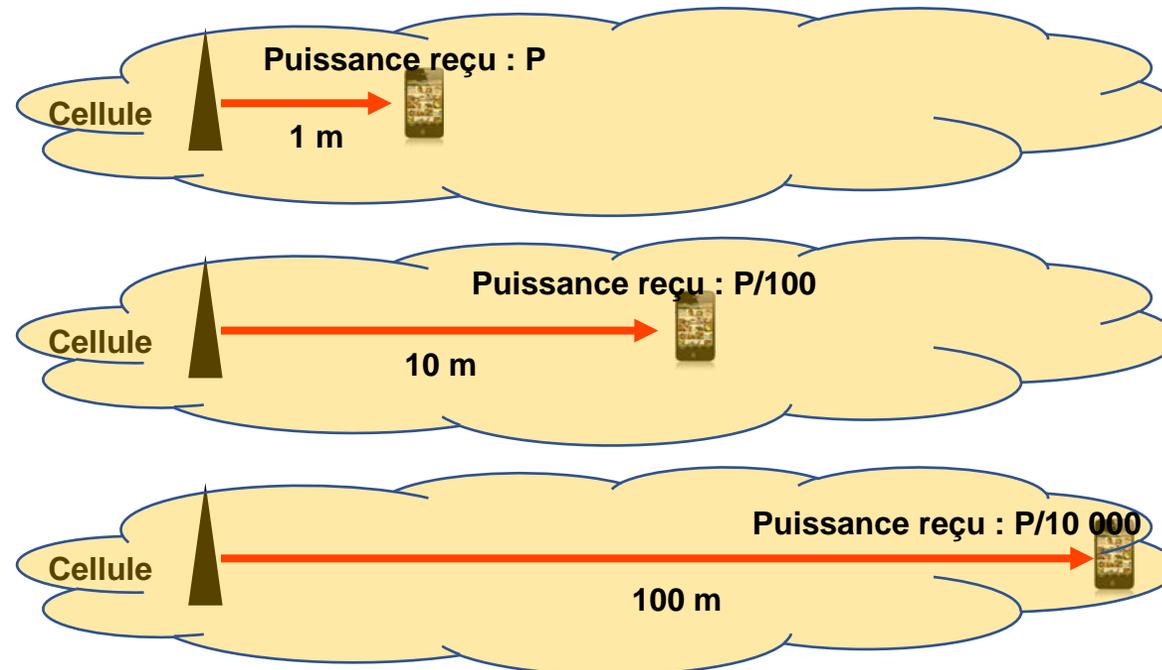


Plus il y a d'antennes et plus il y a de débit et moins c'est dangereux

- Le Wi-Fi n'est pas dangereux du tout puisque les cellules sont toutes petites
- Les réseaux de mobiles : il faut augmenter le nombre d'antennes et mettre des petites cellules (femtocell, nanocell, microcell, metrocell)

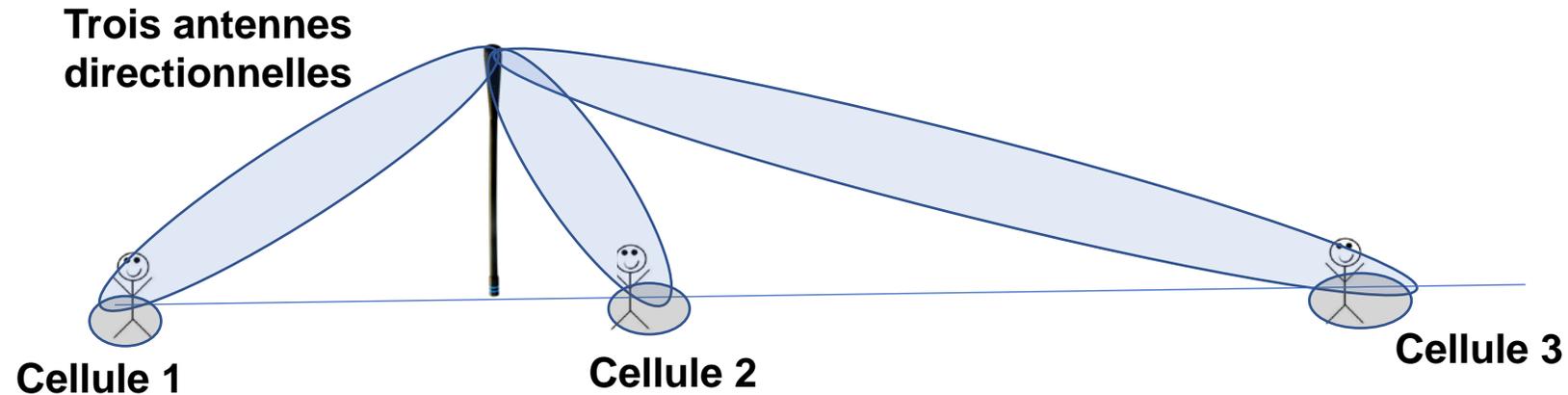
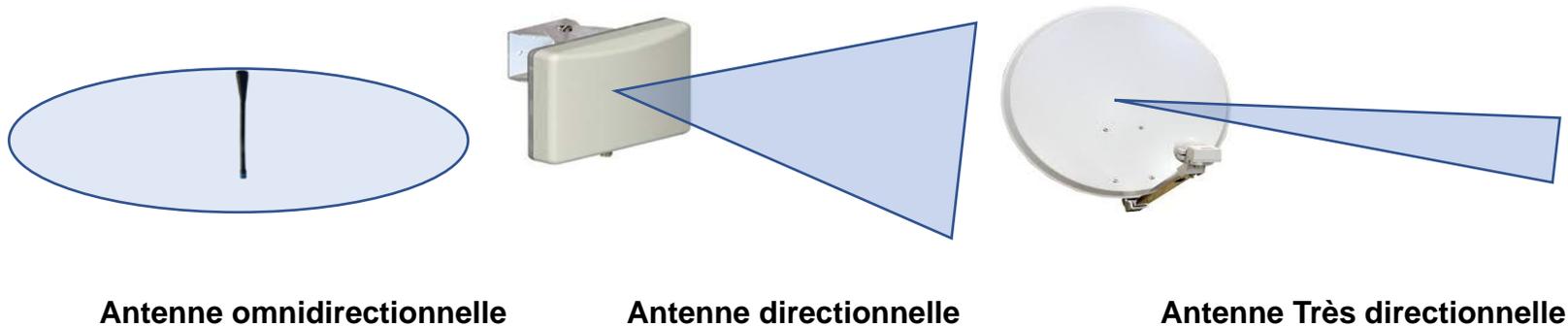
# Ondes électromagnétiques

- 2<sup>e</sup> règle : la puissance reçue est inversement proportionnelle à la distance au carré
  - La puissance reçue descend très vite avec la distance
  - Différence entre 1 cm et 10 centimètres, la puissance descend de 100

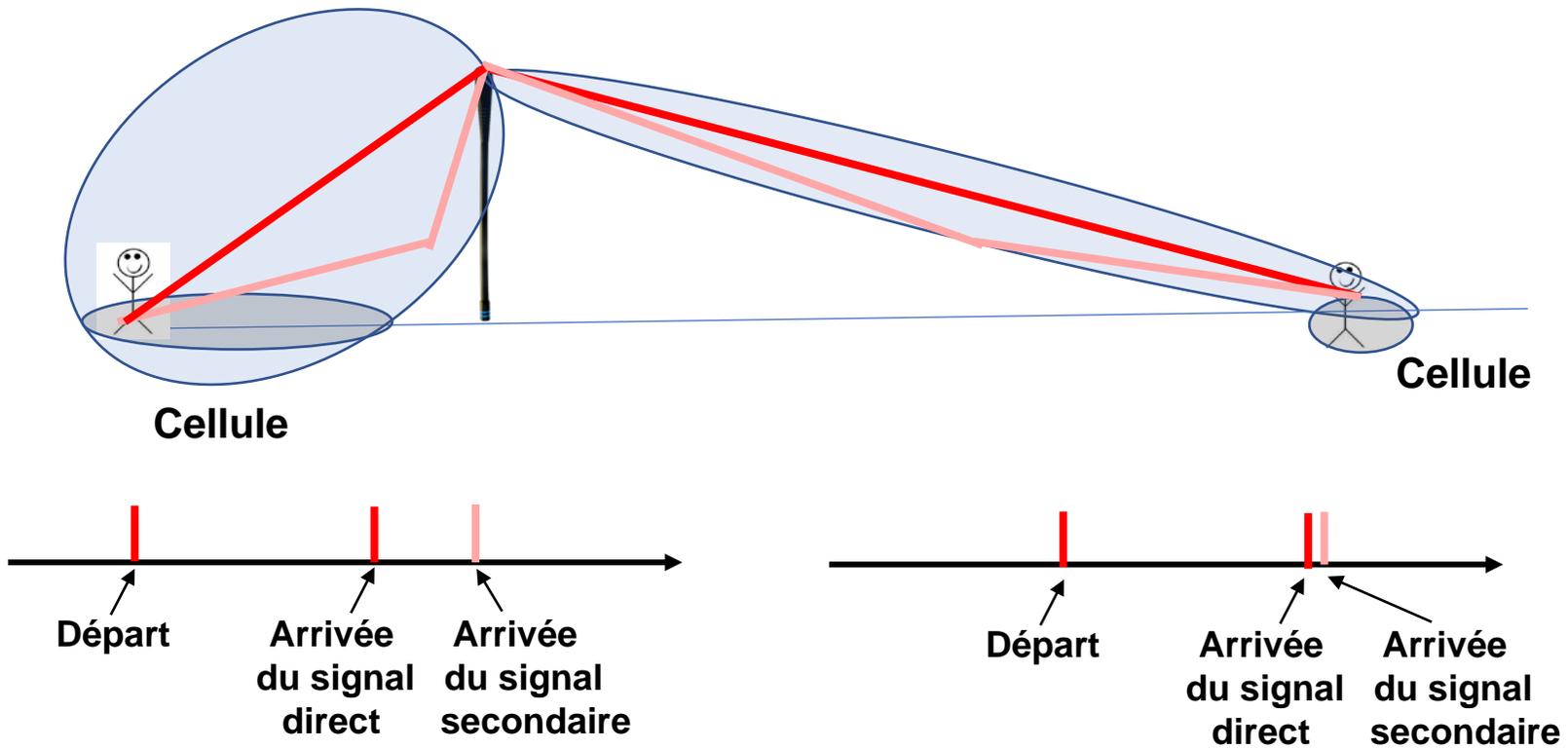


# Directionnalité de l'antenne

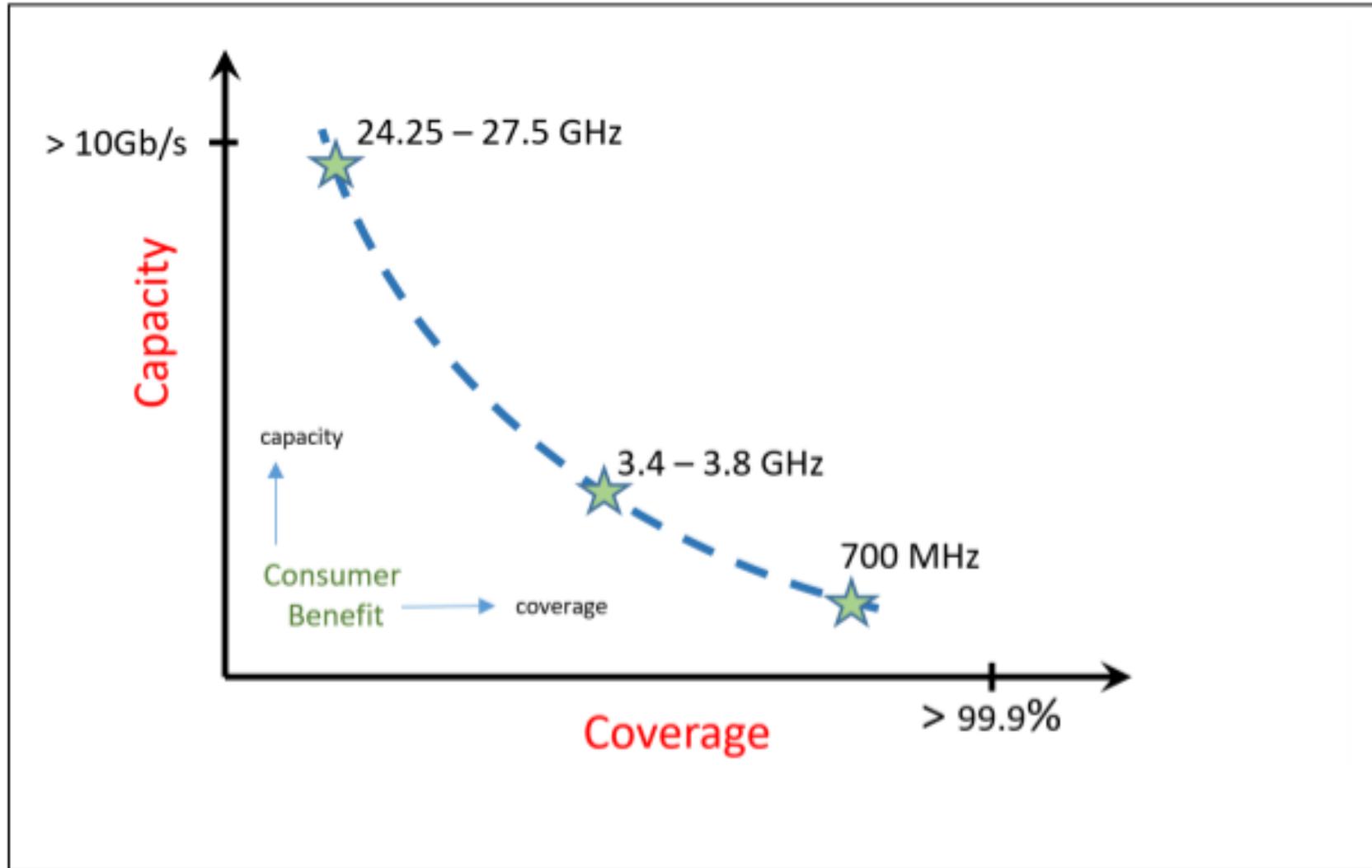
- 3<sup>e</sup> règle : Plus le signal est directif et moins il est puissant pour la même portée



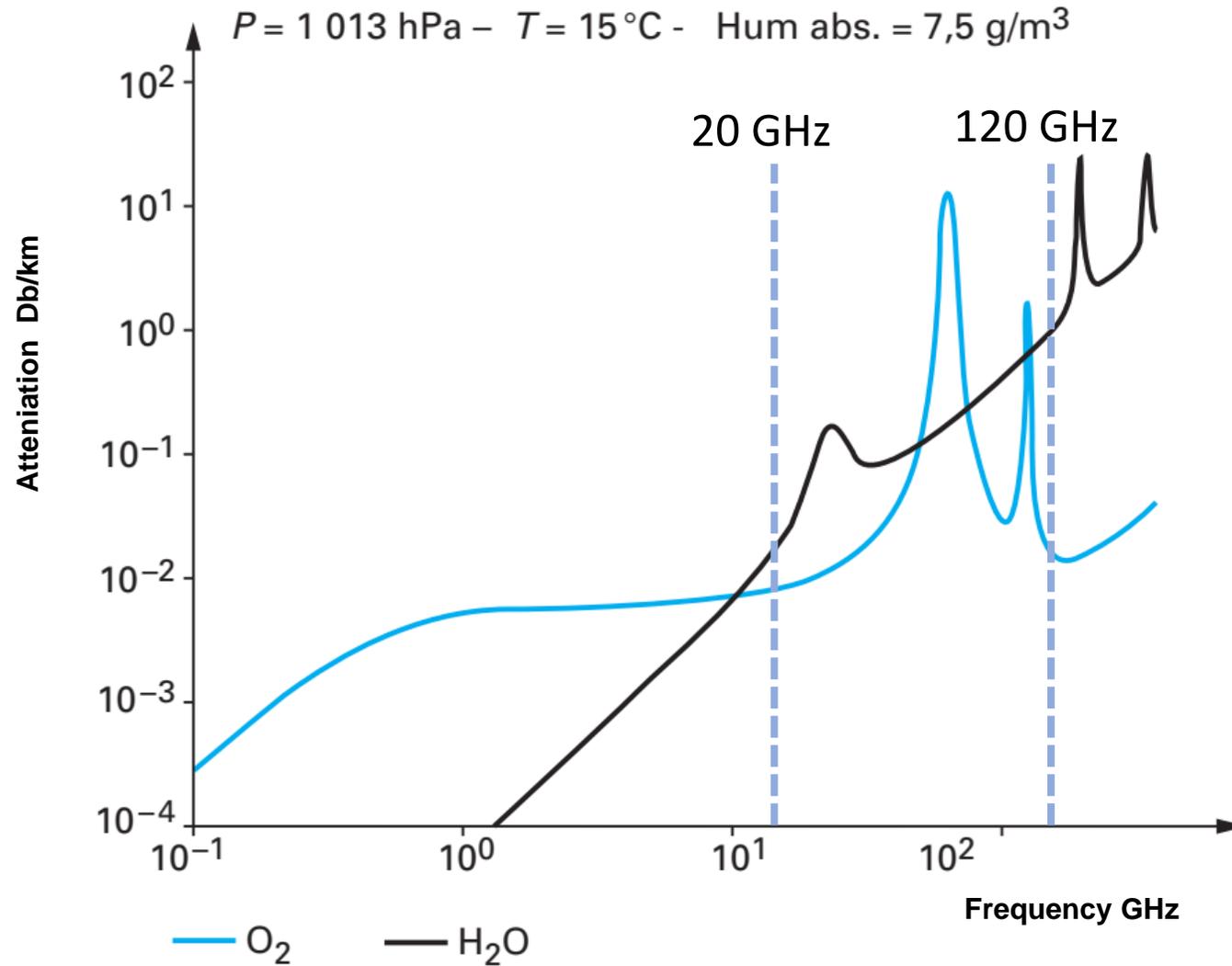
# Fading



# Capacité et couverture en fonction de la fréquence



# Fréquences utilisées par la 5G



# Législation des fréquences radios

- **L'utilisation des bandes de fréquences et de leur largeur est régulée**
  - **En France:** ANFR (Agence Nationale des Fréquences) en collaboration avec neuf affectataires dont l'ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes)
  - **En Europe:** ETSI (European Telecommunications Standards Institute)
- **Bandes avec licence**
  - **Bande soumise à contribution financière de la part des opérateurs voulant l'opérer**
    - Une durée d'exploitation
    - Des obligations (couverture, qualité de service, respect de l'environnement) à respecter
    - Exemples
      - Bande 900 MHz & 1800 MHz (2G & 3G)
      - Bande 2,6 GHz (4G)
- **Bandes sans licence**
  - **Bande libre d'accès dans la limite des conditions dictées par l'autorité de régulation**
    - Bande des 2,4 GHz & 5,15 GHz
      - Wi-Fi, Bluetooth, etc...

# Ondes électromagnétiques

- L'élément le plus dangereux est le smartphone (l'élément qui émet et qui est près du corps) : la distance entre le corps et l'antenne est très faible
- Pas de problème pour le Wi-Fi puisque les équipements Wi-Fi sont en général à au moins 10 cm
- DAS : débit d'absorption spécifique

Limite pour les radiofréquences en France DAS (Débit d'Absorption Spécifique)

Pour une antenne GSM 900 : 41 V/m

Pour une antenne GSM 1800 : 58 V/m

Pour une antenne UMTS : 61 V/m

Pour le wifi et les fours micro ondes : 61 V/m

Pour la radio FM : 28 V/m

Limite DAS pour la France : 2 W/kg (tête)

Limite DAS pour la France : 2 W/kg (Tronc)

Limite DAS pour la France : 4 W/kg (Membre)

# Ondes électromagnétiques

## Les ondes électromagnétiques

**SOURCES LOINTAINES**  
(environnement)

**1 000 000 W**  
Émetteur radio AM

**Jusqu'à 780 000 W**  
Émetteur télévision

**Jusqu'à 40 W**  
Antennes  
téléphonie mobile

**Jusqu'à 1 W**  
Wi-Fi

**Jusqu'à 300 000 W**  
Émetteur radio FM

**Jusqu'à 30 W**  
WiMax

**SOURCES PROCHES**

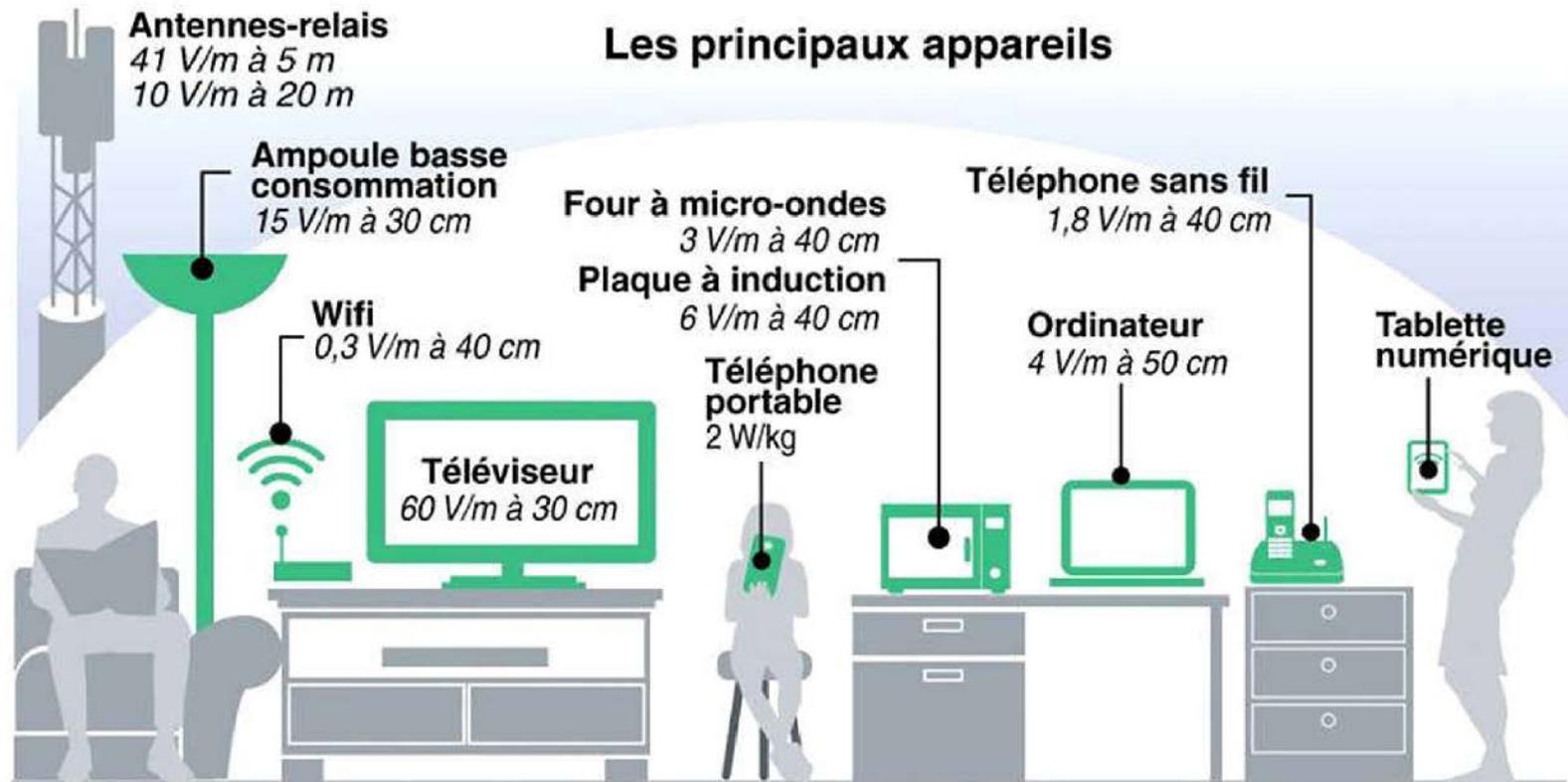
**0,1 W max.**  
Wi-Fi

**Entre 0,001  
et 0,025 W max.**  
Bluetooth

**2 W max.**  
Téléphone mobile

**0,01 W**  
Interphone bébé

# Ondes électromagnétiques



## Les mesures

- **Watt par kilo (W/kg)**  
pour les appareils collés au corps
- **Volt par mètre (V/m)**  
pour les appareils à distance

Limite pour les radiofréquences en France DAS (Débit d'Absorption Spécifique)

Pour une antenne GSM 900 : 41 V/m

Pour une antenne GSM 1800 : 58 V/m

Pour une antenne UMTS : 61 V/m

Pour le wifi et les fours micro ondes : 61 V/m

Pour la radio FM : 28 V/m

Limite DAS pour la France: 2 W/kg (tête)

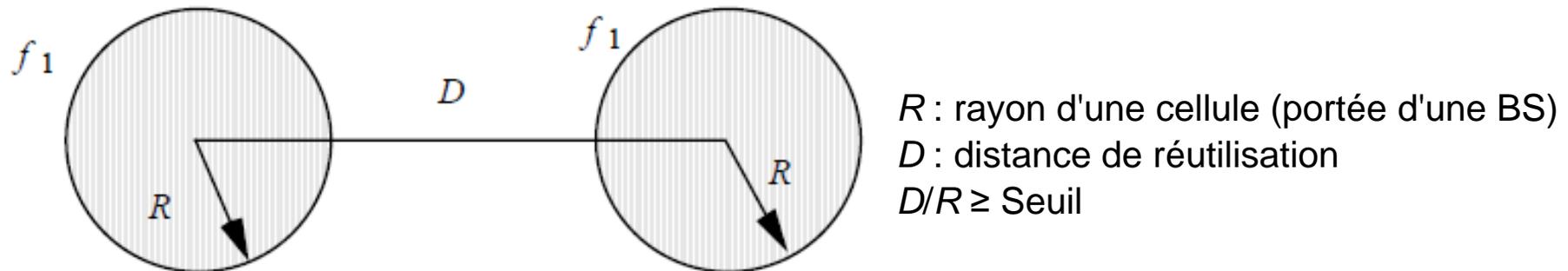
Limite DAS pour la France: 2 W/kg (Tronc)

Limite DAS pour la France 4 W/kg (Membre)

# **Architecture cellulaire**

# Concept cellulaire : introduction

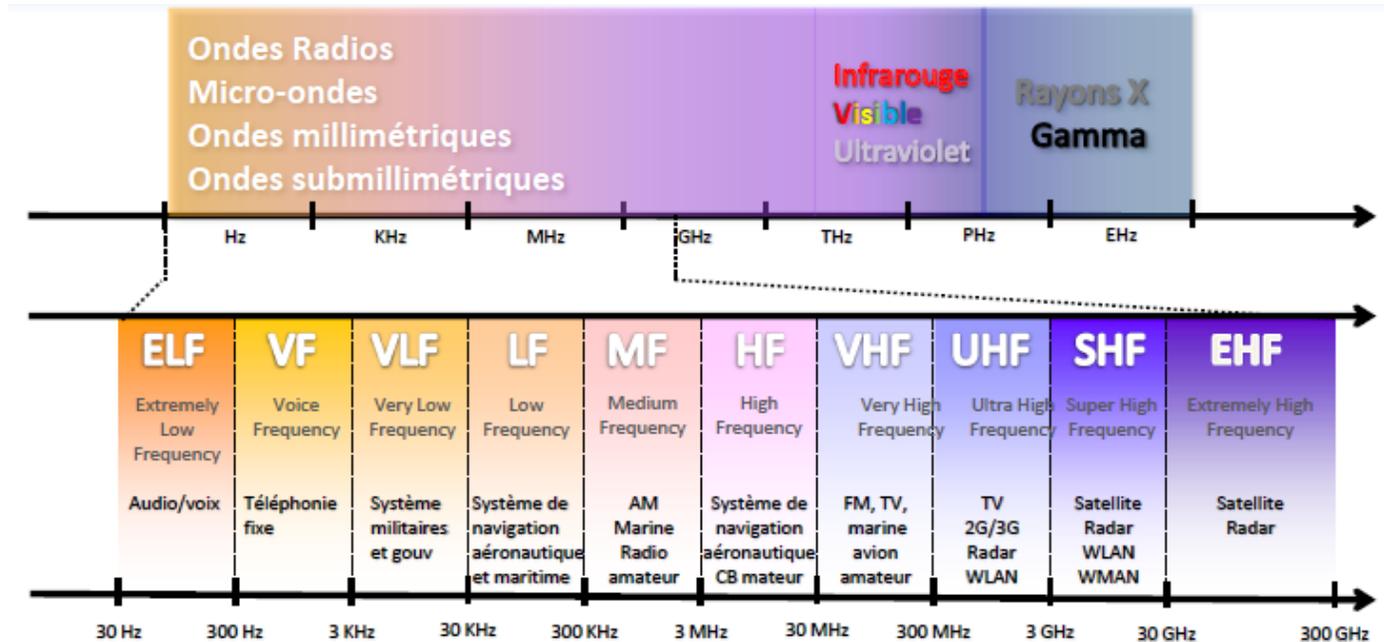
- ❑ Le territoire est divisé en "cellules"
- ❑ Chacune est desservie par une station de base
- ❑ Division non perceptible aux usagers
- ❑ Les mêmes canaux de fréquence sont réutilisés dans plusieurs cellules selon la capacité du système à résister aux interférences



# Familles des technologies radio

- **Sans fil**
  - IEEE
  - Extension radio d'un réseau filaire existant
    - Wi-Fi = Extension d'un réseau Ethernet
  - Wimax
- **Mobiles**
  - ETSI, 3GPP, 3GPP2
  - Donner la capacité à un utilisateur de communiquer à l'extérieur de son réseau d'origine en conservant son adresse (GSM, Mobile IP)
- **Les différences**
  - Dimensionnement du réseau
  - Allocation des ressources
  - La vitesse de déplacement
  - Les déplacements intercellulaires (handover ou handoff)

# Bandes de fréquences



## Exemples

Télévision analogique: 470 –830 MHz

GSM(Global System for Mobile communications) : 900 MHz

DCS(Digital Cellular Service): 1800 MHz

DECT(Digital Enhanced Cordless Telephone): 1880 –1900 MHz

UMTS(Universal Mobile Telecommunications Service): 2 GHz

Wi-Fi(Wireless Fidelity): 2,4 GHz & 5 GHz

WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access): 3,5 GHz

Radio FM : partie des fréquences VHF (87,5 à 108 MHz)

# Législation des fréquences radios

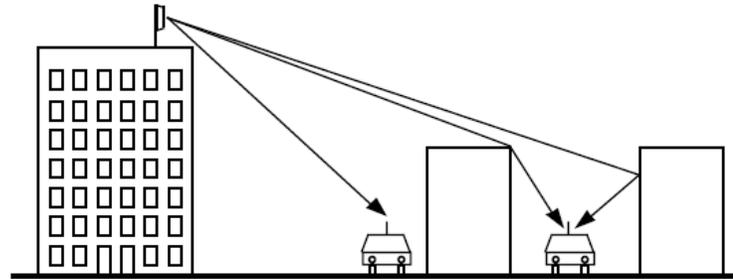
- **L'utilisation des bandes de fréquences et de leur largeurs est régulée**
  - **En France:** ANFR (Agence Nationale des Fréquences) en collaboration avec neuf affectataires dont l'ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes)
  - **En Europe:** ETSI (European Telecommunications Standards Institute)
- **Bandes avec licence**
  - **Bande soumise à contribution financière de la part des opérateurs voulant l'opérer**
    - Une durée d'exploitation
    - Des obligations (couverture, qualité de service, respect de l'environnement) à respecter
    - Exemples
      - Bande 900 MHz & 1800 MHz (GSM & DCS)
      - Bande 2 GHz (UMTS)
- **Bandes sans licence**
  - **Bande libre d'accès dans la limite des conditions dictées par l'autorité de régulation**
    - Bande des 2,4 GHz & 5 GHz
      - Wi-Fi, Bluetooth, etc...

# Réseaux sans fil/mobiles : difficultés

- Le principal problème dans les réseaux mobiles est le partage de l'espace des canaux de transmission
  - L'environnement est le même pour tous les utilisateurs (réglementation)
  - L'espace des fréquences disponibles est restreint
  - Le milieu est particulièrement bruité (trajets multiples, interférences)
  - Les émetteurs sont mobiles
    - Mécanisme de localisation
    - Support des déplacement intercellulaire (*handover*)
  - La sécurité
  - L'économie d'énergie, contrôle de puissance

# La liaison radio : propagation

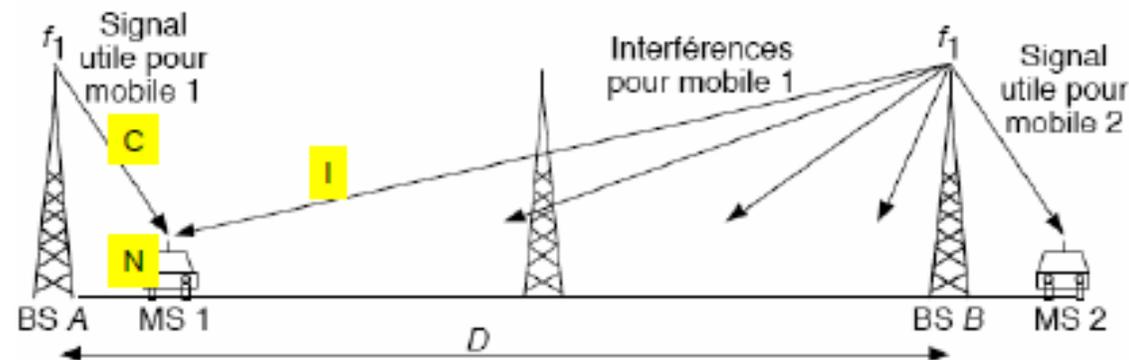
- ❑ Une onde peut subir plusieurs altérations : diffractions, réflexions, Atténuation due aux arbres (selon leur hauteur, densité), due à l'atmosphère (oxygène et pluie)



- ❑ **Affaiblissement** : évanouissement lent (à grande échelle). Perte dûe à l'éloignement du terminal par rapport à l'émetteur
- ❑ **Effet de masque** : aussi appelé *shadowing* ou à moyenne échelle. Il est causé par la présence d'obstacles (éventuellement mobiles)
- ❑ **Multi-trajets** : évanouissement rapide dû aux réflexions multiples. Les ondes radio sont altérées en phase ou en fréquence (somme constructive ou destructive)

# Interférence co-canal

- ❑ L'utilisation d'une même fréquence sur deux sites éloignés crée de l'interférence co-canal
- ❑ Grandeurs principales
  - Puissance du signal utile :  $C$  (parfois  $S$  ou  $P_{RX}$ , on dit aussi niveau, *level*)
  - Ensemble des interférences :  $I$  (puissance)
  - Bruit (thermique) :  $N$  (puissance)
- ❑ Mesure de la qualité radio :  $C/(I+N) \sim C/I$  ou  $SINR \sim SIR$  (Signal to Interference Ratio)

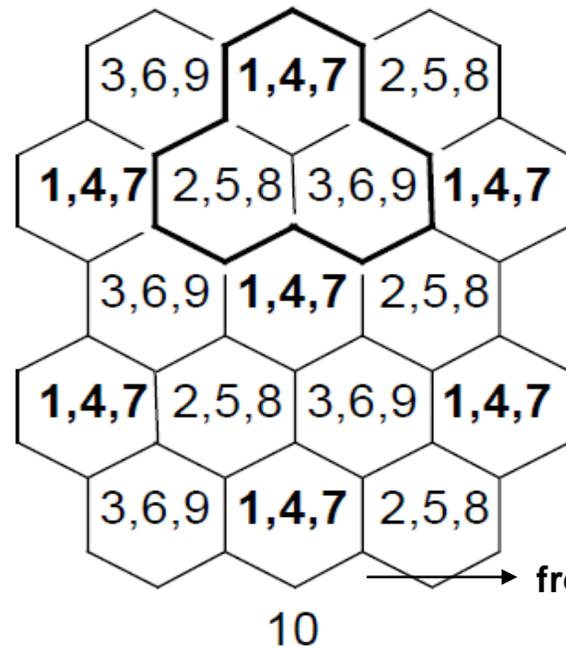


# Critères de qualité radio

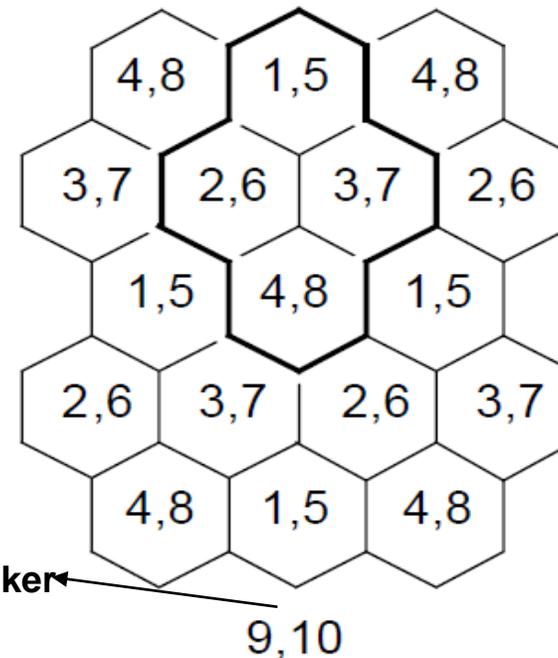
- La qualité du signal radio est mesurée par le SINR
- Probabilité de blocage (*blocking*) : probabilité que le contrôle d'admission rejette un nouvel appel par manque de ressources
  - On utilise la loi Erlang-B pour le dimensionnement
  - On désire généralement  $P_b < 2\%$
- Probabilité de coupure (*dropping*) : probabilité qu'un appel en cours soit interrompu. Raisons possibles
  - Mauvaises conditions radio persistantes
  - Echech du hand-over

# Répartition des fréquences suivant un motif régulier

- Motif cellulaire : ensemble de cellules dans lequel chaque fréquence de la bande est utilisée une fois et une seule fois



Motif de taille 3

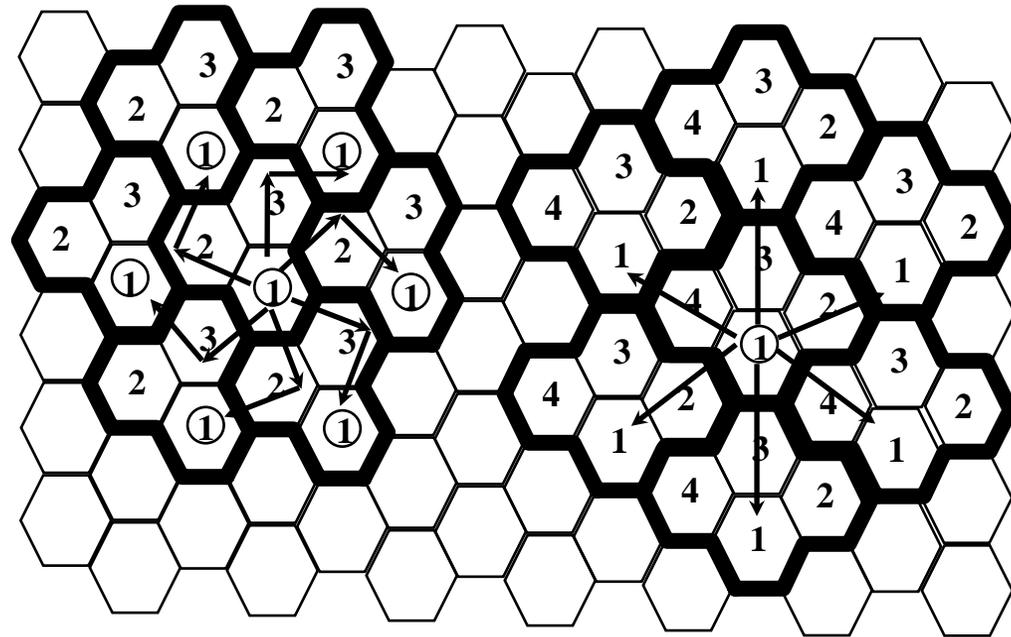


Motif de taille 4

***Exemple de répartition de 10 fréquences sur un motif régulier***

# Allocation de ressources

- Réutilisation : bande montante et bande descendante.
  - à chaque bande => un certain nombre de porteuses
  - distance de réutilisation : motif  $K = i^2 + ij + j^2$



$K=3, i=1, j=1$

$K=4, i=0, j=2$

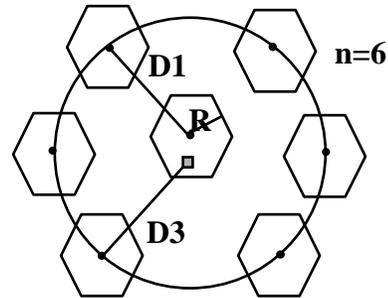
# Allocation de ressources

- $C/I$  = puissance / interférence
- on montre que  $C/I$  peut s'exprimer en fonction de :
- $D$  : distance de réutilisation
- $R$  : rayon cellule
- $\gamma$  : coefficient d'affaiblissement
- $n$  : nombre de "brouilleurs" stations à même fréquence (1..6)
- $D'$  = distance mobile / brouilleur
- 
- $C/I$  du système  $\Rightarrow D \Rightarrow K$  : motif cellulaire

$$D = \sqrt{3KR}$$

une distance  $D$  utilisant la

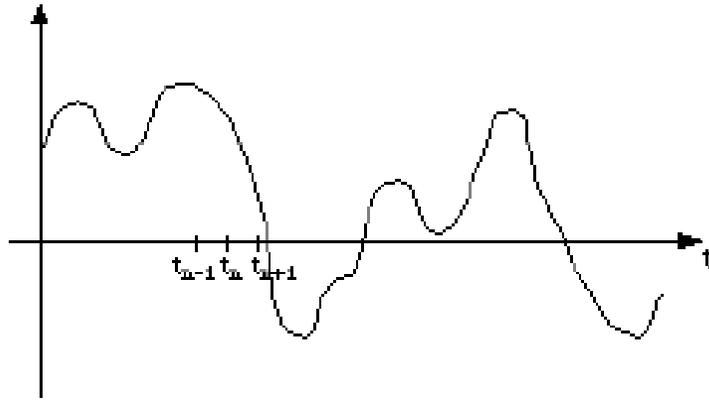
# Allocation de ressources



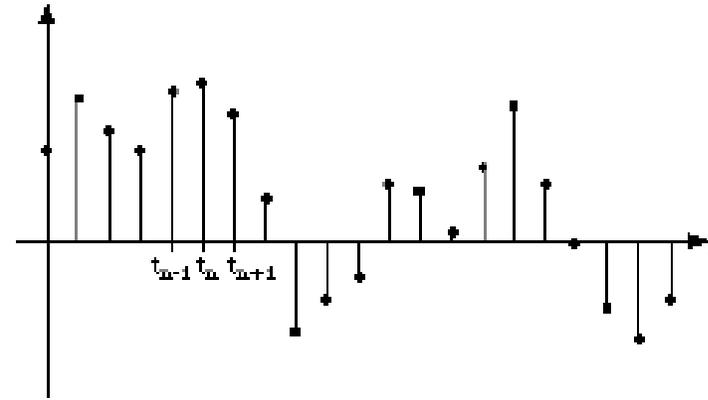
$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_k D_k^{-\gamma}}$$

- (1,1) K= 3 D=3.R
- (0,2) K= 4 D=3,46.R
- (1,2) K= 7 D=4,6.R
- (0,3) K= 9 D=5,2.R
- (2,2) K=12 D=6.R
- (1,3) K=13 D=6,24.R
- (2,3) K=19 D=7,55.R
- + K est grand, + nb canaux/cellule est petit
- + K est petit, + interférence co-canal est grande

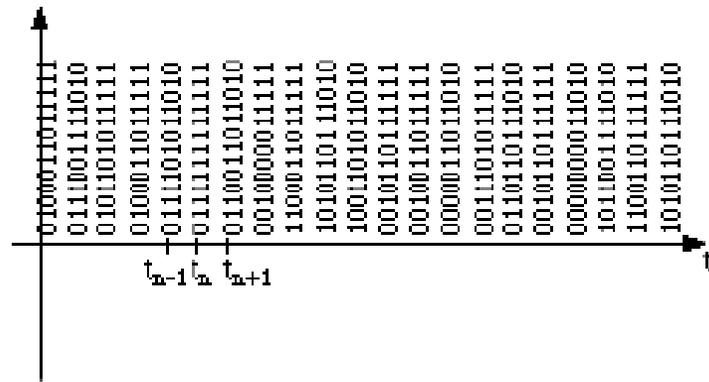
# Transmission analogique vs numérique



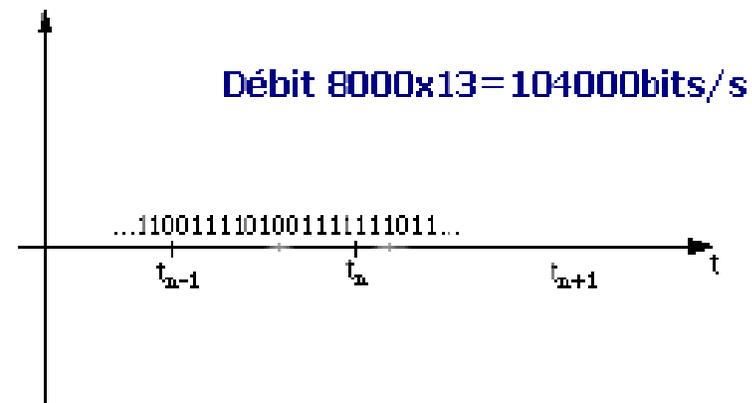
1- signal analogique



2- signal échantillonné à 8 kHz

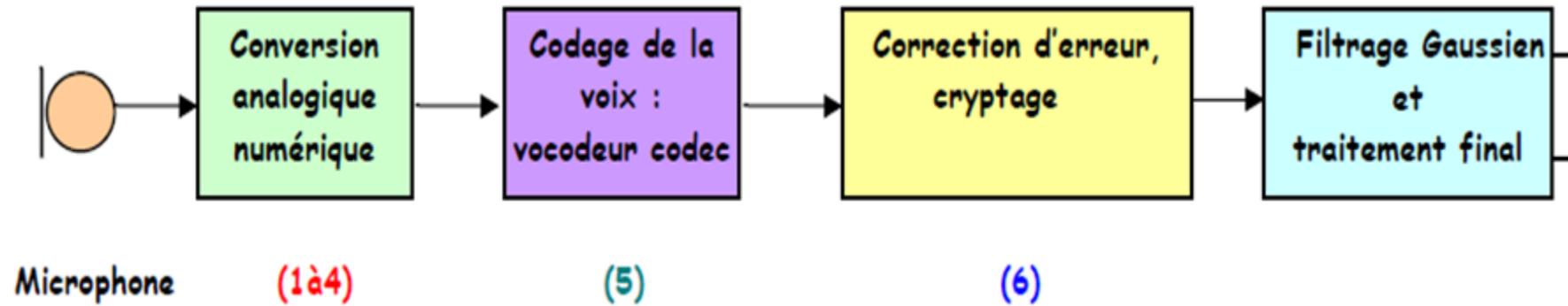


3- échantillons quantifiés sur 13 bits



4- mots de 13 bits sérialisés

# Traitement du signal vocal



- Ce signal binaire subit une diminution de débit importante (5) grâce au vocodeur qui abaisse le débit (de 104 kbps à 13 kbips en GSM)
- Les données numériques sont protégées par des codes correcteurs d'erreurs (6) et l'application d'algorithmes de cryptage (6) assurant la confidentialité des transferts
- La modulation permet d'adapter un signal au canal de communication

# dB, dbm, dBi

- Puissance d'un signal
  - $P(\text{en mW}) = 10^{P(\text{en dBm})/10}$
  - $P(\text{en dBm}) = 10 \log_{10}(P(\text{en mW}) \times 10^{-3})$
- Le dB exprime un accroissement de la puissance
  - une addition en dB correspond à une multiplication et une multiplication par une constante à une mise en exposant de cette constante
- Quelques règles simples
  - + 3dB = Puissance est doublée
  - +10 dB = Puissance est multipliée par 10
- La «performance» d'une antenne est exprimée en dBi
  - dBi: Décibel isotropique
  - dBi est équivalent au dBm
  - Plus l'angle d'ouverture du lobe principal est faible plus le gain de l'antenne sera important

P en dBm	P en MilliWatt
50	100 Watts
40	10 Watts
30	1 Watt
20	100
17	50
10	10
0	1
-10	0,1
-20	0,001
-40	0,0001
-60	0,000001
-80	0,00000001
-85	3,1E-09
-89	1,25E-09
-91	8E-10
-94	4E-10

# Antennes

- Permet d'améliorer les transmissions radio
  - Ne joue pas le rôle d'amplificateur
- Les différents types d'antennes
  - Omni (360°)
    - Exemple : Clé USB Wi-Fi ou 3G
    - Gain entre 2 et 10 dBi
  - Sectorielle (180°)
    - Exemple : Antenne télé
    - Gain entre 10 et 19 dBi
  - Directionnelle (30°)
    - Exemple : Parabole
    - Gain supérieur à 20 dBi
- Une antenne amovible offre la flexibilité de choisir la meilleure antenne pour l'emplacement et l'usage d'un point d'accès wifi.
  - Par exemple, le câble peut être utilisé pour connecter un point d'accès installé à l'intérieur d'une antenne montée à l'extérieur.

# Quelques ordres de grandeurs

## Puissances d'émission

Station de base GSM	35 W/45.5 dBm 45 W/46.5 dBm
Station Mobile GSM 900	2 W/33 dBm

Station de base UMTS	20 W/43 dBm 40 W/46 dBm
Station Mobile UMTS	125 mW/21 dBm

## Gains d'antenne

- Station mobile : 0 dBi
- Station de base : 11 dBi (antenne omni), 17 dBi (tri-sectorisée)

# Débits/portée théoriques et réels

## Débit

- Bande passante
- Modulation
- Types d' antennes utilisées coté terminal et coté réseau
- Lien radio
  - Distance, shadowing, interférences, réflexions sur les immeubles, ...
- Nombre d' abonnés actifs se partageant la bande passante
- Vitesse de déplacement de l' abonné
- Catégorie du terminal
- Sensibilité du récepteur

## Portée

- Bande de fréquence
  - Haute atténuation avec les fréquences élevées
- Puissance du signal
- Types d' antennes utilisées
  - MIMO,
  - Directivité
- Environnement
- Vitesse de déplacement de l' abonné
- Sensibilité du récepteur (meilleure portée avec une faible sensibilité)

# Sensibilité de réception

- Le récepteur des cartes wifi a un seuil inférieur de sensibilité qui déterminera la puissance minimale devant être reçue pour garantir un certain débit de données.
- Si la puissance reçue est inférieure au seuil, le débit de données devra être réduit pour retrouver des performances acceptables
  - Donc on a avantage à utiliser des cartes avec des seuils de sensibilité de réception le plus bas possible

**Sensibilité carte  
802.11b**

<b>Orinoco PCMCIA Silver/Gold</b>	<b>Cartes CISCO Aironet 350</b>
11Mbps => -82 dBm	11Mbps => -85 dBm
5.5Mbps => -87 dBm	5.5 Mbps => -89 dBm
2Mbps=> -91 dBm	2 Mbps => -91 dBm
1Mbps=> -94 dBm	1 Mbps => -94 dBm

# Formes de diversité



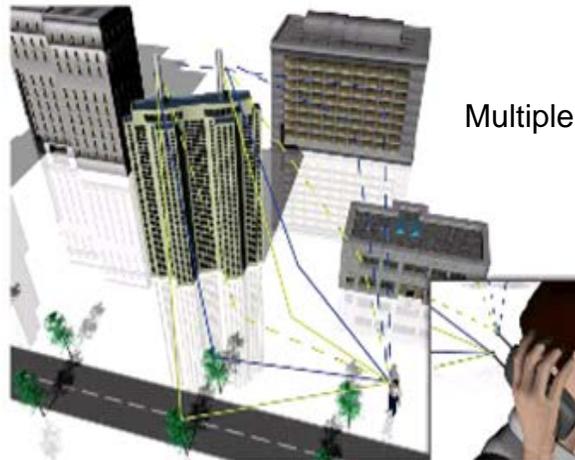
**SISO**

Single In Single Out



**MISO**

Multiple In Single Out

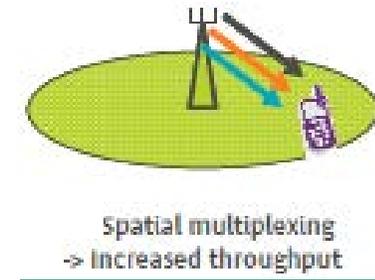
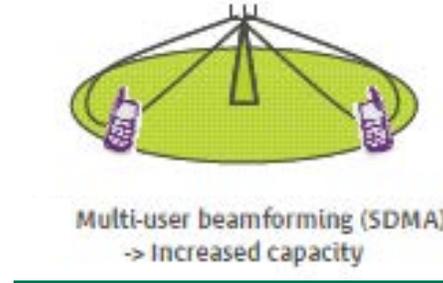
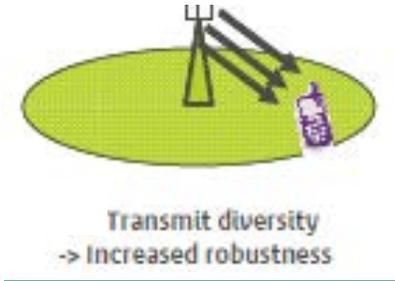


**MIMO**

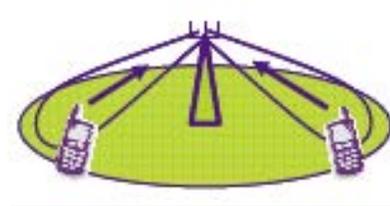
Multiple In Multiple Out

# Multi-antennes dans LTE : dimension spatiale

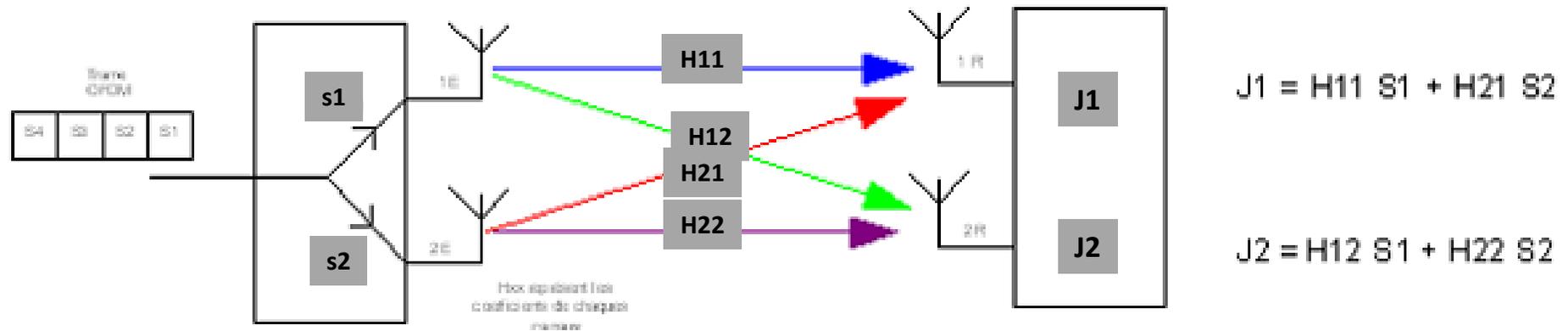
- Downlink



- Uplink : une seule antenne à l'émission
  - Multiplexage spatial des utilisateurs avec plusieurs antennes au niveau de la station de base



# MIMO : exemple



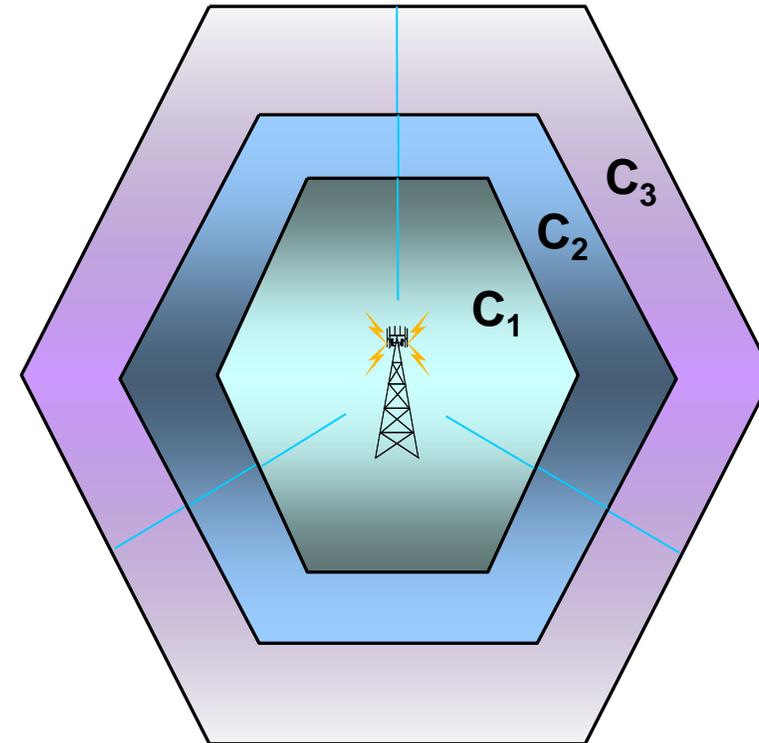
Pour recomposer la trame :

- Résoudre un système de 2 équations à 2 inconnues afin d'isoler  $S_1$  et  $S_2$
- 
- Les branches d'antennes supplémentaires sont coûteuses, surtout du côté du terminal
- Les débits réalisables dépendent fortement des conditions de propagation

⇒ **Maximum théorique : Data Rate =  $\min(N_{TX}, N_{RX}) \times$  Single antenna Rate**

# AMC

- Adaptive Modulation and Coding
- Le profil de burst change selon l'état du canal (SINR)
- Compromis débit – robustesse
- Adapter la modulation et le codage en fonction de la qualité du signal



 C<sub>1</sub> = 64 QAM  
 C<sub>2</sub> = 16 QAM  
 C<sub>3</sub> = QPSK

## Exemples de profile de bursts

Profil burst	Modulation	Coding	Rate	Receiver SNR threshold (dB)
0	BPSK	(CC)*	1/2	6.4
1	QPSK	(RS + CC/CC)**	1/2	9.4
2	QPSK	(RS + CC/CC)	3/4	11.2
3	QAM-16	(RS + CC/CC)	1/2	16.4
4	QAM-16	(RS + CC/CC)	3/4	18.2
5	QAM-64	(RS + CC/CC)	2/3	23.2
6	QAM-64	(RS + CC/CC)	3/4	24.4

\* convolutional code (CC)

\*\* Reed Solomon (RS)

# MCS

MCS Index - 802.11n and 802.11ac

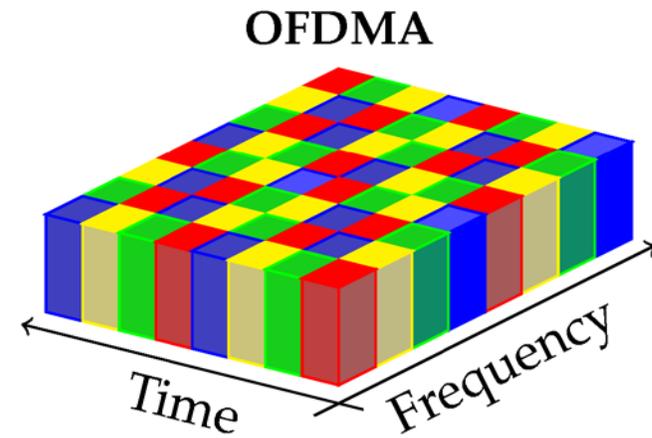
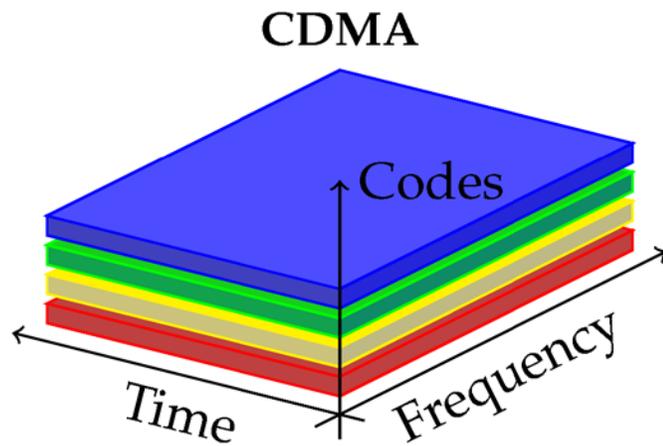
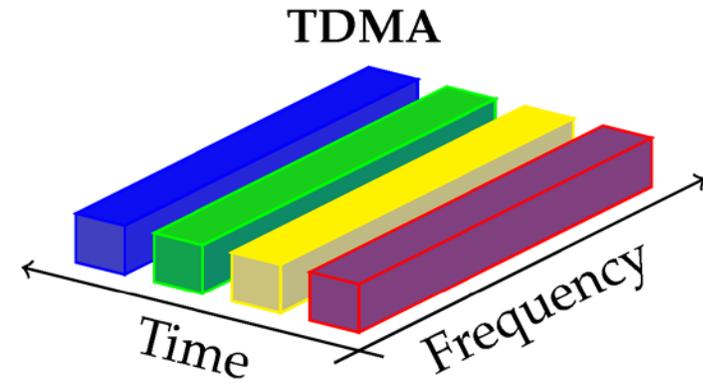
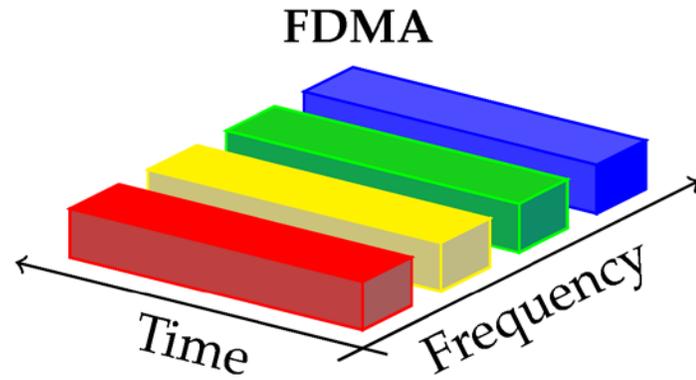
					802.11n		802.11ac					
HT MCS Index	VHT MCS Index	Spatial Streams	Modulation	Coding	20MHz		40MHz		80MHz		160MHz	
					Data Rate No SGI	Data Rate SGI						
0	0	1	BPSK	1/2	6.5	7.2	13.5	15	29.3	32.5	58.5	65
1	1	1	QPSK	1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130
2	2	1	QPSK	3/4	19.5	21.7	40.5	45	87.8	97.5	175.5	195
3	3	1	16-QAM	1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260
4	4	1	16-QAM	3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390
5	5	1	64-QAM	2/3	52	57.8	108	120	234	260	468	520
6	6	1	64-QAM	3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	526.5	585
7	7	1	64-QAM	5/6	65	72.2	135	150	292.5	325	585	650
	8	1	256-QAM	3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780
	9	1	256-QAM	5/6	n/a	n/a	180	200	390	433.3	780	866.7
8	0	2	BPSK	1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130
9	1	2	QPSK	1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260
10	2	2	QPSK	3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390
11	3	2	16-QAM	1/2	52	57.8	108	120	234	260	468	520
12	4	2	16-QAM	3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780
13	5	2	64-QAM	2/3	104	115.6	216	240	468	520	936	1040
14	6	2	64-QAM	3/4	117	130.3	243	270	526.5	585	1053	1170
15	7	2	64-QAM	5/6	130	144.4	270	300	585	650	1170	1300
	8	2	256-QAM	3/4	156	173.3	324	360	702	780	1404	1560
	9	2	256-QAM	5/6	n/a	n/a	360	400	780	866.7	1560	1733.3
16	0	3	BPSK	1/2	19.5	21.7	40.5	45	87.8	97.5	175.5	195
17	1	3	QPSK	1/2	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390
18	2	3	QPSK	3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	526.5	585
19	3	3	16-QAM	1/2	78	86.7	162	180	351	390	702	780
20	4	3	16-QAM	3/4	117	130	243	270	526.5	585	1053	1170
21	5	3	64-QAM	2/3	156	173.3	324	360	702	780	1404	1560
22	6	3	64-QAM	3/4	175.5	195	364.5	405	n/a	n/a	1579.5	1755
23	7	3	64-QAM	5/6	195	216.7	405	450	877.5	975	1755	1950
	8	3	256-QAM	3/4	234	260	486	540	1053	1170	2106	2340
	9	3	256-QAM	5/6	260	288.9	540	600	1170	1300	n/a	n/a

# Allocation de ressources

- Propagation en contexte radio :
  - Atténuation de parcours (pathloss)
  - Effets de masque (shadowing effects)
  - Interférences et brouillages
    - bruit : externe (orage, soleil, ...) ; interne (moteurs, ligne électrique, ...)
    - Interférence : canal adjacent, co-canal
- Canaux radio :
  - Bande étroite
  - Multiplexage : FD, TD, CD
  - En mobile : FDMA, TDMA, CDMA
  - Duplexage : accès aléatoire, et multiplex (TDD, FDD)
  - Concept cellulaire :
    - en fixe : rajouter des câbles
    - affaiblissement du signal => réutilisation (cellules co-canaux)
    - couverture qui dépend de la densité

- Techniques d'accès
  - Déterministe : par un point central
  - Aléatoire : distribué
- Exemple :
  - Déterministe : FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA
  - Aléatoire : Aloha, Slotted Aloha, CSMA, CSMA-CA
- Accès initial : je veux une ressource – Slotted Aloha
- Après : Méthodes d'accès TDMA, CDMA, OFDMA...

# Allocation de ressources



# Duplexage

## □ FDD

- Trafic symétrique
  - la voix
- Matériel radio complexe
  - Duplexer, deux antennes, etc..
  - Largeur de bande disponible en DL & UL
    - ✓ Ressources figées et liées à la largeur de bande en DL & UL

## □ TDD

- Trafic asynchrone
  - Internet
- Matériel radio simple
  - Ressources en DL & UL modifiable en fonction de la demande du réseau
    - ✓ Rapport DL/UL



**FDD** Frequency Division Duplex)

**TDD** Time Division Duplex)

$f_{DL}$  frequency Downlink

$f_{UL}$  frequency Uplink

# Matrice Hadamard

- Codes orthogonaux (les lignes)
- Produits scalaires entre deux vecteurs est nul
- Un bit = 0 ou 1
- Un code peut avoir deux formes : code et son complément
- Transmission = Somme des codes (ou de leur compléments)
- Réception = multiplication par mon code
- Somme(code(i de 1 à n))\*Codej=Codej\*Codej ou codej\*complément de codej
- Le reste s'annule

$$H_1 = [-1]$$
$$H_w = \begin{bmatrix} H_{w/2} & H_{w/2} \\ H_{w/2} & \overline{H_{w/2}} \end{bmatrix}$$

# Exemple

- Matrice à 4
- Utilisateur 1 : envoie deux bits 10
- Utilisateur 2 : envoie deux bits 11
- Utilisateur 3 envoie rien
- On alloue Ligne 1 pour U3; ligne 2 pour U1; ligne 4 pour U2
- Méthode : Code pour 1 et complément pour 0
- Transmission :  $(-11-11 \ 1-11-1)+(-111-1 \ -111-1)$
- $=(-2200 \ 002-2)$
- Décodage
  - U1  $(-22-00 \ 002-2)*(-11-11 \ -11-11)= 4 \ -4 \ (1 \ 0)$
  - U2  $(-22-00 \ 002-2)*(-111-1 \ -111-1)= 4 \ 4 \ (1 \ 1)$
  - U3  $(-22-00 \ 002-2)*(-1-1-1-1 \ -1-1-1-1) = 0 \ 0$

$$H_1 = [-1]$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_4 = \begin{bmatrix} -1 & -1-1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

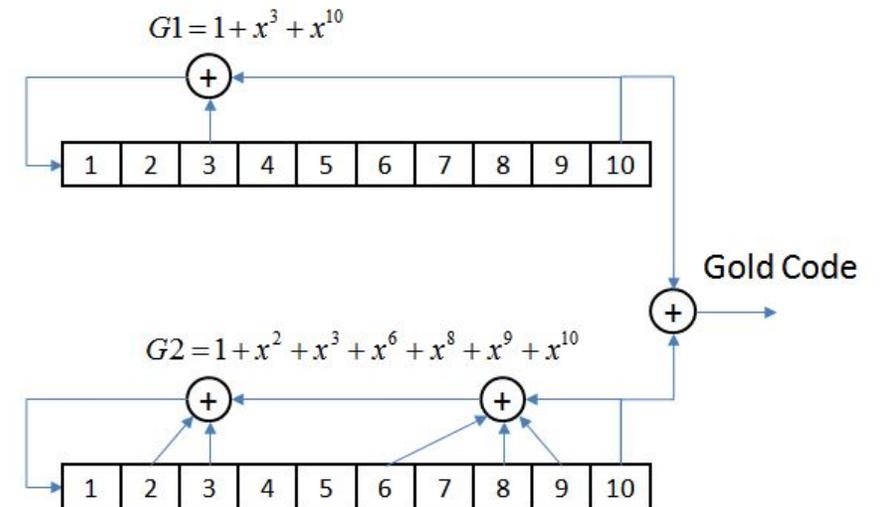
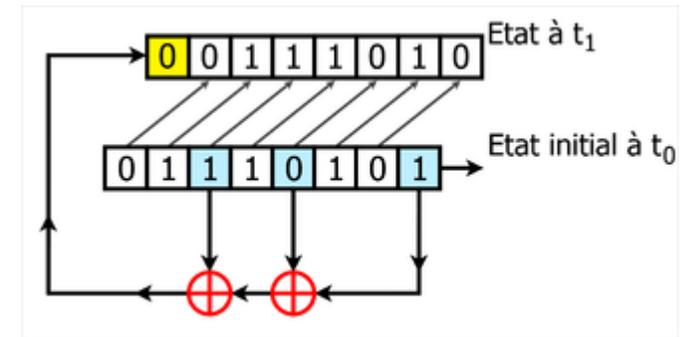
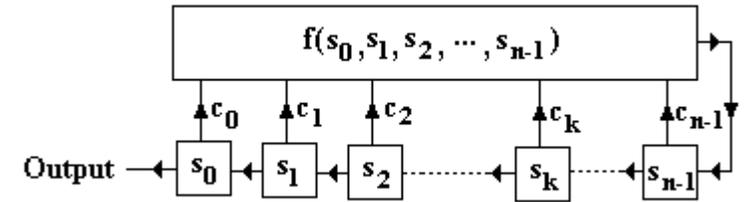
$$H_8 = \begin{bmatrix} -1 & -1-1 & -1-1 & -1-1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1-1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & +1 & +1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 \end{bmatrix}$$

# Problème

- Cela nécessite une synchronisation au chip prêt
  - Chip = bit mais plus court
  - Le bit désigne l'élément binaire de l'information
  - Le chip désigne l'élément binaire de la transmission
  - Un bit =  $n$  chips;  $n$  étant le facteur d'étalement
- Impossible d'être synchrone au chip prêt
  - l'ordre de la micro seconde
  - Transmission d'une seule antenne : pas de problème
  - Transmission de différentes antennes : impossible sans horloge GPS
    - Cas de mobiles dans une cellule (uplink) ou d'antennes adjacentes (downlink)
- Solution : masquage avec des séquences aléatoires
  - Bonne propriété de corrélation

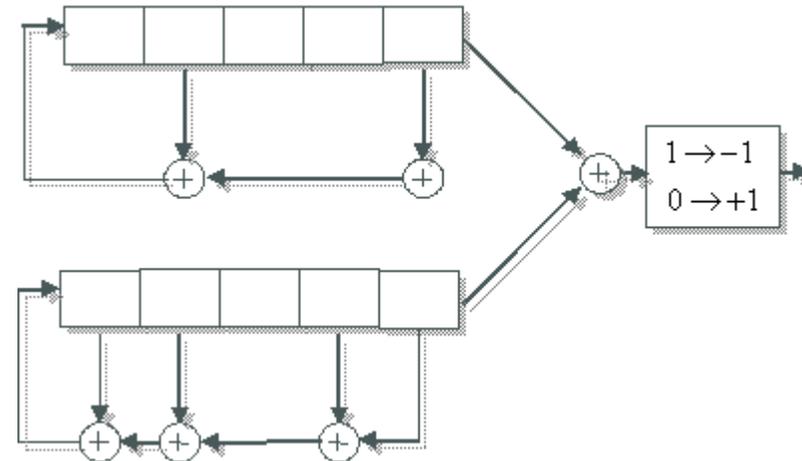
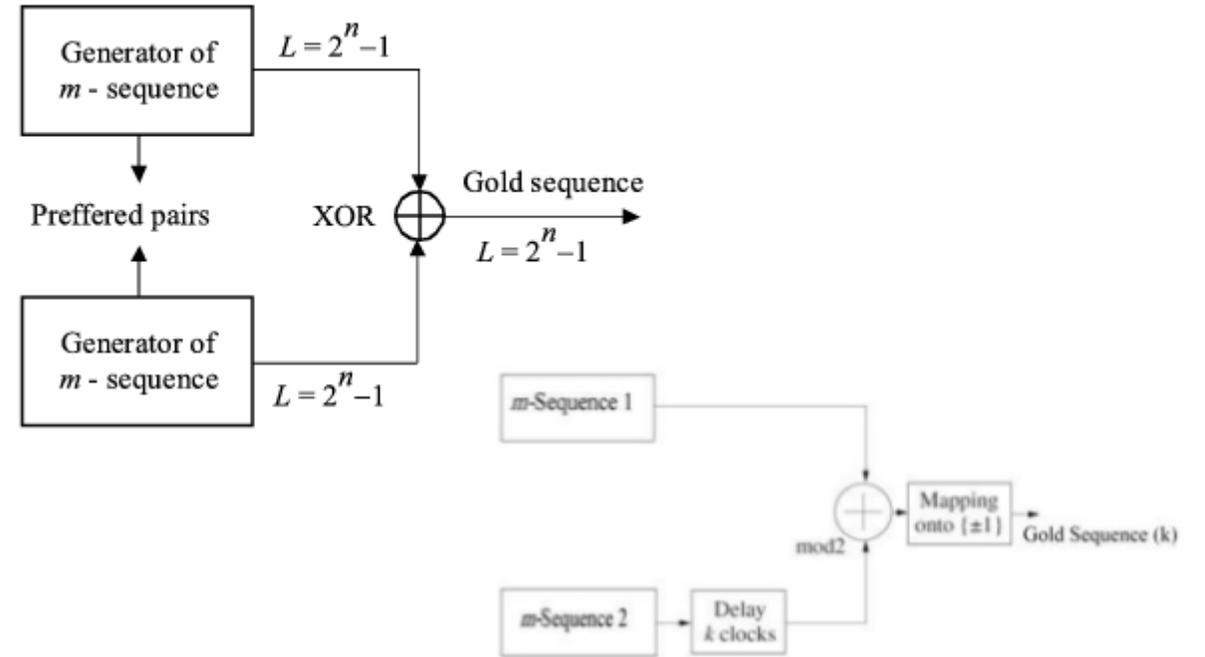
# Registre à décalage

- Corrélation croisée ( $S_i \cdot S_j$  avec  $i$  différent de  $j$ )
- Auto corrélation ( $S_i \cdot S_{i+d}$ ) d'étant un décalage
- Période du registre : Polynôme générateur divise  $1+x^N$ ;  $N=2^n-1$
- Polynôme générateur
  - $1 + \sum_{i=1}^n c_i x^i$



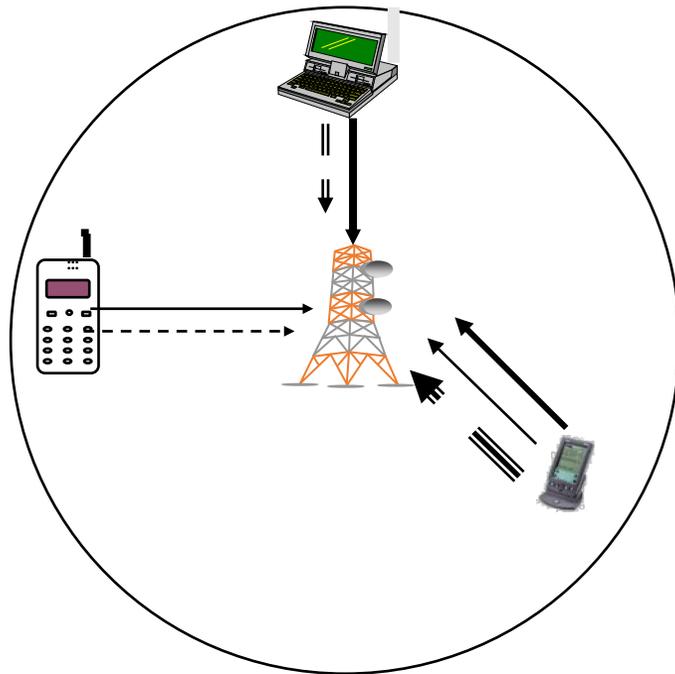
# Codes Gold

- $a_n = a_{n-5} + a_{n-2}$  (registre du haut)
- $a_n = a_{n-4} + a_{n-2} + a_{n-1}$  (registre du bas)
- Vecteur initial (11011, 11101)
- $S_1 =$   
11011:0001111100110100100001010  
111011
- Ensuite, on fait toutes les combinaisons possibles
- $S_1, S_2, S_1+S_2, S_1+S_2, d$  ( $d=1..N-1$ )
- Nombre de séquence =  $N+2$
- Si  $S_i$  est de  $O(2^n)$
- L'interférence est de  $O(2^{(n/2)})$

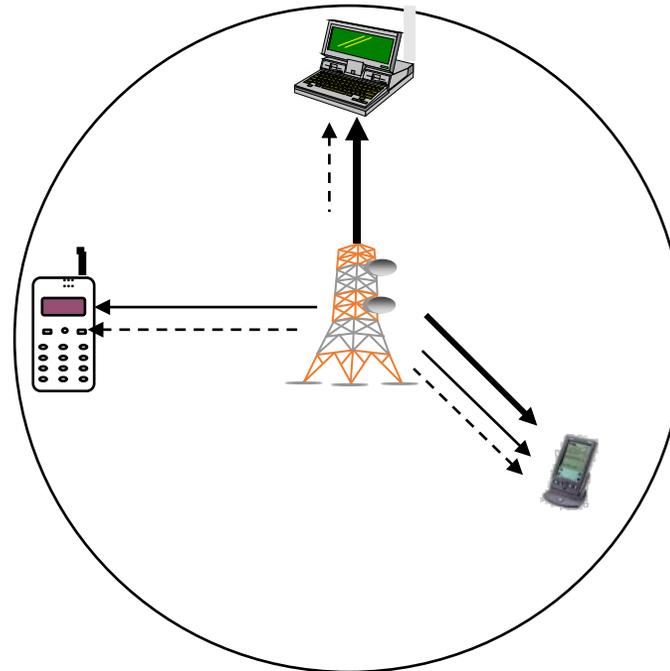


# Allocation de codes

Sens montant



Sens descendant



**Code canal : Walsh**  
 ——— voix  
 ——— Données

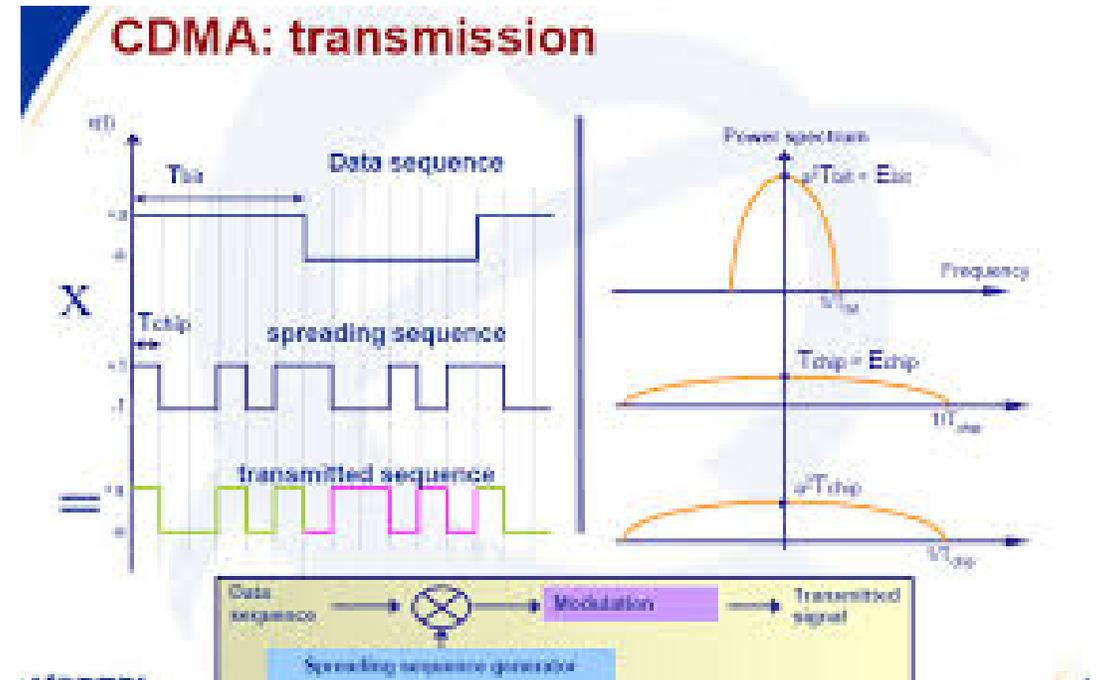
**Code utilisateur**  
 - - - - - 1  
 = = = = 2  
 = = = = 3

**Code canal : Walsh**  
 ——— voix  
 ——— Données

**Code cellule**  
 - - - - -

# Etallement du spectre

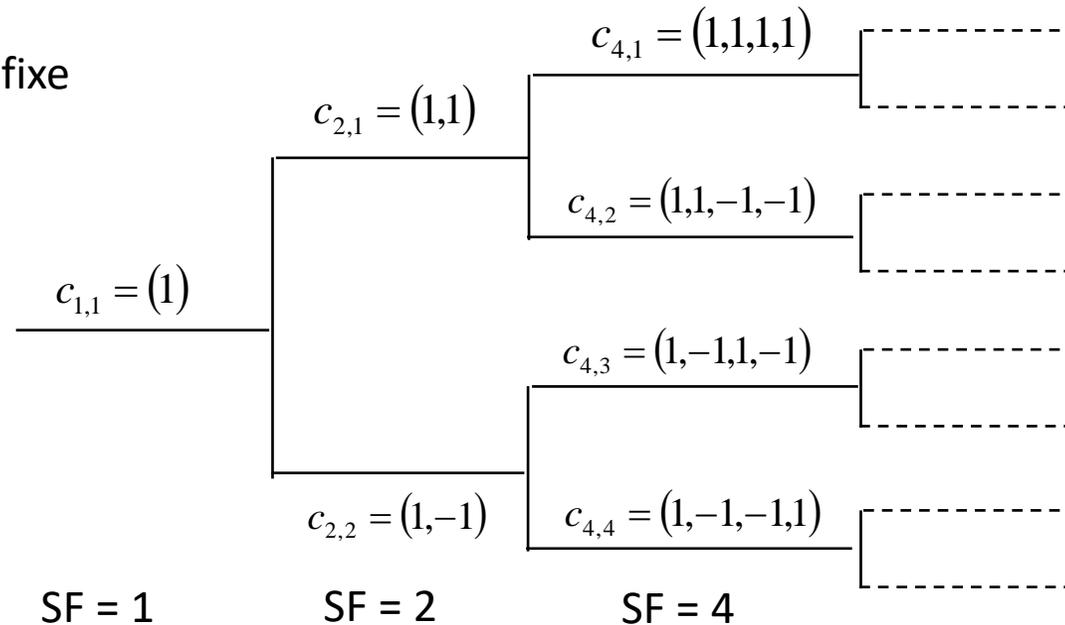
$$\begin{aligned}
 \hat{f}(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-2\pi i f t} dt \\
 &= \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} a e^{-2\pi i f t} dt = \frac{a}{-2\pi i f} \left[ e^{-2\pi i f t} \right]_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \\
 &= \frac{a}{-2\pi i f} (e^{-i\pi f T} - e^{i\pi f T}) \\
 &= \frac{a}{-2\pi i f} \times 2i \sin \pi f T \quad \left\{ \begin{array}{l} e^{i\alpha} = \cos \alpha + i \sin \alpha \\ e^{-i\alpha} = \cos \alpha - i \sin \alpha \end{array} \right. \\
 &= \frac{aT}{f T} \sin \pi f T = aT \operatorname{sinc} \pi f T
 \end{aligned}$$



# W-CDMA, Downlink

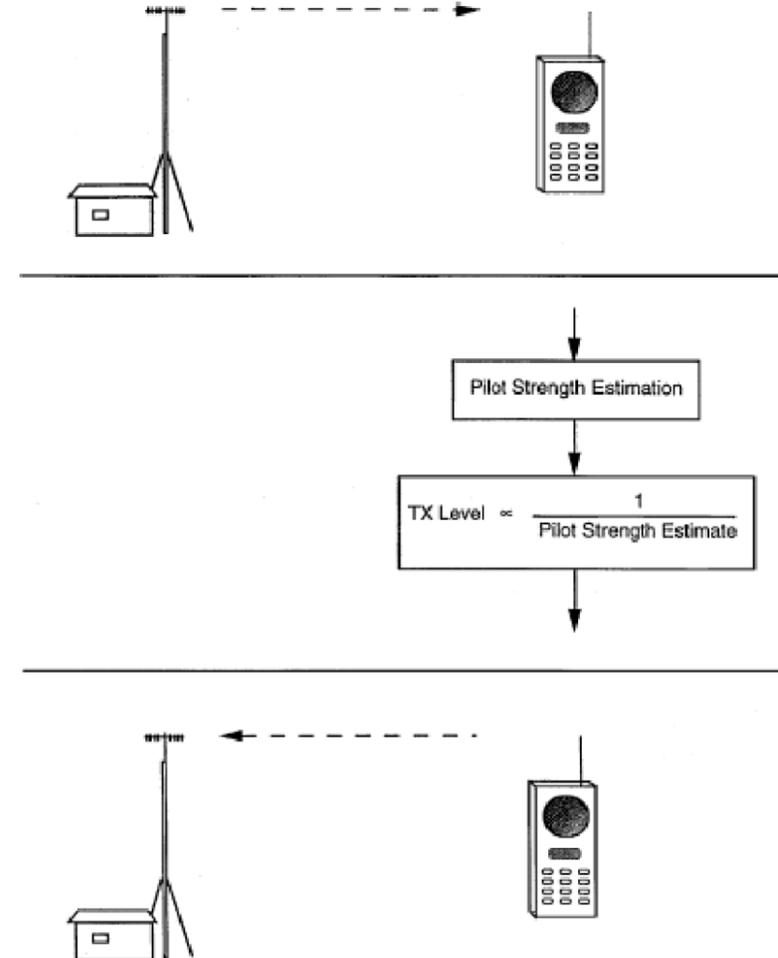
## □ Orthogonal Variable Spreading Factor

La longueur du code n'est pas fixe  
Elle dépend du SF et du débit



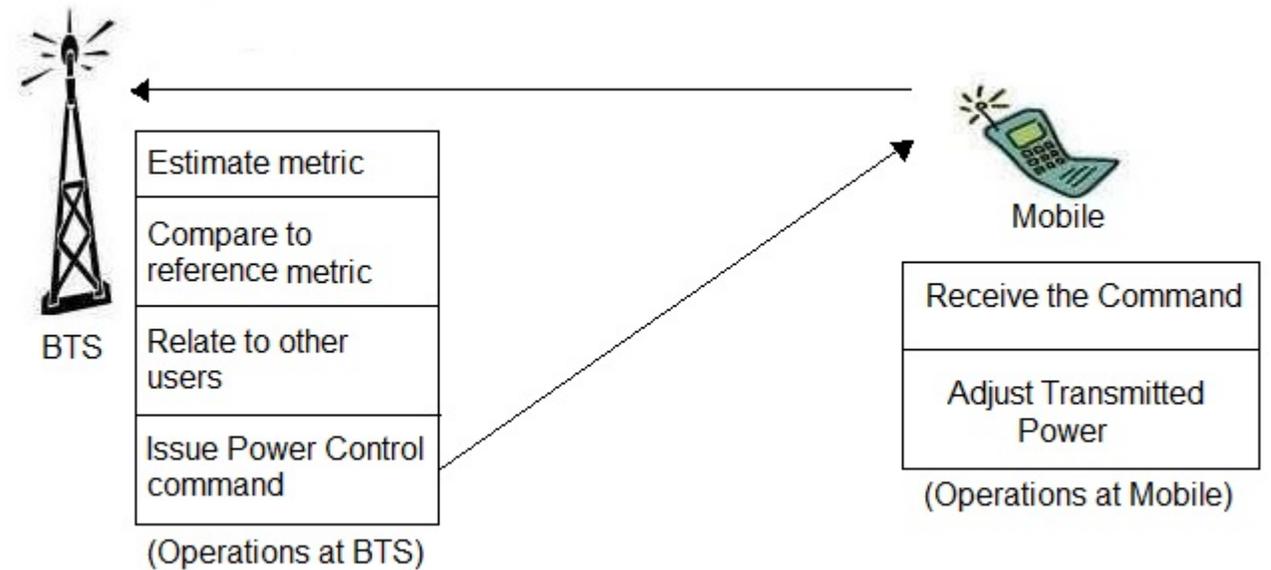
# Power control

- Open Loop
- $P_{rx-MS} = P_{tx-BS} / d^a$
- $P_{tx-MS} = 1 / P_{tx-MS}$
- $P_{tx-MS} = d^a / P_{tx-BS}$
- $P_{rx-BS} = P_{tx-MS} / d^a$
- $P_{rx-BS} = (d^a / P_{tx-BS}) / d^a$
- $P_{rx-BS} = 1 / P_{tx-BS}$
  
- Problème : Pas la même fréquence et donc une atténuation différente

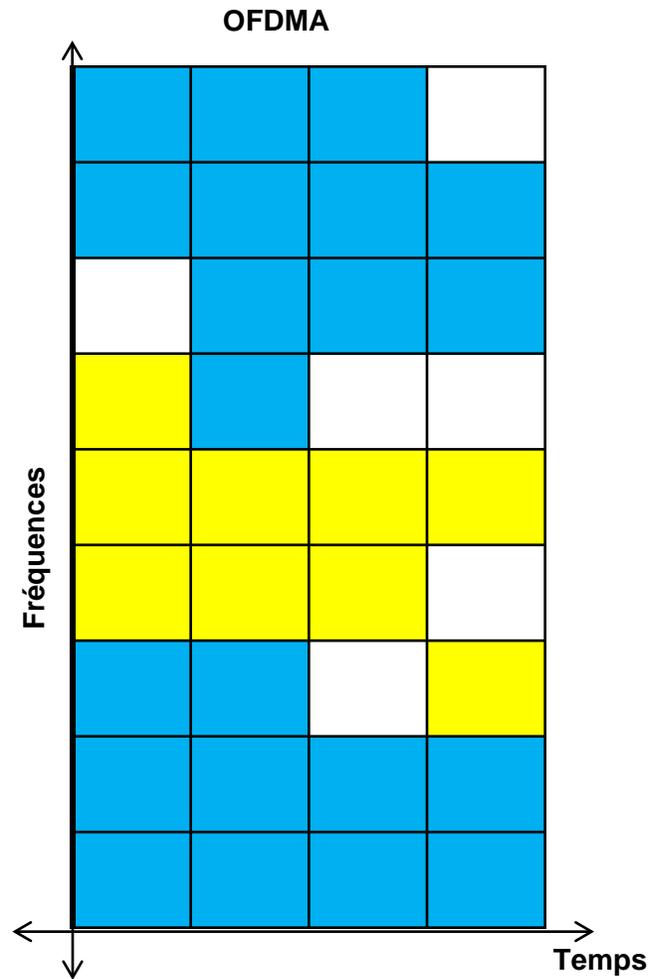


# Power control

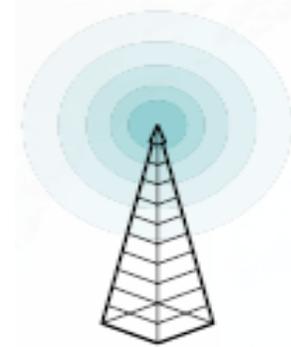
- Closed Loop
  - Une boucle
  - Contrôle logiciel
- Outer Loop
  - Pour définir le pas du closed loop
  - Système peu stable : faible pas
- Exemple en 3G
  - 1500 contrôle par seconde



# Accès OFDMA



Orthogonal Frequency-Division Multiplexing



VoIP



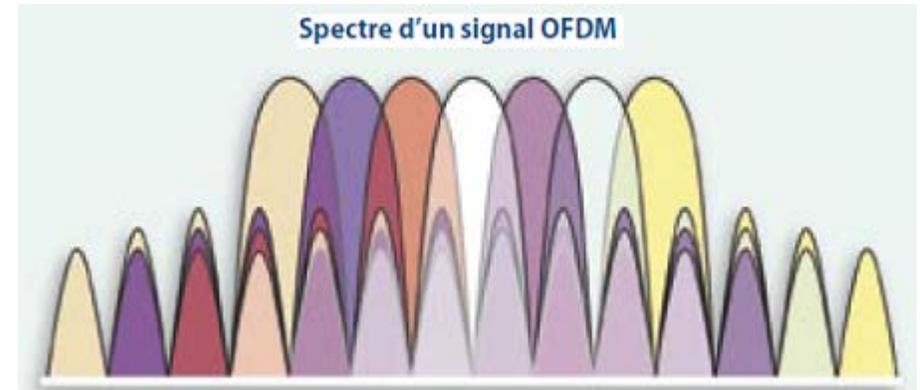
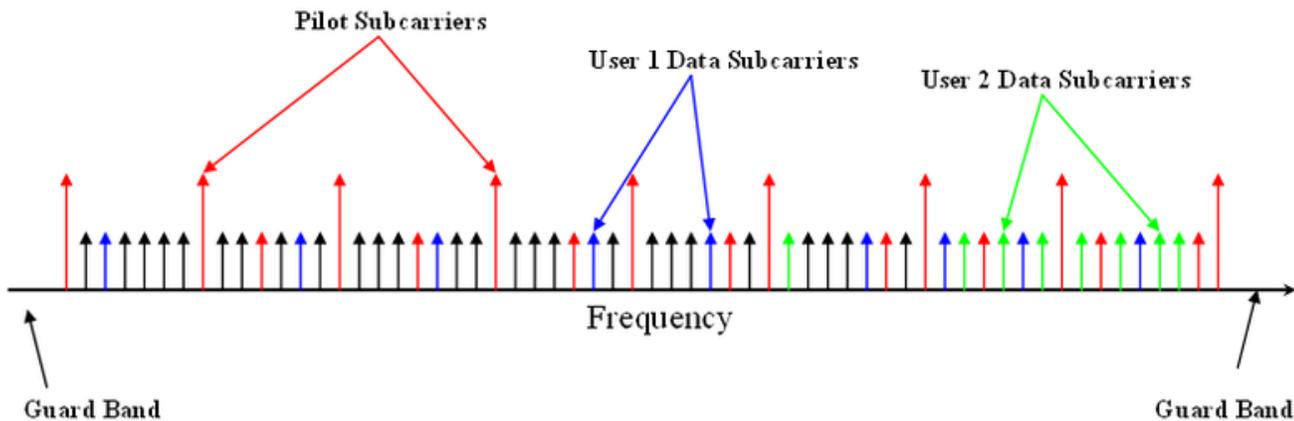
streaming



HTTP

# Transmission OFDMA

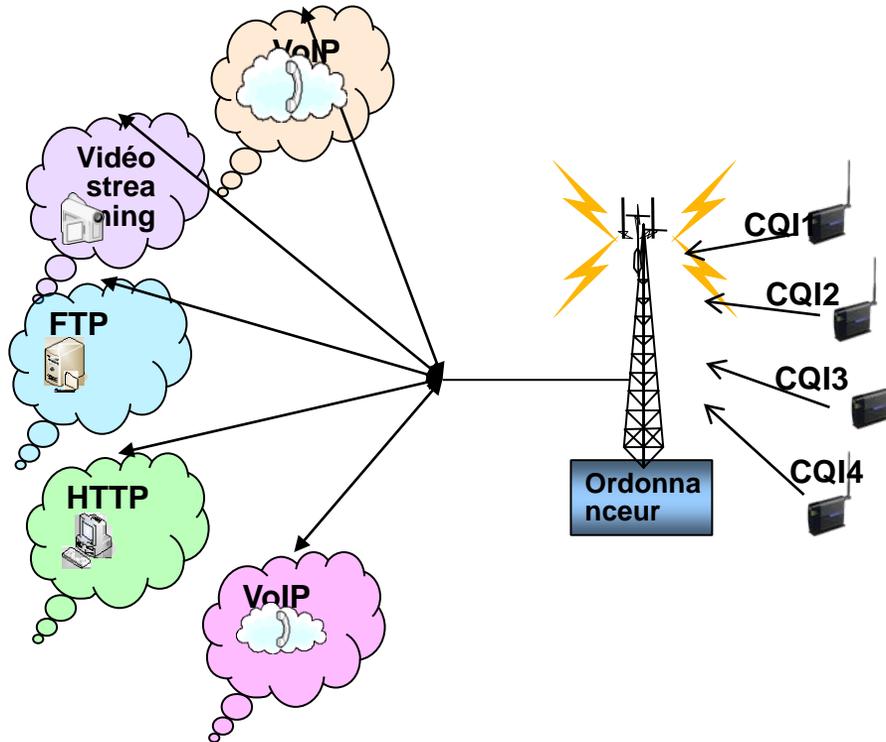
- Transmission de l'information sur N sous-canaux
  - Meilleure robustesse aux interférences
- Les canaux se chevauchent à condition qu'ils soient orthogonaux
  - Meilleure efficacité spectrale



# Ordonnancement de paquet

- Mécanisme de partage des ressources entre les usagers d'une même cellule pour satisfaire une fonction d'utilité
  1. Où est implémenté l'ordonnanceur?
  2. Qu'est-ce qu'une ressource ?
  3. Quels sont les paramètres d'entrée/sortie d'un ordonnanceur?
  4. Quels sont les algorithmes d'ordonnancement possibles?
- 1. Ordonnanceur implémenté dans la station de base (Antenne)
- 2. Une ressource est à la fois temporelle et fréquentielle
- 3. L'ordonnanceur récupère les feedbacks instantanés des usagers pour adapter le débit de transmission
  - CQI (Channel Quality Indicator) : différents modes de report de l'état du canal
  - Codage et modulation adaptatifs (AMC)
- 4. La fonction d'utilité (max débit, max équité, min délai, etc.)

# Ordonnancement de paquet



## Entrées

- état du canal de chaque usager
- contraintes QoS applications
- profil abonné (catégorie, itinérance)

## Sorties

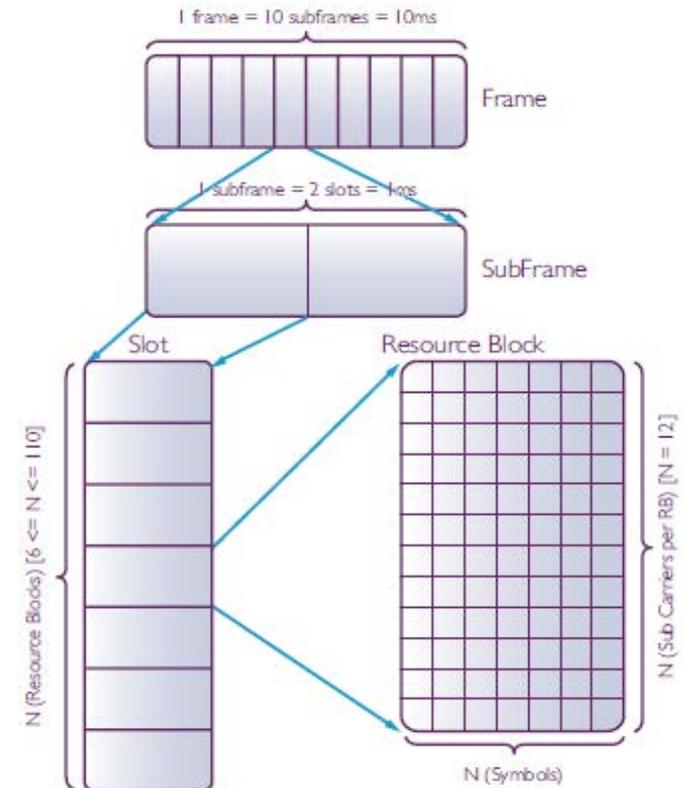
- Choix de paquets à servir en premier
- Choix de ressources à allouer
- Choix de la direction
- choix du schéma de modulation

## Objectifs de l'ordonnancement

- Optimiser la capacité, le débit, les performances au bord de la cellule, l'équité, les délais
- Minimiser la signalisation liée à l'ordonnancement (eg. feedbacks, acquittements)
- Minimiser la consommation de puissance

# Ressources OFDMA

- Le bloc de ressource est l'unité principale utilisée par l'ordonnanceur
- Un **bloc de ressource** est de longueur 0,5 ms et contient 12 sous-porteuses (15 Hz/porteuse)
- Le nombre de blocs de ressource dans un slot de 0.5 ms dépend de la largeur du canal



# Transmission LTE

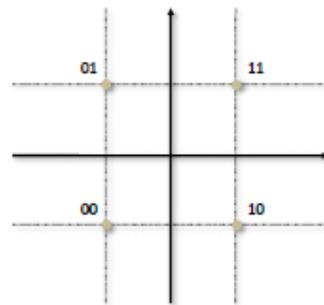
- Allocation de ressources pour la transmission et la réception d'un bloc de transport (TB : Transport Block)
  - Les TBs peuvent transporter des données usager ou de la signalisation
  - Avec MIMO, plusieurs TBs peuvent être alloués au mobile
- Pour l'ordonnancement UL, la station de base doit définir
  - Les mobiles qui veulent émettre et leurs données en attente
    - Scheduling Request (SR) pour informer le réseau que le terminal veut émettre
    - Buffer Status Report (BSR) pour remonter la quantité de données en attente
  - Les RB et le débit pour le UL
    - Signalisation dédiée pour l'indiquer explicitement au mobile
    - Débit incrémental avec l'usage de (N)ACKs jusqu'à atteindre un BLER cible

# Remontée de CQI dans OFDMA

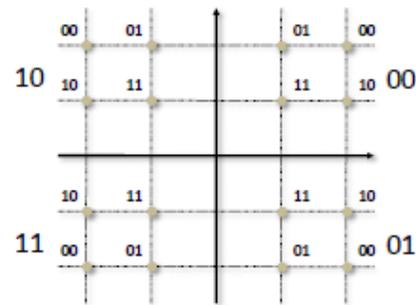
- Une connaissance précise du lien radio améliore les performances d'ordonnancement : 15 valeurs possibles de CQI
  - La qualité du lien augmente avec le CQI
- Fréquences des reports
  - Périodiques
    - "always on" signaling overhead
  - Apériodiques
    - Déclenchés à la demande de la station de base
- Granularité des reports
  - CQI moyen : moyenne calculée sur les porteuses reçues
    - Ne permet pas de profiter des variations des porteuses
  - CQIs individuels : remonter le CQI de chaque porteuse
    - Overhead important

# Mapping CQI – Schéma de modulation & codage

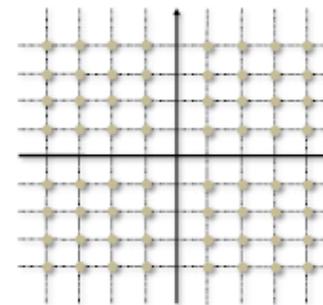
CQI index	modulation	code rate x 1024	efficiency
0	out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547



QPSK  
4 états – 2 bits



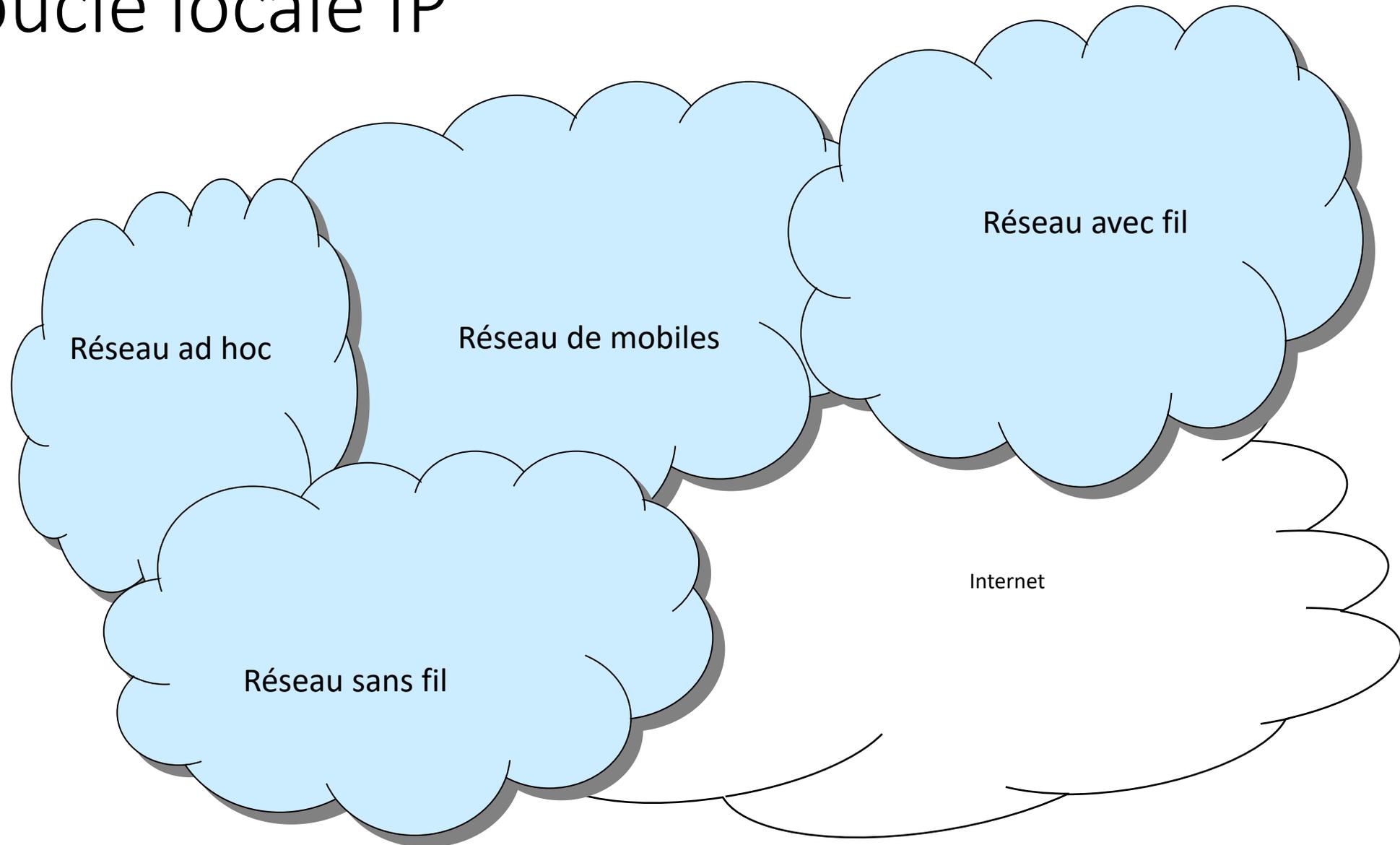
16 QAM  
16 états – 4 bits



64 QAM  
64 états – 6 bits

# Réseaux de mobiles

# Boucle locale IP



# Six générations



**1G**  
1981



**2G**  
1992



**3G**  
2001



**4G**  
2011



**5G**  
2020



**6G**  
2030

Une génération tous les 10 ans

# 7 générations de Wi-Fi



**1** **2** **3**  
1999 1999 2003



2006



2014

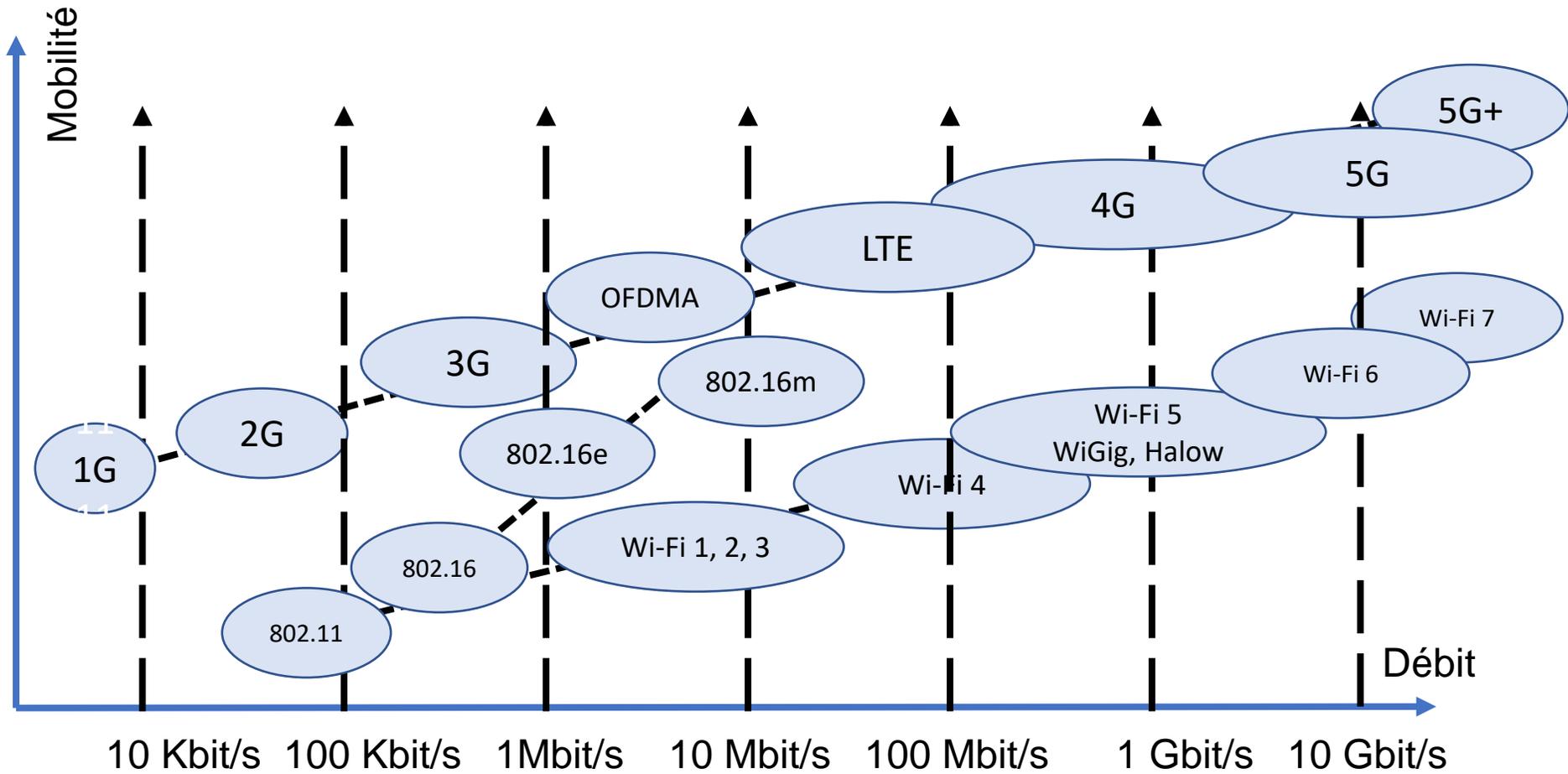


2019

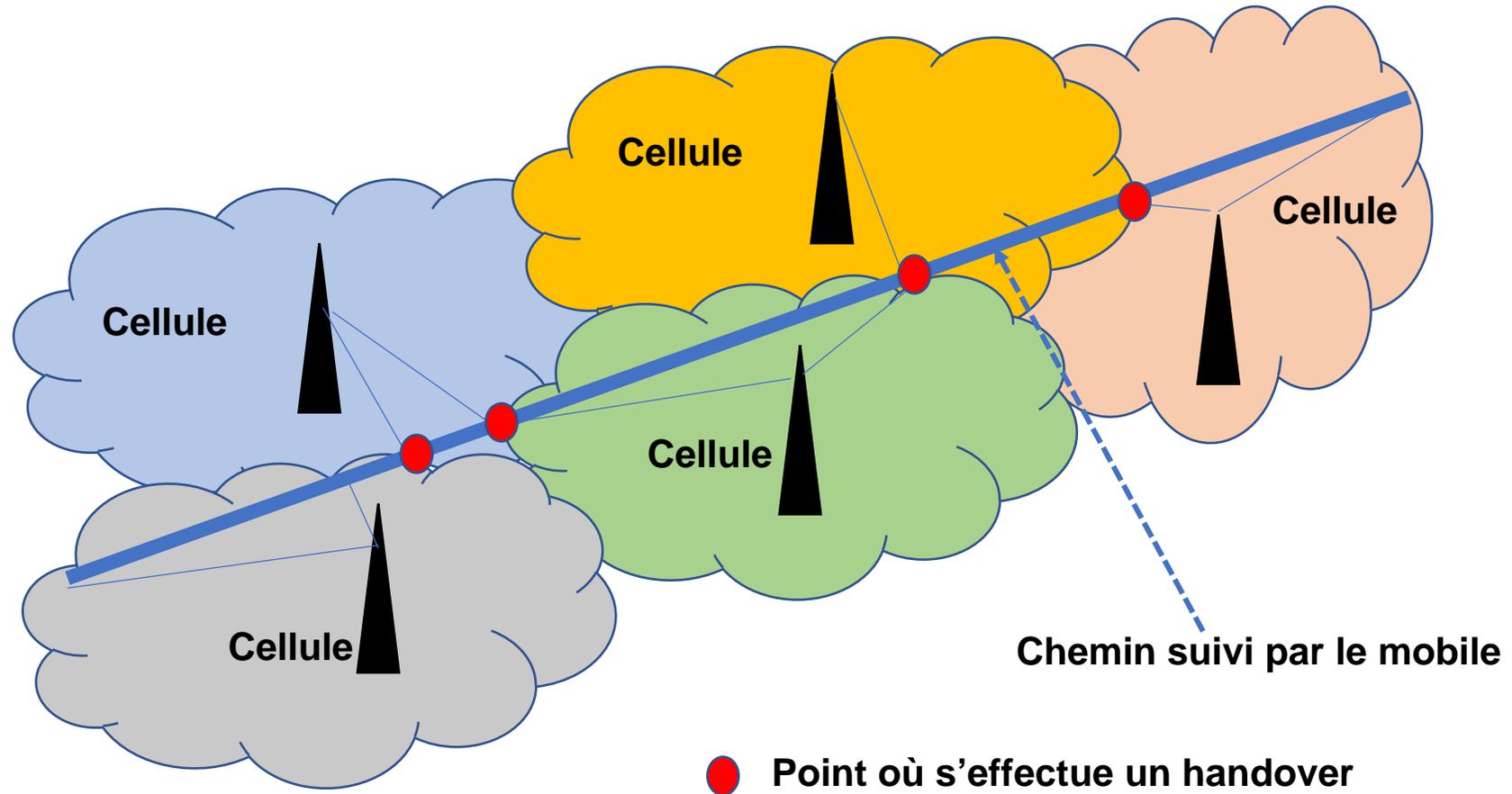


2023

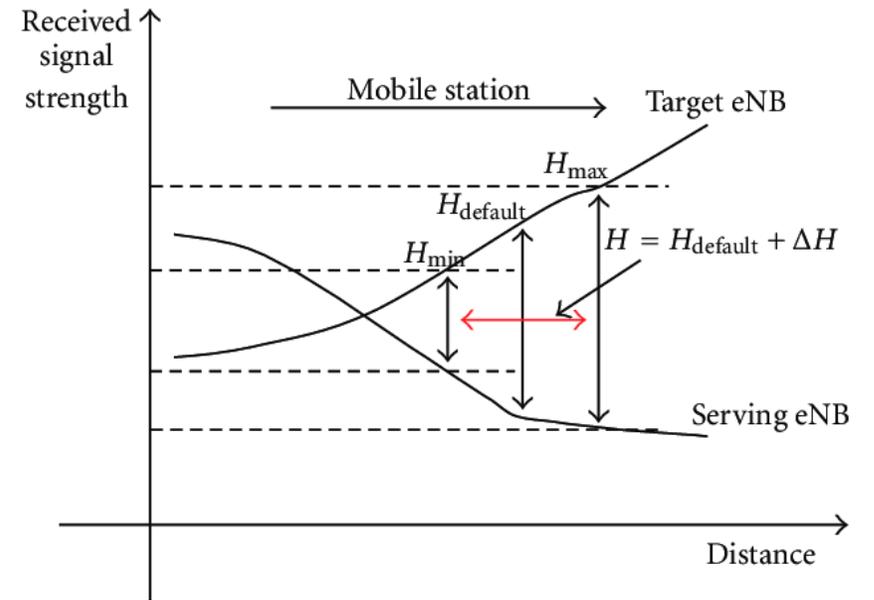
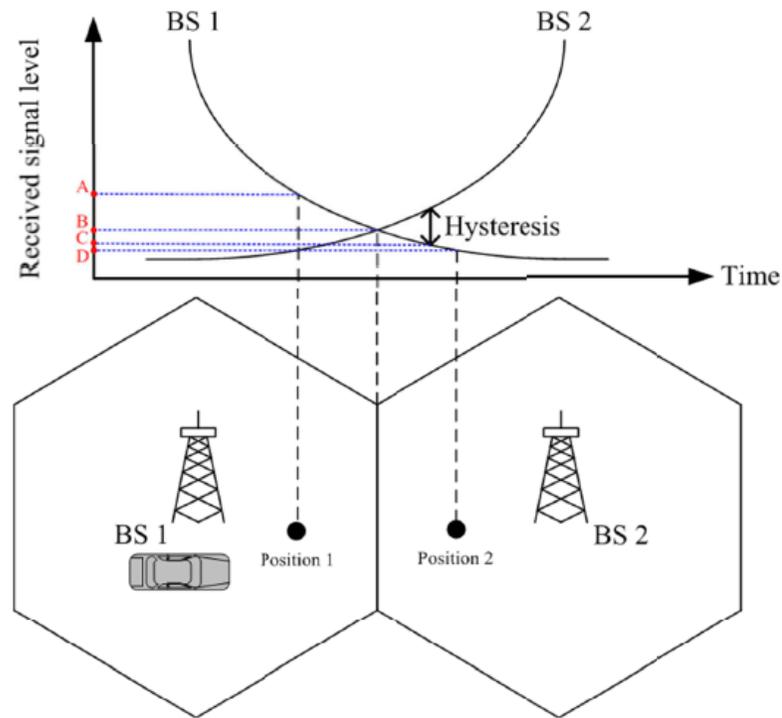
# Les réseaux sans fil et de mobiles



# Mobilité/nomadisme



# Algorithme Handover

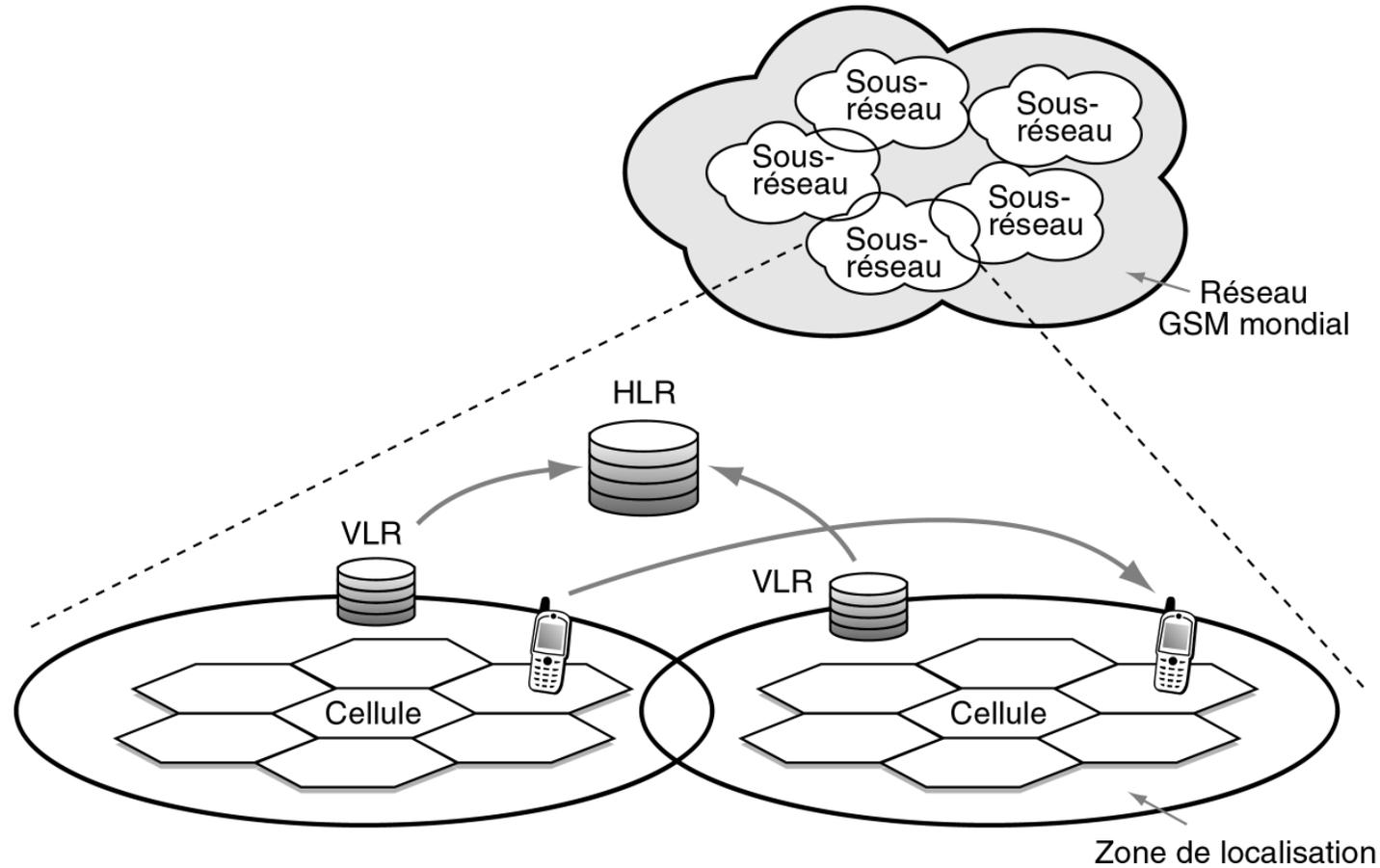


# Handover

- Hard Handover
  - Couper puis se connecter
- Seamless Handover
  - Se connecter puis couper
- Soft handover
  - Se connecter en permanence quand c'est possible
- Vertical handover
  - D'un système vers un autre



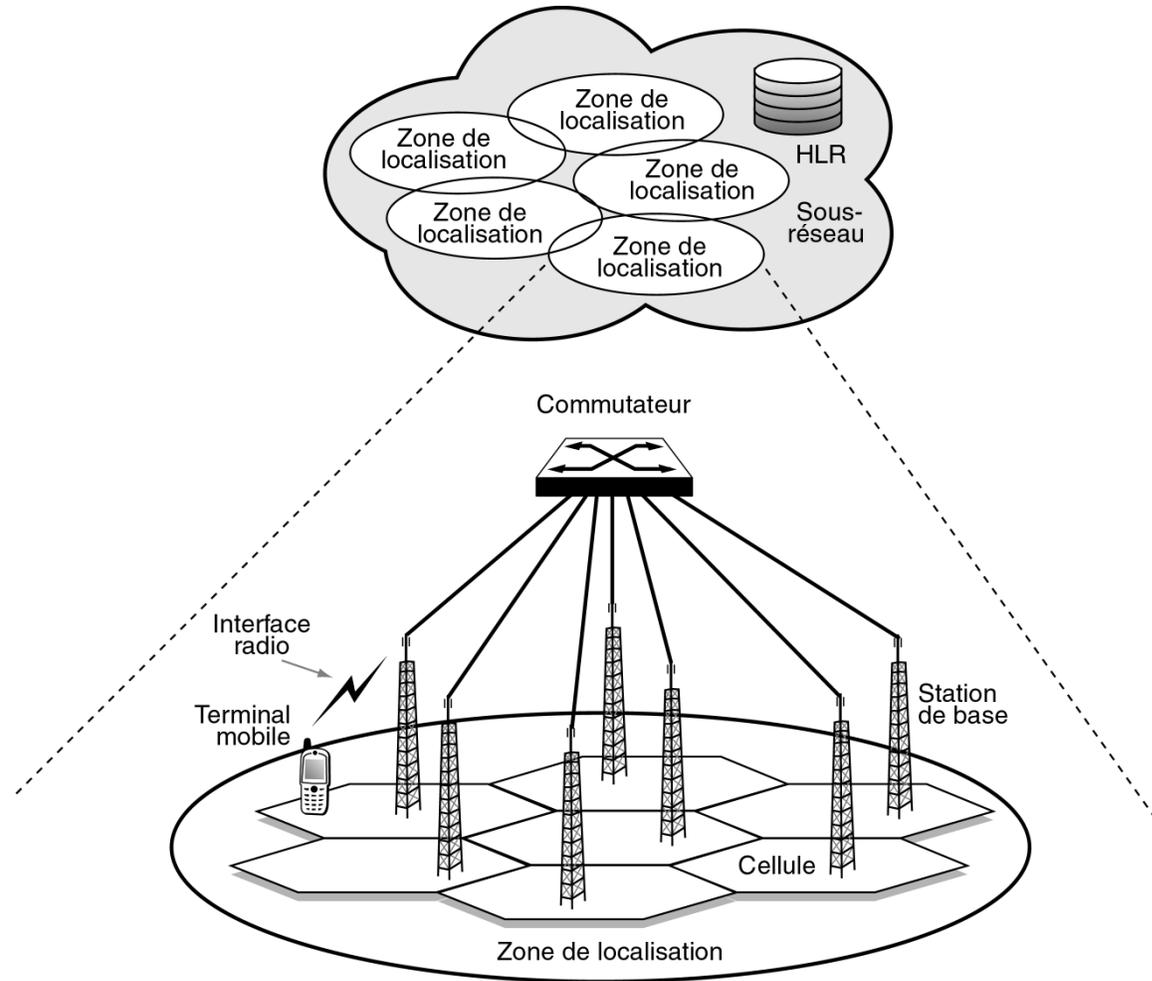
# Architecture cellulaire



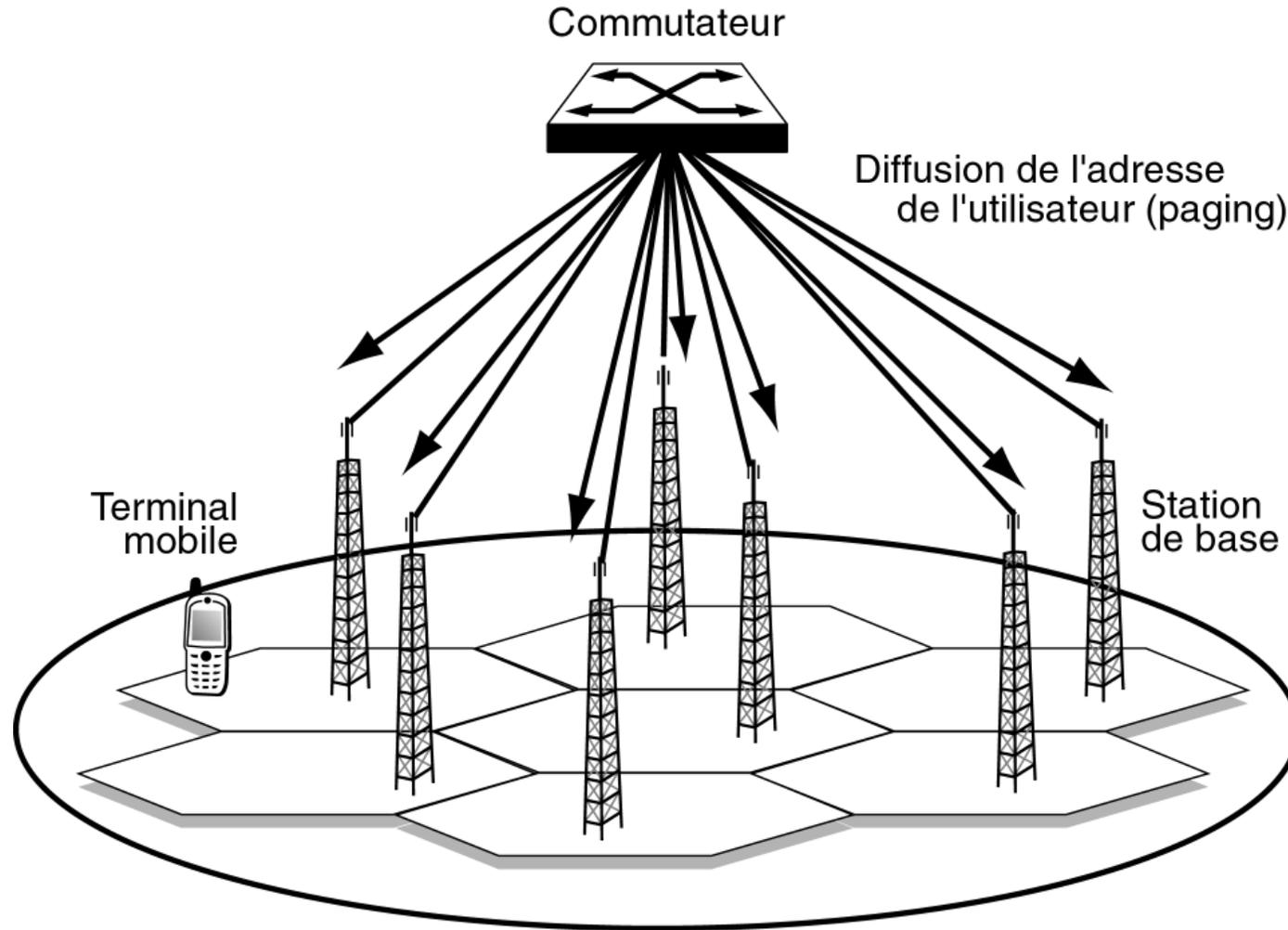
HLR (Home Location Register) : registre global

VLR (Visitor Location Register) : registre local

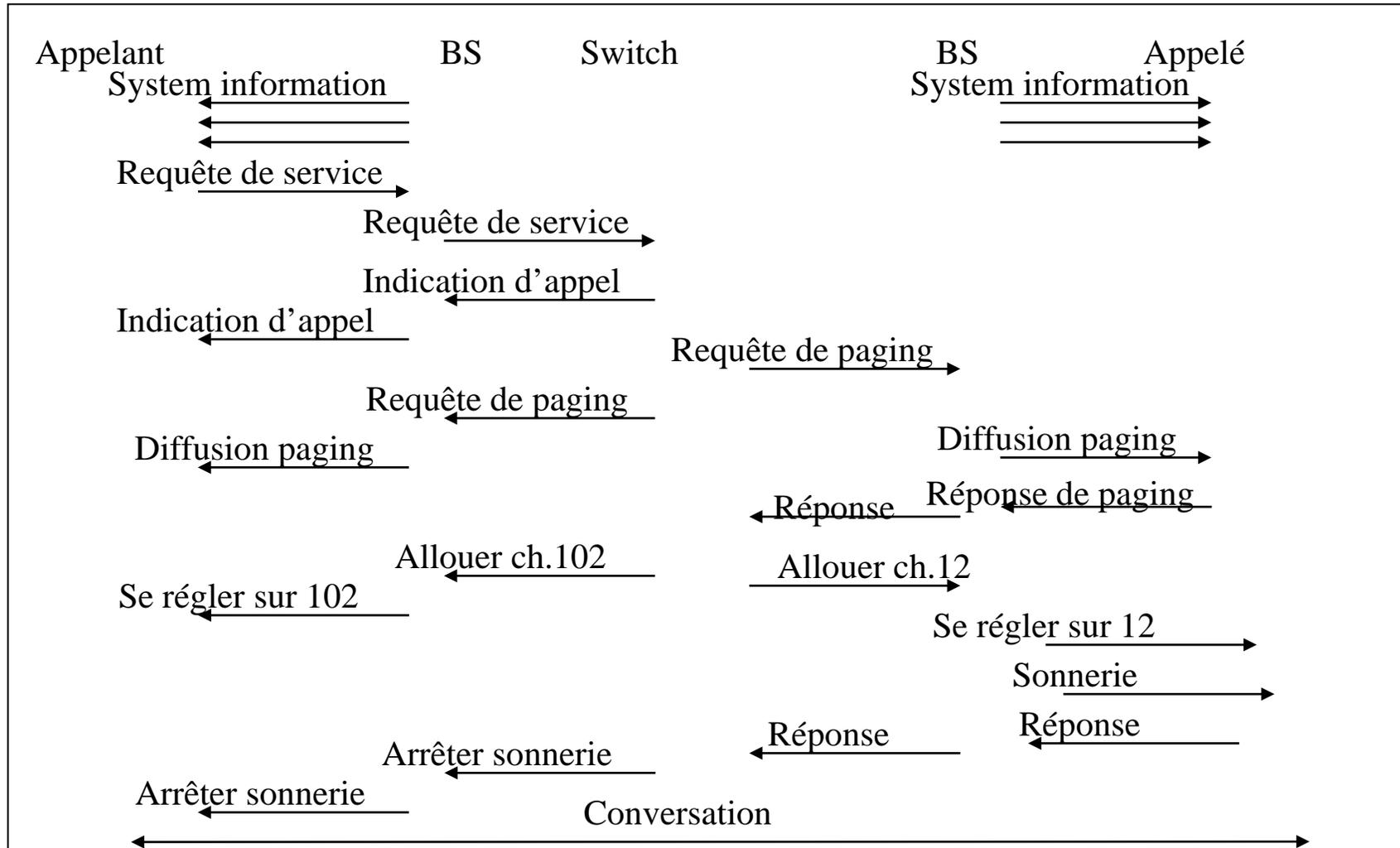
# Localisation



# Paging



# Appel sur mobile



# Les canaux physiques et logiques

- Un canal physique : une fréquence, un temps, une puissance ou une combinaison
- Un canal logique : un canal physique avec une fonction particulière
  - Accès aléatoire, diffusion de balise, synchronisation, trafic...
- Canal commun : destiné à un usage commun à tous les utilisateurs
- Canal dédié : destiné à un usage pour un seul utilisateur

# Les générations

- 1er génération : analogique
- 2è génération : numérique circuit
- 3è génération : numérique paquet
- 4è génération : multimédia
- 5è génération : connectivité massive

# Les systèmes

- 2<sup>e</sup> génération : GSM
- 2,5<sup>e</sup> génération : GPRS
- 2,9<sup>e</sup> génération : Edge
- 3<sup>e</sup> génération : UMTS – UMTS Release 5
- 3->4<sup>e</sup> génération : HSDPA (3G+) – UMTS Release 6
- 3->4<sup>e</sup> génération : HSDPA – UMTS Release 7
- 3->4<sup>e</sup> génération : HSUPA – UMTS Release 8
- 3->4<sup>e</sup> génération : HSOPA (super 3G) – UMTS Release 9
- 4<sup>e</sup> génération : LTE/LTE Advanced
- 5<sup>e</sup> génération: à partir de la release 15

# *GSM-GPRS-EDGE*

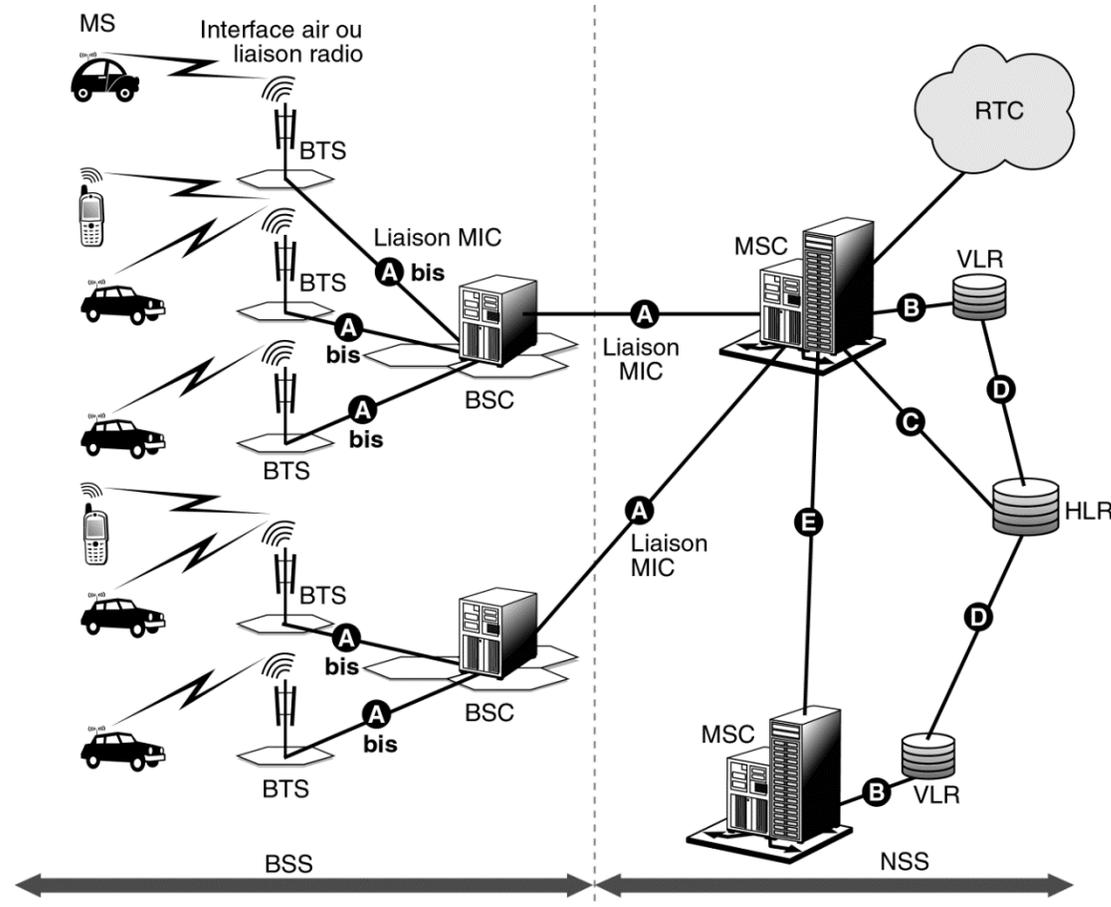
# GSM

- CEPT : création du standard GSM (Groupe Spécial Mobile puis Global System for Mobile communication)
- GSM : remplacer les 5 interfaces radios analogiques existants en Europe
- But : roaming international, services indépendants du réseau utilisé
  - un seul tél en Europe

# GSM

- 1987 :
  - une seule interface radio : Hybride Fréquence/Temps
  - infrastructure basée sur le SS7 (Signaling System Number 7)
- 1990 : ETSI => memorandum of understanding concernant les services commerciaux et les arrangements entre opérateurs

# GSM

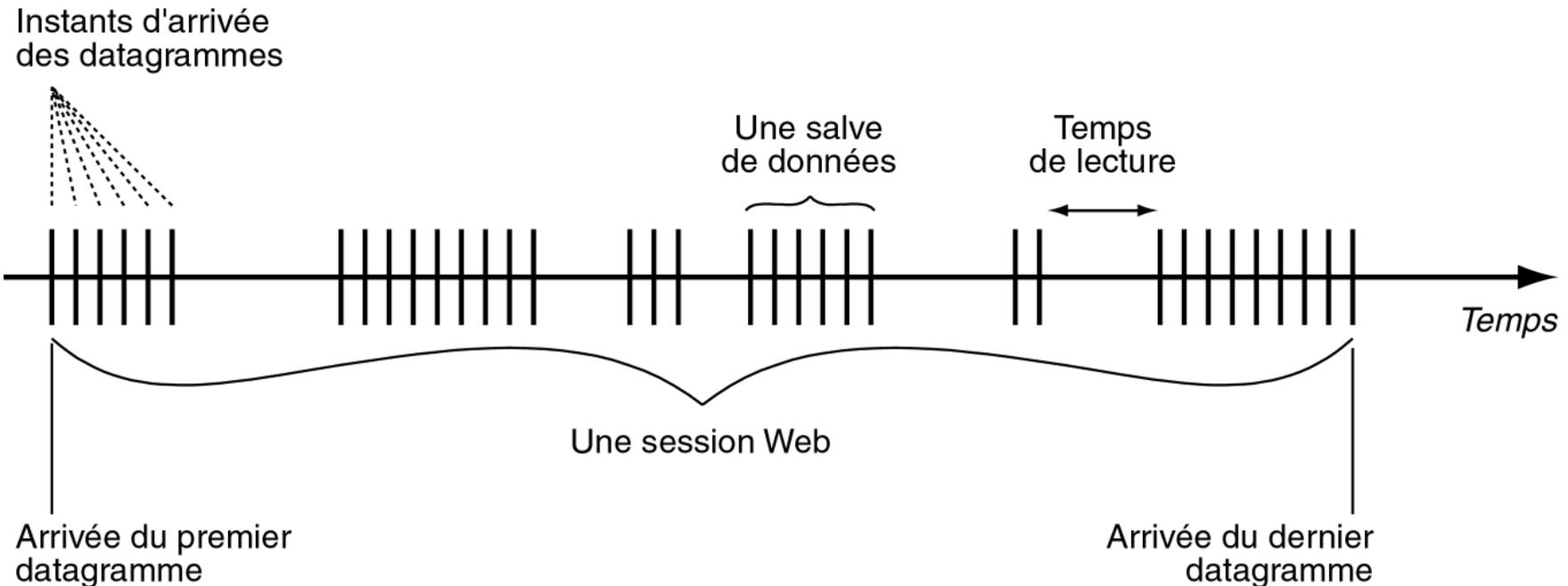


<b>X</b>	Interface X	MS	(Mobile Station)
	BSC	MSC	(Mobile-services Switching Center)
	BSS	NSS	(Network SubSystem)
	BTS	RTC	(réseau téléphonique commuté)
	HLR	VLR	(Visitor Location Register)
	MIC		(modulation par impulsion et codage)

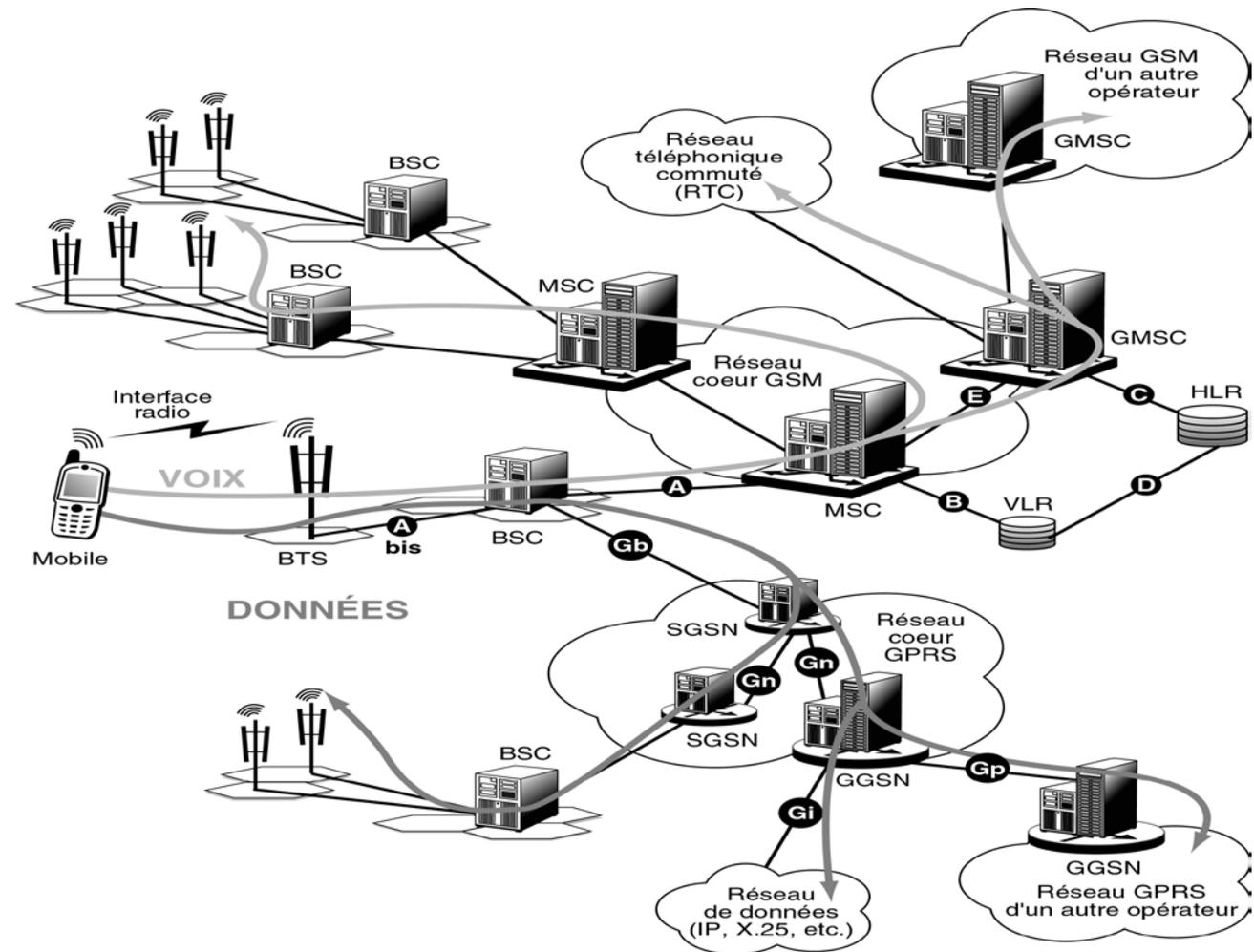
# GPRS

- General Packet Radio Service
  - mode paquet
- Objectifs
  - support pour un trafic en rafale
  - utilisation efficace des ressources radio
  - accès temps rapide (0.5 à 1 sec)
  - connectivité sur INTERNET
  - coexistence avec GSM (parole)

# Trafic WEB



# Architecture



- X** Interface X
- BSC (Base Station Controller)
- BTS (Base Transceiver Station)
- GGSN (Gateway GPRS Support Node)
- GMSC (Gateway Mobile-services Switching Center)

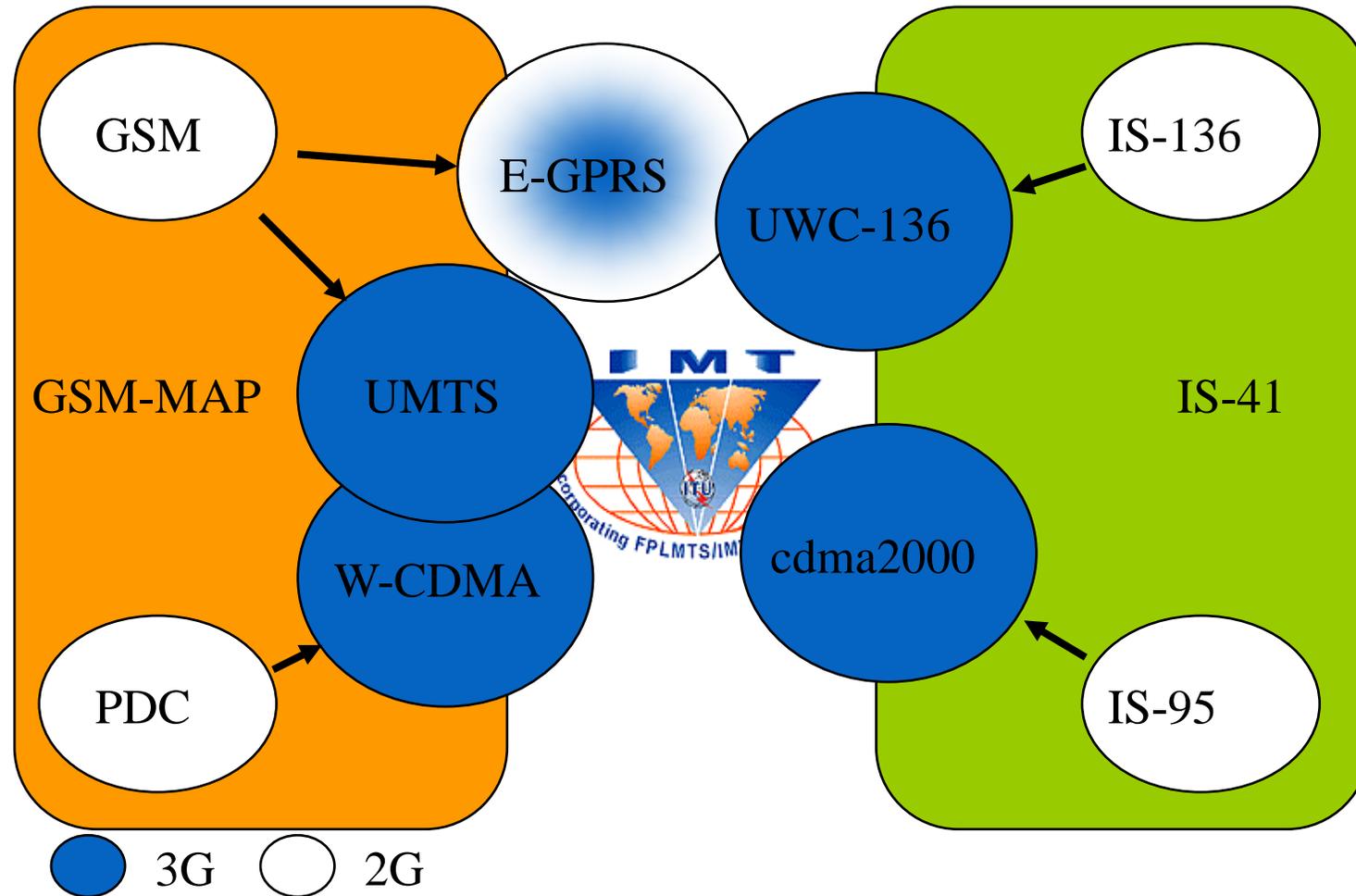
- GPRS (General Packet Radio Service)
- MSC (Mobile-services Switching Center)
- RTC (réseau téléphonique commuté)
- SGSN (Serving GPRS Support Node)

# Edge

- Enhanced Data rate for GSM Evolution
- État de la liaison
- Adaptation du lien
- Modulation 8-PSK (3 fois plus que GSM)

3G/UMTS

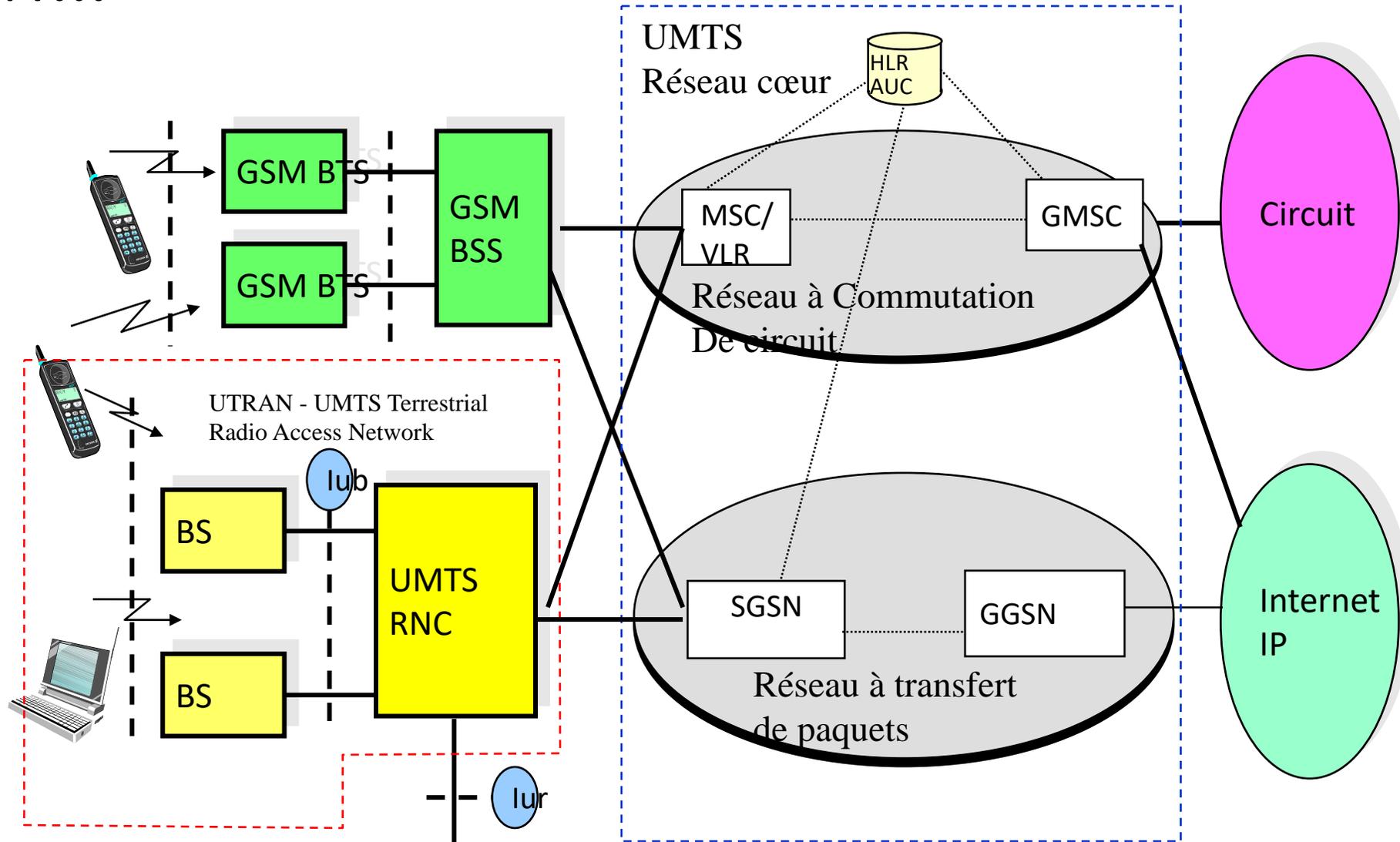
# Evolution des technologies



# Architecture



# GSM...



# HSPA et HSPA+

- **HSPA** = HSDPA + HSUPA
- High Speed **Downlink** Packet Access (3GPP Release 5)
  - Extension de l'UMTS (3GPP Release 99) par une voie descendante à haut débit
    - DL: jusqu'à 14 Mbps
    - UL : 384 Kbits/s
  - NodeB: ordonnancement et choix de modulation (QPSK ou 16QAM) et de codage
- High Speed **Uplink** Packet Access (3GPP Release 6)
  - Mécanismes d'ordonnancement, de sélection de format de transport, et HARQ améliorées
- **HSPA+** = evolved HSPA (3GPP Release 7)
  - L'ajout de la modulation 64QAM (DL) et 16QAM (UL)
  - MIMO seulement pour DL
  - → 21 Mbps en DL et 11 Mbps en UL

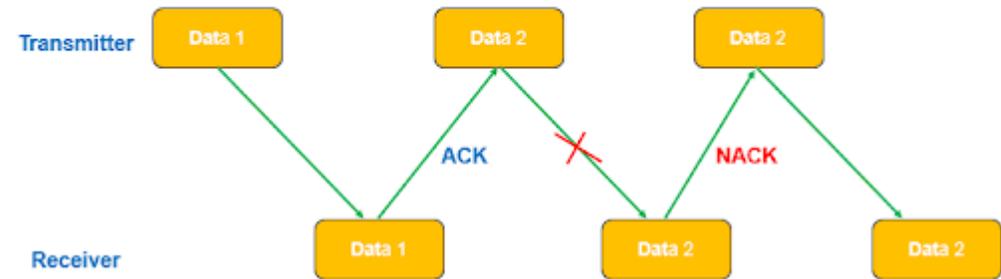
# HSPA

- High-Speed Downlink Packet Access
  - Vitesse d'accès sur le lien descendant :
    - 1.8 Mbit/s
    - 3.6 Mbit/s
    - 7.2 Mbit/s
    - 14.4 Mbit/s
    - 42 Mbit/s
- High-Speed Uplink Packet Access
  - Vitesse d'accès sur le lien montant : 5,76 Mbit/s

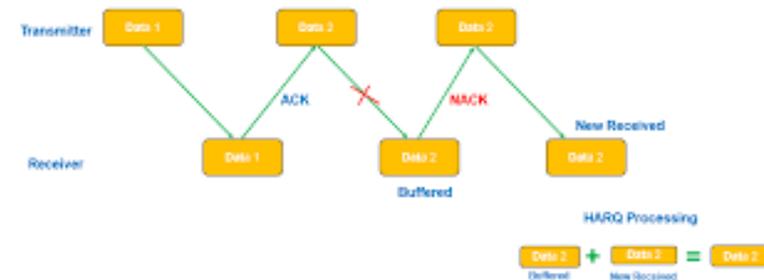
# ARQ (Automatic Repeat reQuest) et HARQ (Hybrid ARQ)

- ARQ: paquet par paquet
- HARQ : les paquets sont liés
- FEC : Forward Error Correction

## Automatic Repeat Request (ARQ)



## Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)



# Motivations et Objectifs du LTE (1/2)

## ❑ La 3G/3G+ arrive à saturation

- Tsunami vidéo (Youtube)
  - 1 heure de vidéo uploadée par seconde
  - Plus de 4 milliards vues de vidéo par jour
- LTE augmente le débit et la capacité pour les services IP
- Nouveau spectre

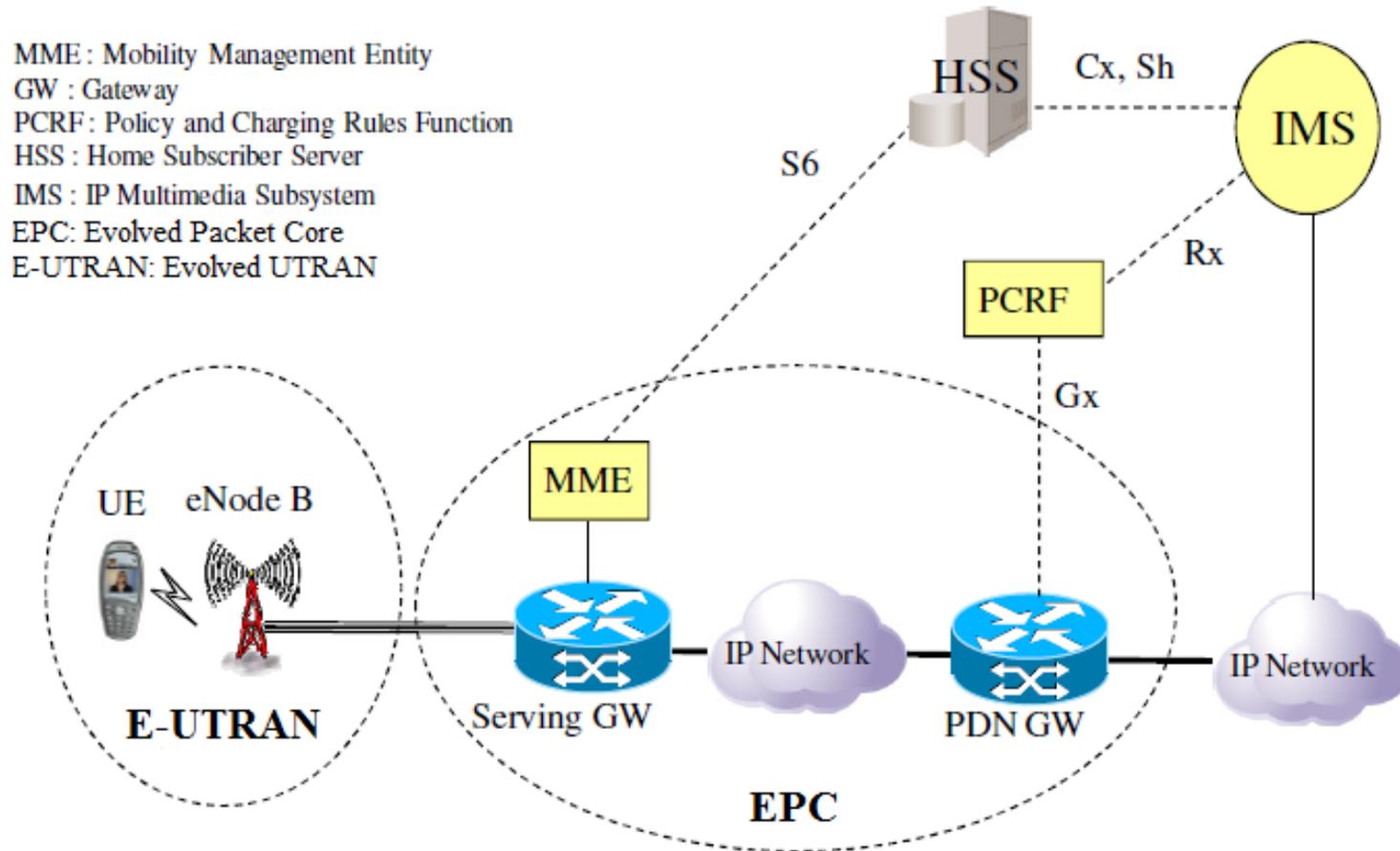
## ❑ Pas de “killer application” pour l’adoption du LTE

- Internet/ FTP
- Vidéo/audio streaming, TV
- Services temps réels : jeux en ligne, VoIP
- Complément des solutions de cloud computing
- Alléger les services de retransmission vidéo (de caméras de surveillance)

# Motivations et Objectifs du LTE (2/2)

- ❑ Optimisé pour les faibles vitesses mobiles (<15 km/h) mais supportant des vitesses mobiles importantes (jusqu'à 300 km/h puis 500 km/h)
- ❑ Coûts d'OPEX réduits
- ❑ Des terminaux moins complexes avec une meilleure autonomie
- ❑ Compatibilité avec les versions antérieures et d'autres systèmes

# Architecture



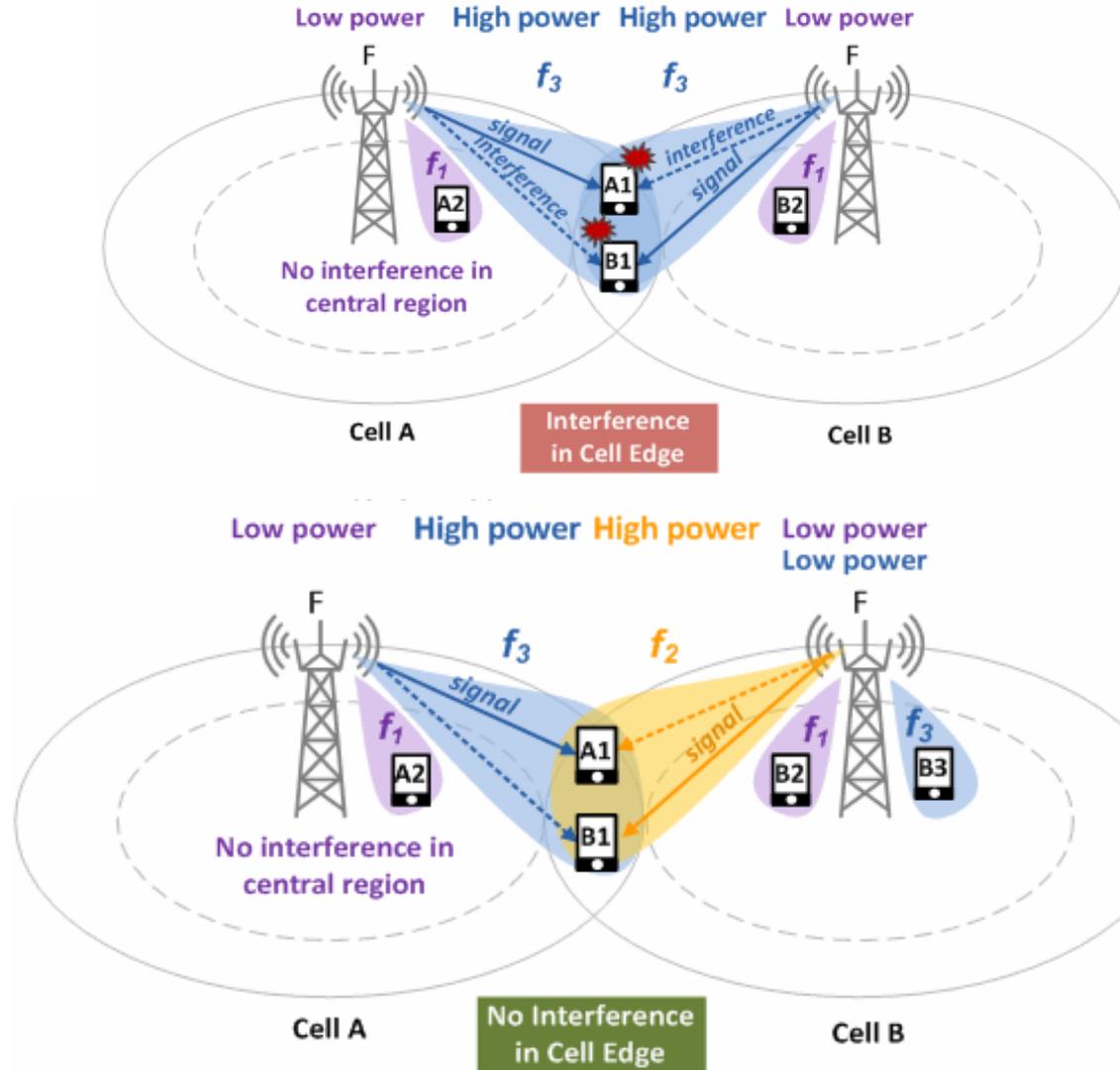
# Spécifications techniques du LTE 4G

- ❑ Débit max descendant
  - 300 Mbps
- ❑ Débit max ascendant
  - 75 Mbps
- ❑ Antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output)
- ❑ Large gamme de fréquences définie par ITU-R (International Telecommunication Union-Radio)
- ❑ Bande passante variable
  - 1,4 MHz à 20 MHz
- ❑ Tailles de cellules jusqu'à 100 km
- ❑ Latence faible de 20 ms vs 50-60ms pour HSPA+
- ❑ Uniquement le mode unicast dans la Rel 8, le broadcast est introduit dans la Rel 9
- ❑ Support des duplexages FDD et TDD

# LTE - 3G+ (3GPP release 8) - 2008

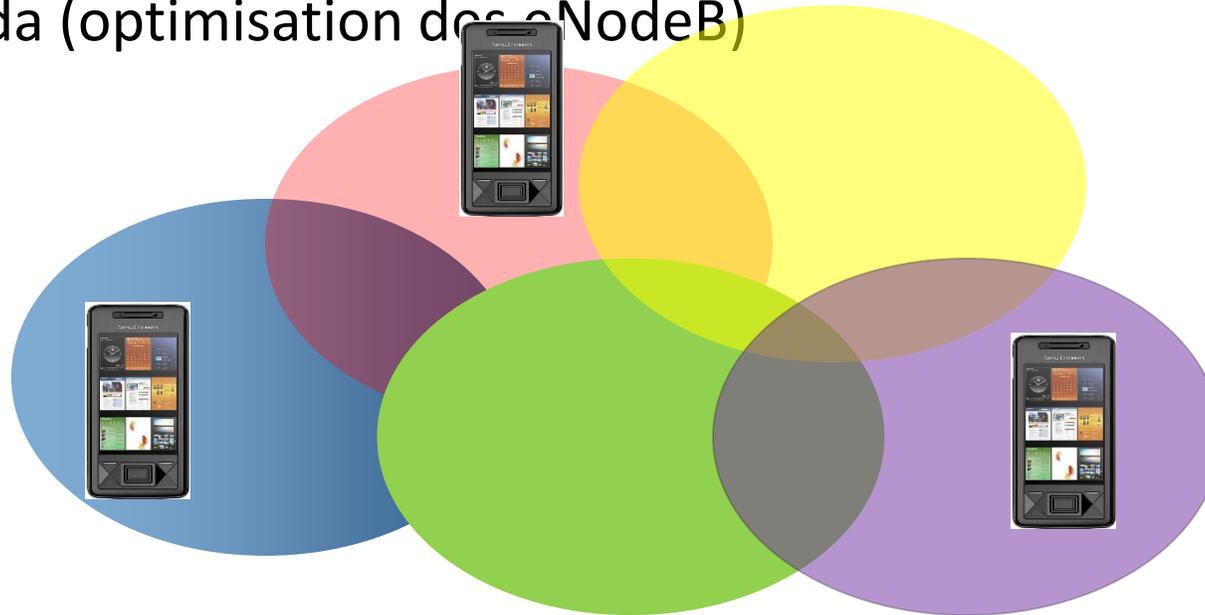
- Long Term Evolution 3G+
  - OFDMA à la place du CDMA
  - Tout IP sauf la téléphonie
  - Commercialisé depuis 2009/2010
    - Presque partout dans le monde
  - Débit crête:
    - 50 Mbit/s montant (avec 20 MHz)
    - 100 Mbit/s descendant (avec 20 MHz)

# ICIC (Inter-Cell Interference Coordination)



# LTE-3G super+ (3GPP release 9) - 2009

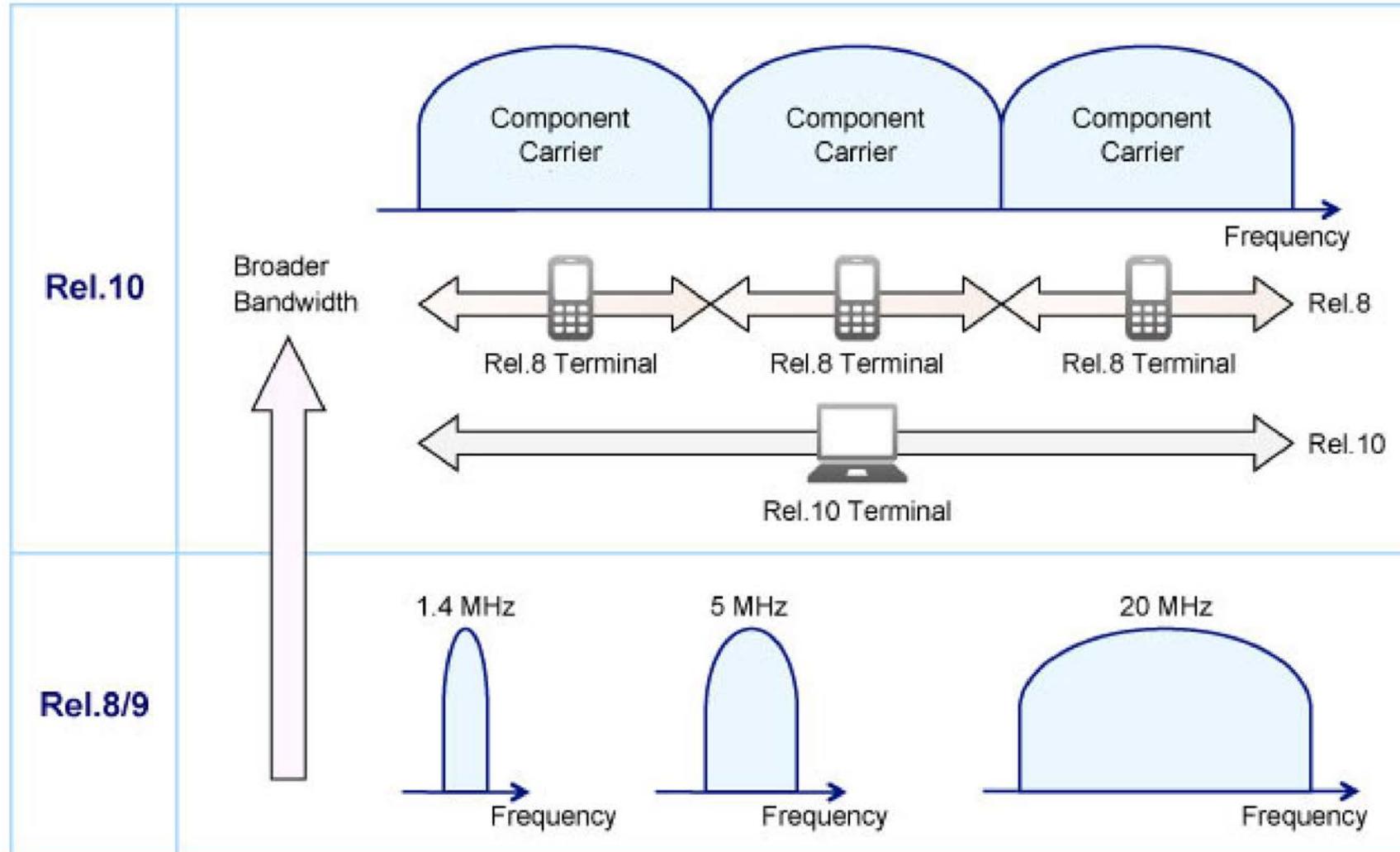
- eMBMS (evolved multimedia broadcast and multicast service)
- LCS (Location service)
- machine to machine (M2M)
- Public safety warning (Tsunami, etc.)
- Green agenda (optimisation des eNodeB)



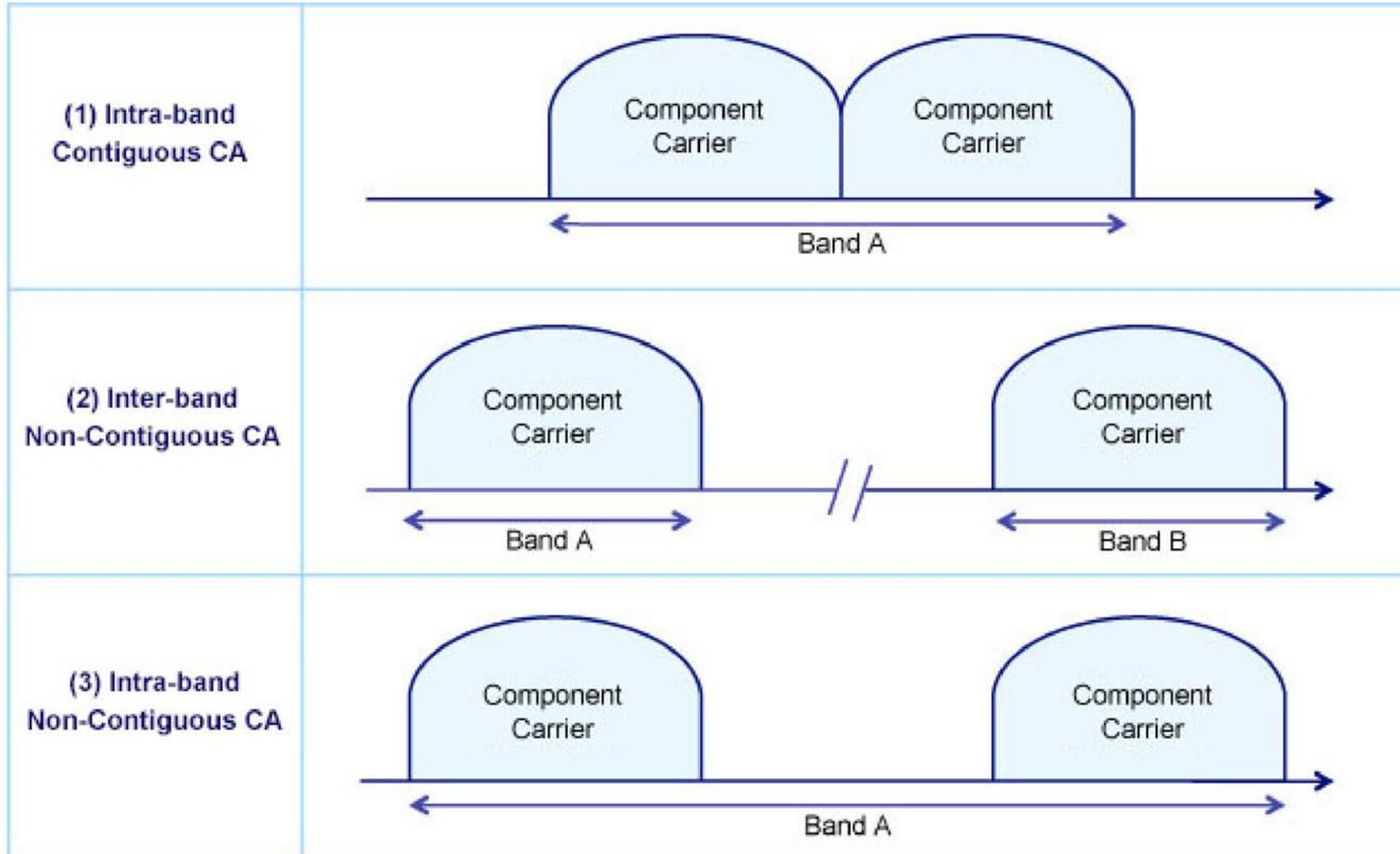
# LTE-A (3GPP release 10) – 2012

- LTE-Advanced = 4G
- IP natif
  - ToIP/VoIP
- MIMO (jusqu'à 8x8 descendant et 4x4 montant)
- Antenne intelligente (software radio)
- Antenne directive (beamforming)
- Radio cognitive
- Relais et réseau mesh
- Propriétés "Green"
- Femtocell

# Release 10 : Agrégation de porteuses

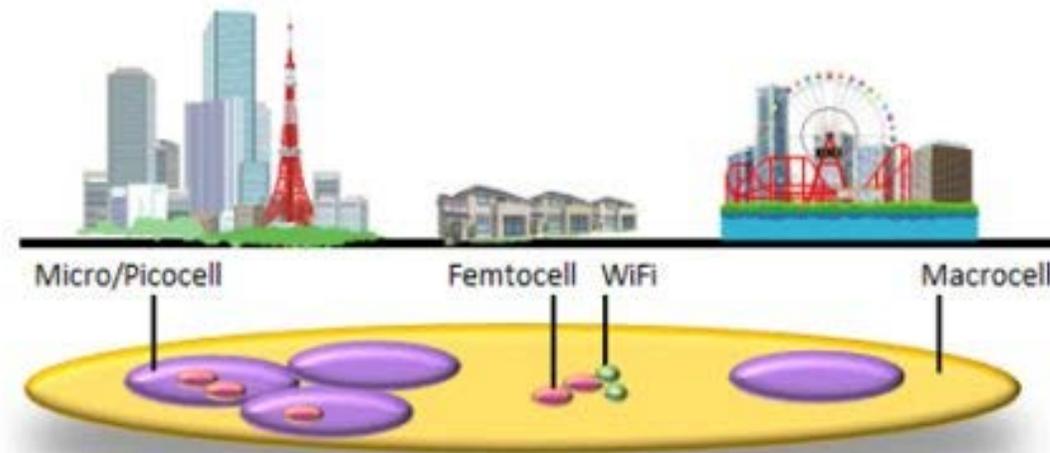


# Agrégation de porteuses



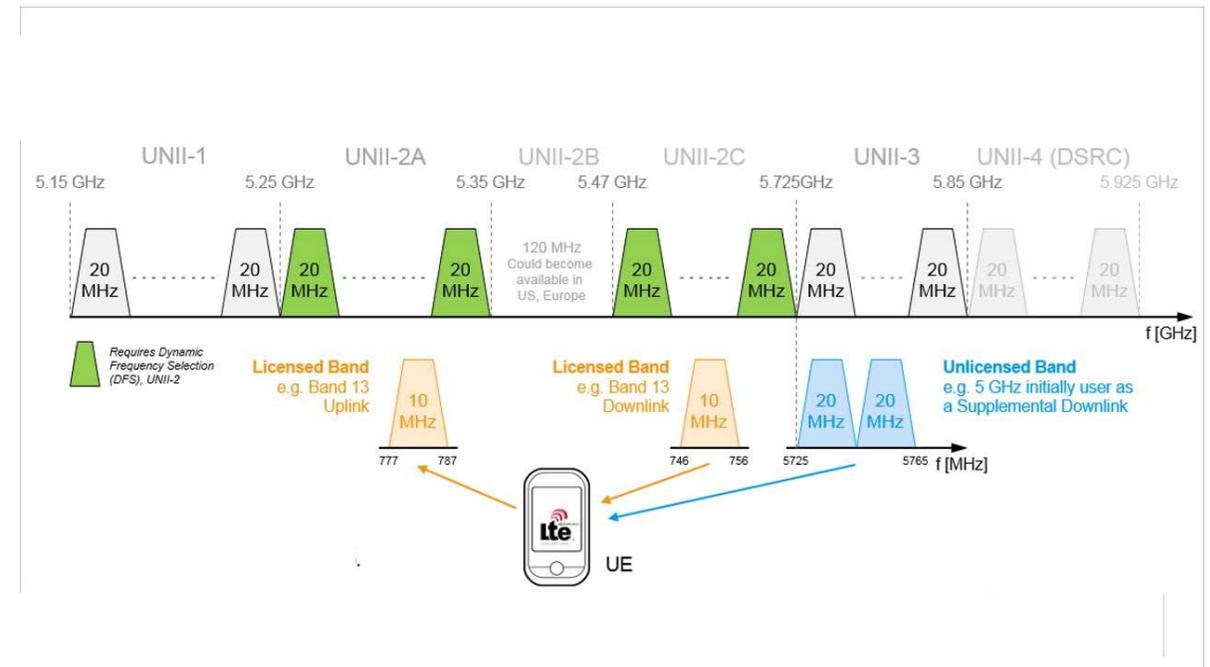
# 4G+ Release 11 - 2013

- LTE- Advanced+
- Heterogeneous Networks (HetNet)



# 4G++ Release 12 – 2015

- Amélioration de l'efficacité spectrale
- LTE avec agrégation de porteuse
- LTE-B (Broadcast)
- LTE-M (MTC - Machine -Type Communications),
  - Internet des objets
- LTE- U (Unlicensed spectrum)
  - Utilisation du LTE dans le spectre sans licence



# 4G++ Release 12 – 2015

- LWA ou LWIP (LTE / WLAN Aggregation ou LTE / WLAN radio level integration with IPsec tunnel
  - Double connexions qui se rejoignent à l'eNodeB ou à la SGW.
- Interfonctionnement entre opérateurs mobiles
- Continuité des sessions de données entre réseaux de mobiles et réseaux fixes
- Téléprésence : présence de haute qualité à distance

# 4G Pro Release 13 - 2017

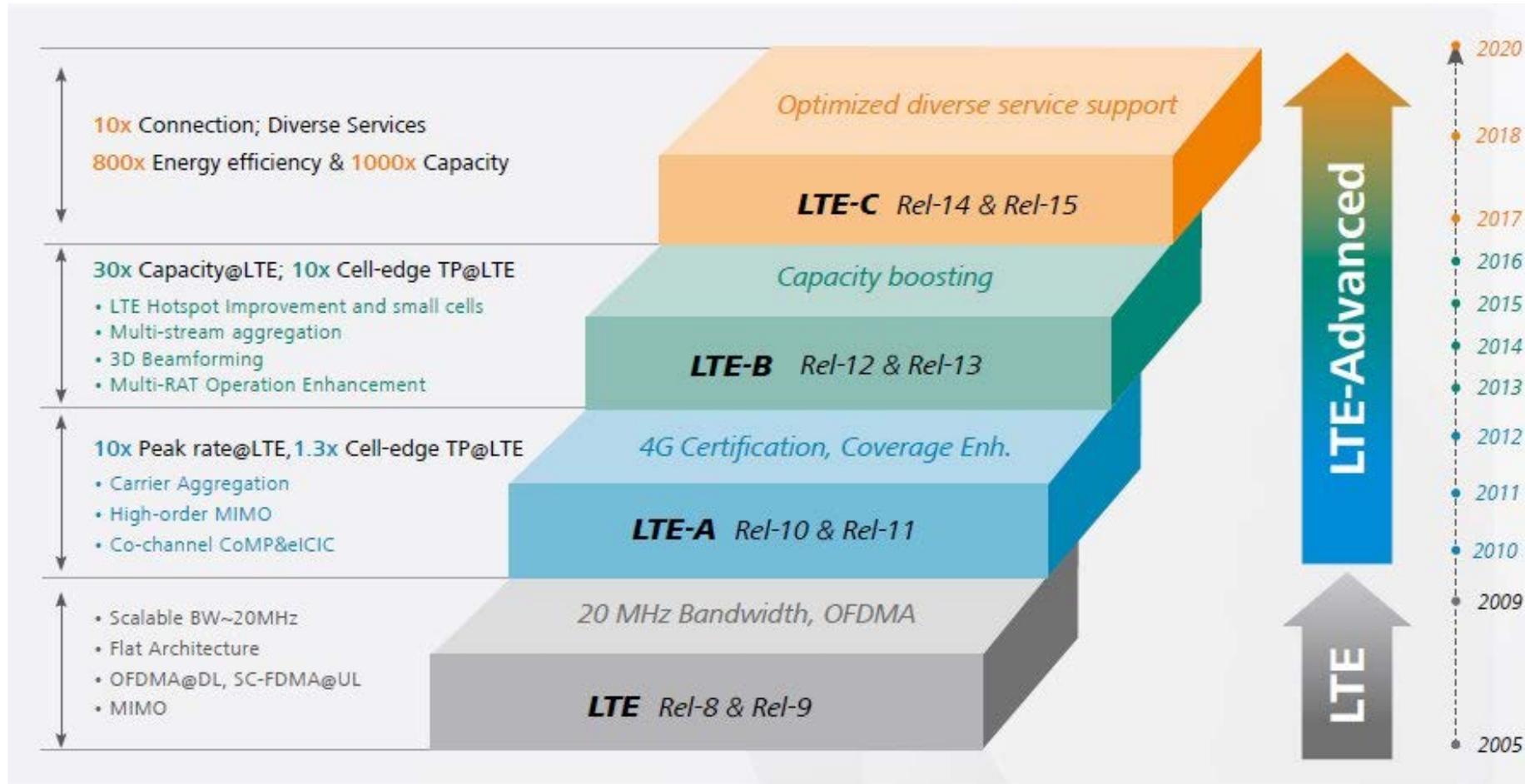
- Extension de la 4G
- Virtualisation
  - Réflexion sur la virtualisation du cœur de réseau avec l'architecture OPNFV
  - Réflexion sur la virtualisation du RAN
- ❑ Mission-critical Push-To-Talk, fonctionnalité essentielle pour la PMR (private mobile radio).
- ❑ MU-MIMO

# 4G Pro Release 13 – 2017 IoT

- LTE-M, NB-IoT et EC-GSM-IoT

	 sigfox	 LoRa™	eMTC Rel. 13	NB-IoT Rel. 13	EC-GSM-IoT Rel. 13
Carrier Frequency	Unlicensed ISM: < 1GHz	Unlicensed ISM: < 1GHz	Licensed LTE bands	Licensed LTE/GSM bands	Licensed GSM bands
Node/Device Bandwidth	100/600 Hz	125/250/500 kHz	1.08 MHz	180 kHz	200 kHz
Max. Data Rate	600 bps	50 kbps	1 Mbps	250 kbps	240 kbps
Range	Many Km	Several Km	Several Km	Several+ Km	Several+ Km
Standardization/Driver	Proprietary / Sigfox	Proprietary / Semtech	3GPP Huawei, Ericsson, ... Qualcomm, Mediatek, ... u-Blox, Quectel, ...	3GPP Huawei, Ericsson, ... Qualcomm, Mediatek, ... U-blox, Quectel, ...	3GPP Huawei, Ericsson, ... GCT, Qualcomm, ... Quectel, ...
Use Cases	Massive devices, <u>small</u> & <u>infrequent</u> data	Massive devices, <u>moderate</u> data rates	<u>Critical</u> (e.g., surveillance Cameras for public safety)	Massive devices, <u>secure LTE</u> commun.	Massive devices, <u>secure GSM</u> commun.

# 4G Pro Release 13 – 2017 LTE-B (Broadcast)

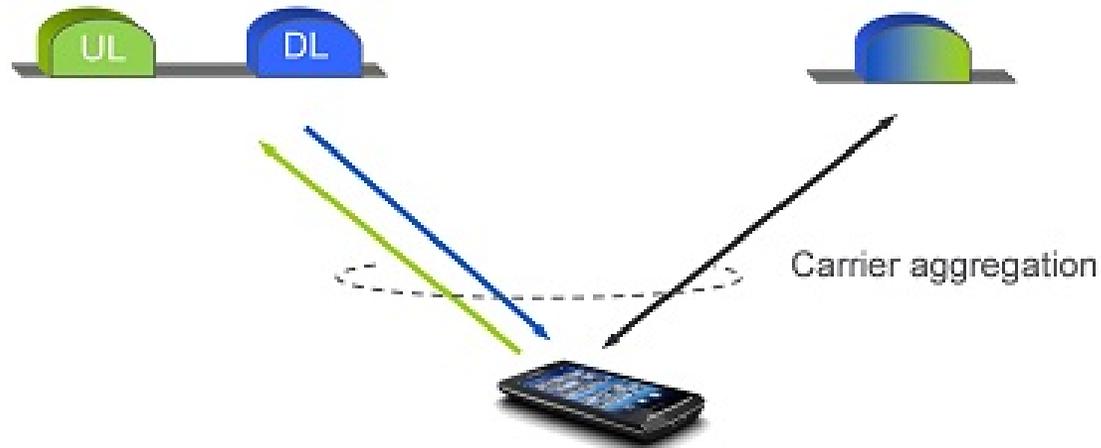


# 4G Pro Release 13 - 2017

- LAA (Licensed Assisted Access)
  - avec utilisation uniquement de la bande descendante du Wi-Fi

**Primary Carrier – Licensed Spectrum**  
Mobility, control signaling, user data, ...

**Secondary Carrier – Unlicensed Spectrum**  
user data



# 4G Release 14 2017

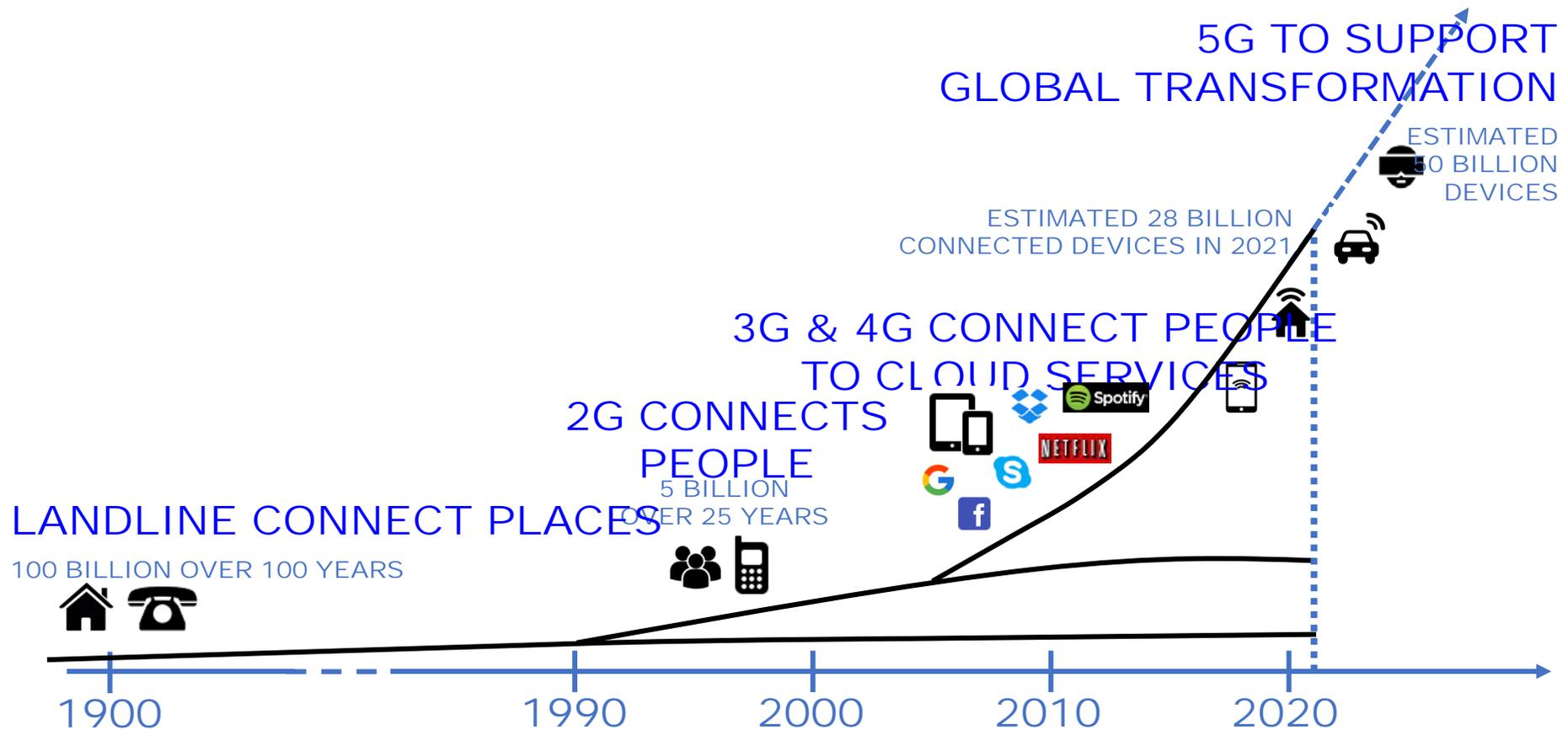
- Amélioration des missions critiques (latence extrêmement basse, haute fiabilité, grande disponibilité, et forte sécurité)
  - mission-critical video
  - mission-critical data services
- Service C-V2X – Cellular-V2X (entre véhicules, véhicule à piéton et véhicule à infrastructure)
  - Communication via le réseau cellulaire (mode 3)
  - Communications directe (mode 4)
- eLAA (enhanced-Licensed Assisted Access)
  - Utilisation de bandes sans licence en plus d'une bande licenciée avec utilisation des bandes montante et descendante du Wi-Fi.

# 4G Release 14 2017

- LWA (LTE Wi-Fi Aggregation)
- CloT Cellular Internet of Things
  - LTE M improvement
  - GPRS/GERAN enhancement for MTC
    - Réutilisation du GPRS pour l'Internet des Objets
- Amélioration du VoLTE
  - Signalisation améliorée
- Localisation
  - Amélioration en outdoor and indoor

5G

# 5G : Vers l'ultra connectivité



# 5G : vers l'ultra connectivité

...IN ORDER TO ALLOW THE EMERGENCE OF THE DIGITAL SOCIETY

## FACTORIES OF THE FUTURE

- FACTORY AUTOMATION
  - TIME-CRITICAL PROCESS CONTROL

## AUTOMOTIVE

- AUTOMOTIVE DRIVING
  - DIGITALIZATION OF TRANSPORT & LOGISTICS

## ENERGY : SMART GRIDS



## E-HEALTH

- REMOTE OPERATIONS SUCH AS SURGERY, MONITORING

## MEDIA & ENTERTAINMENT

- ULTRA HIGH QUALITY
- IMMERSIVE MEDIA
- COLLABORATIVE GAMING

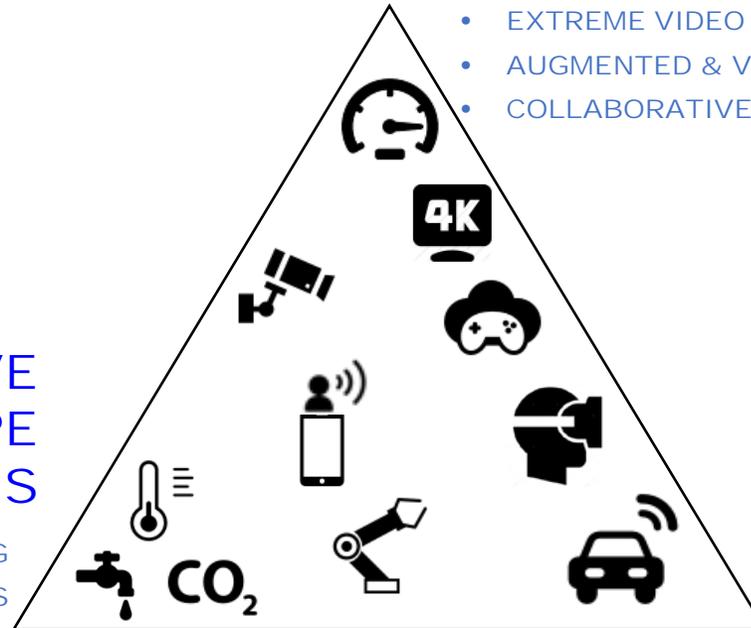
# 5G : vers l'ultra connectivité

## EMBB : ENHANCED MOBILE BROADBAND (BEYOND 4G)

- EXTREME VIDEO (8K, 3D)
- AUGMENTED & VIRTUAL REALITY
- COLLABORATIVE CLOUD GAMING

## MTC : MASSIVE MACHINE-TYPE COMMUNICATIONS

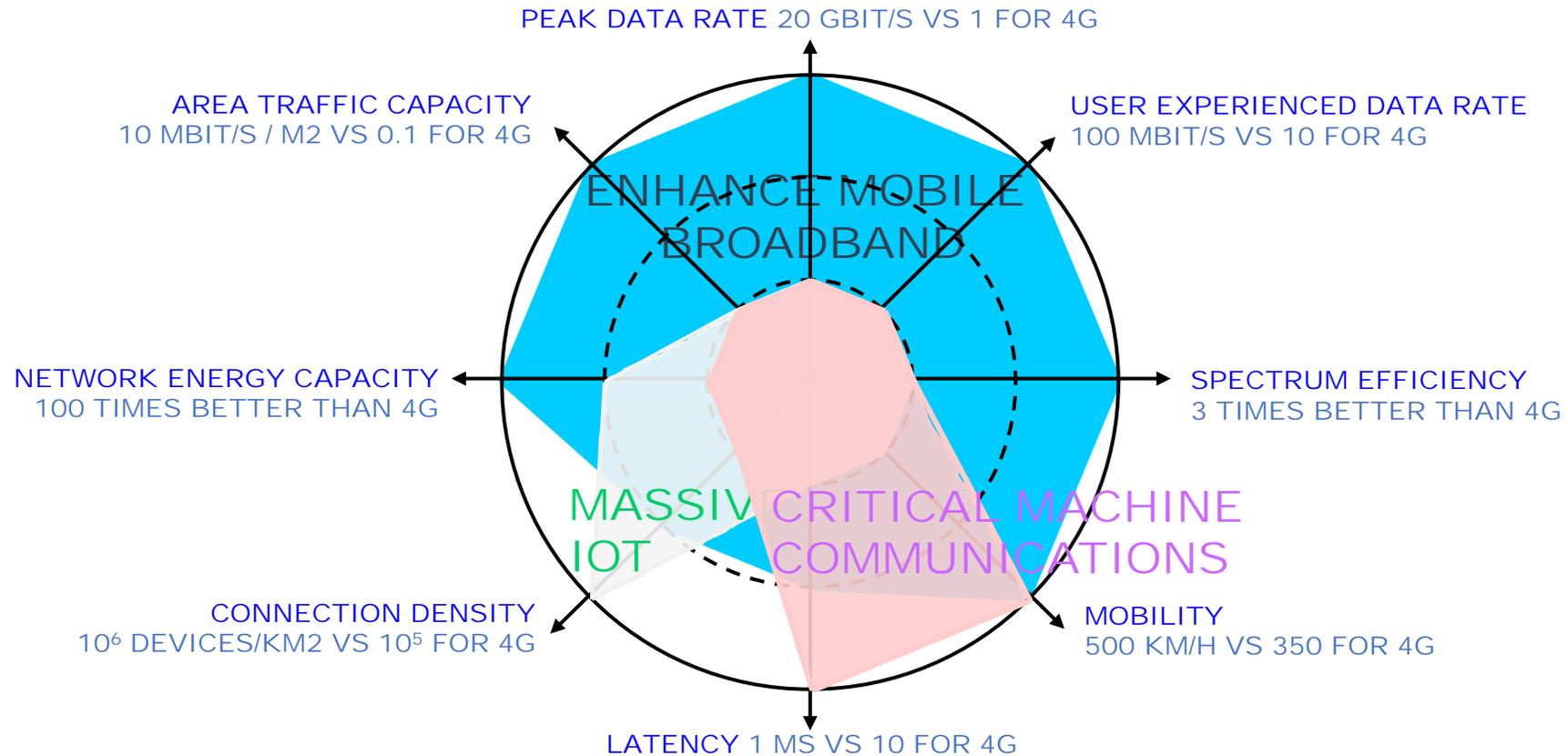
- ENVIRONMENT MONITORING
  - TRANSPORT & LOGISTICS
- SMART ENERGY, SMART RETAIL,
  - SMART AGRICULTURE,...



## URLLC : ULTRA-RELIABLE AND LOW LATENCY COMMUNICATIONS

- VEHICLE-TO-VEHICLE COMMUNICATION
- HAPTIC REMOTE CONTROL (INTERNET, ROBOTICS)

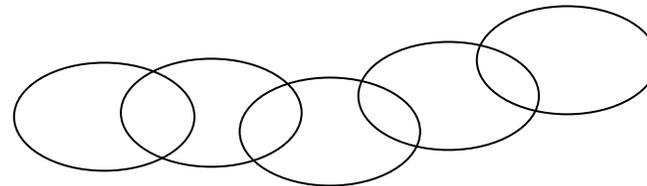
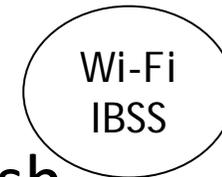
# 5G : performance



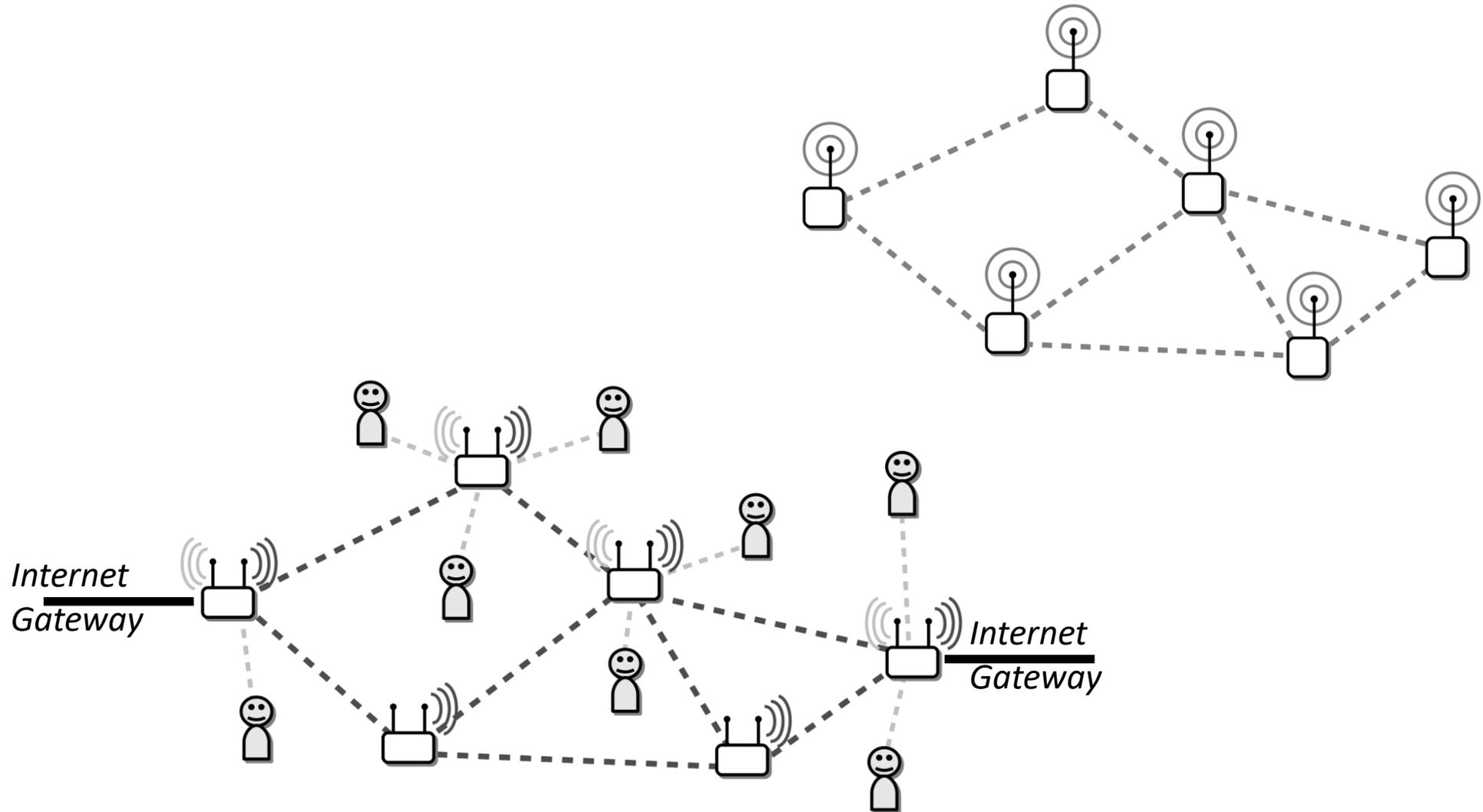
# Les réseaux ad hoc et mesh

# Les technologies

- Device2Device – 5G
- Un réseau sans infrastructure
- Options :
  - Applicative : AirDrop de IOS ; Wifi Direct
  - Niveau MAC : Mode ad hoc WiFi
  - MAC Multi-hop: IEEE 802,11s, Bluetooth Mesh, Zigbee Mesh, LoRa Mesh...
  - Multi-sauts : Manet at IETF
  - ...



# Réseaux Mesh vs. Ad Hoc





# Les réseaux ad hoc

## □ MANET (Mobile Adhoc NETWORK)

- IETF : The Internet Engineering Task Force
- Protocoles réactifs : AODV
  - Ad Hoc On Demand Distance Vector
  - RFC 3561
- Protocoles proactifs : OLSR
  - Optimized Link State Routing
  - RFC 3626



# L'école MANET

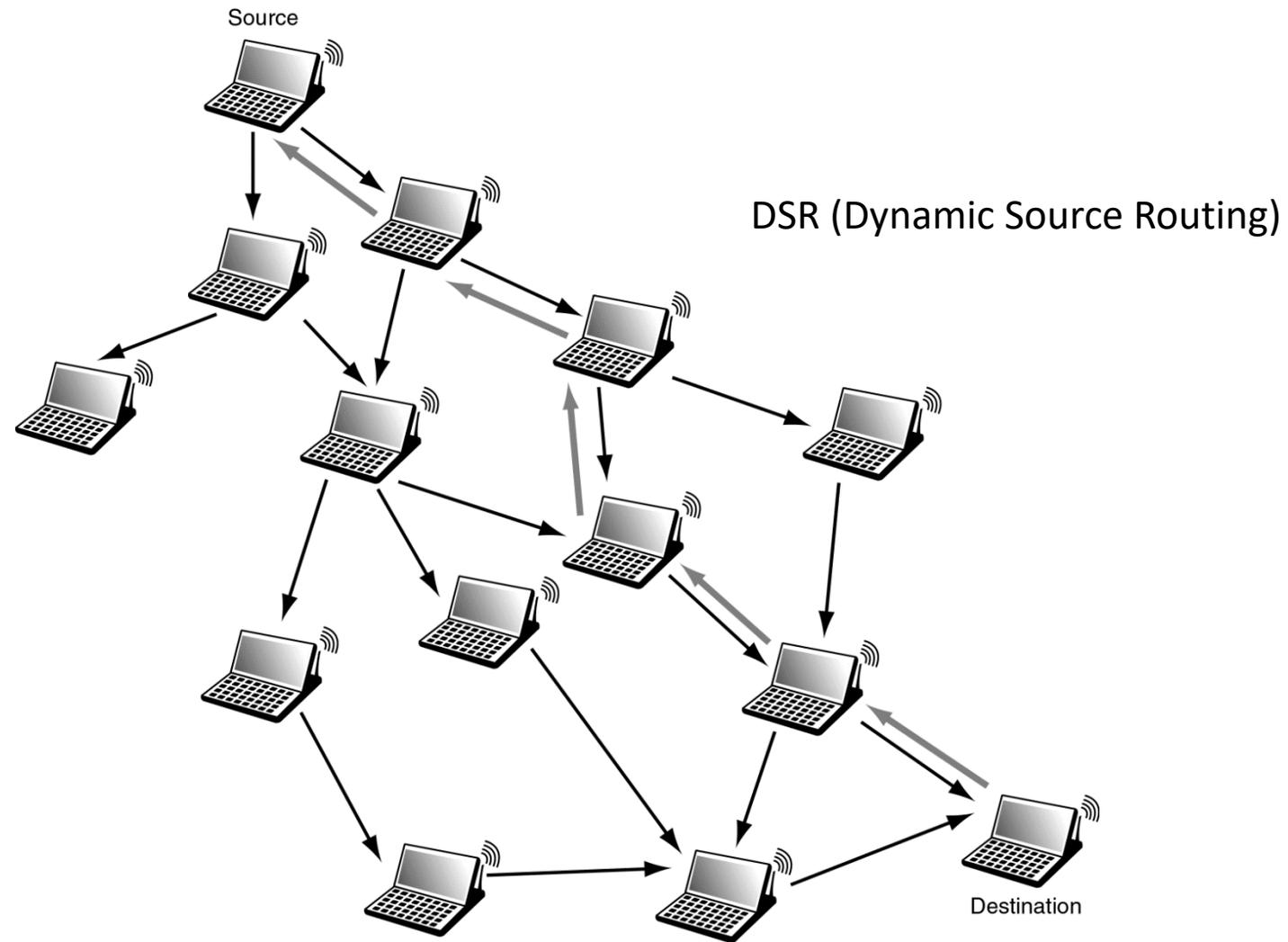
## Protocoles réactifs

- Pas de tables de routage maintenues en continu
- Réaction à la demande en diffusion de requêtes
- Pas de trafic de contrôle continu pour les routes non utilisées
- Coût important pour la mise en place des routes (inondation)
- Délais importants avant l'ouverture de chaque route
- Algorithme de plus court chemin

## Protocoles proactifs

- Échange de paquets de contrôle
- Mise à jour continue des tables de routage
- Les routes sont immédiatement disponibles à la demande
- Le trafic de contrôle et de mise à jour peut être important et partiellement inutile
- Algorithme à état de liens

# Inondation

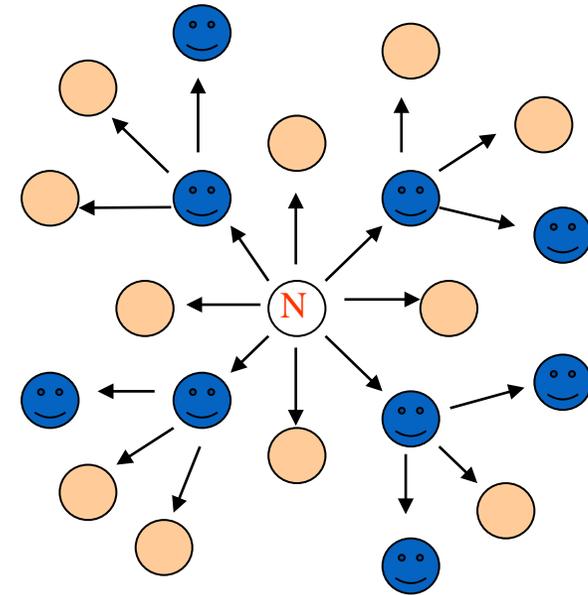


# MPRs (Multi-Point Relay)

- MPR = Pour atteindre, avec un lien symétrique, tous les nœuds à deux sauts
- Routage OLSR

## Sélection des MPR

1. Choix des voisins à un saut indispensables (car les seuls à être reliés à certains voisins à deux sauts)
2. Possibilité de choisir les voisins à un saut qui couvrent le plus de voisins à deux sauts.



Diffusion d'un message en utilisant les MPRs

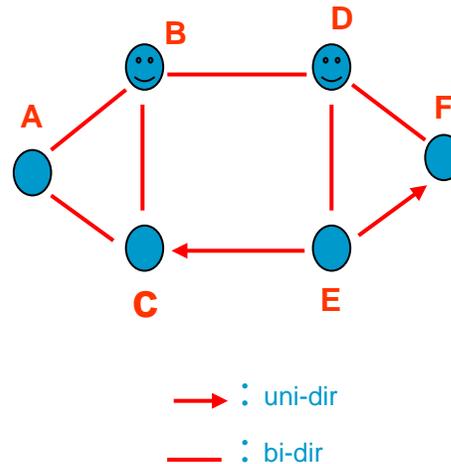
# Calcul de la route

**Nœud A :**

B	mpr	D
C	bi-dir	-

**Nœud B :**

A	bi-dir	-
C	bi-dir	-
D	mpr	E,F



**Nœud C :**

A	bi_dir	-
B	mpr	D
E	uni-dir	-

**Nœud E :**

D	mpr	B,F
---	-----	-----

**Nœud D :**

B	mpr	A,C
E	bi-dir	-
F	bi-dir	-

**Nœud F :**

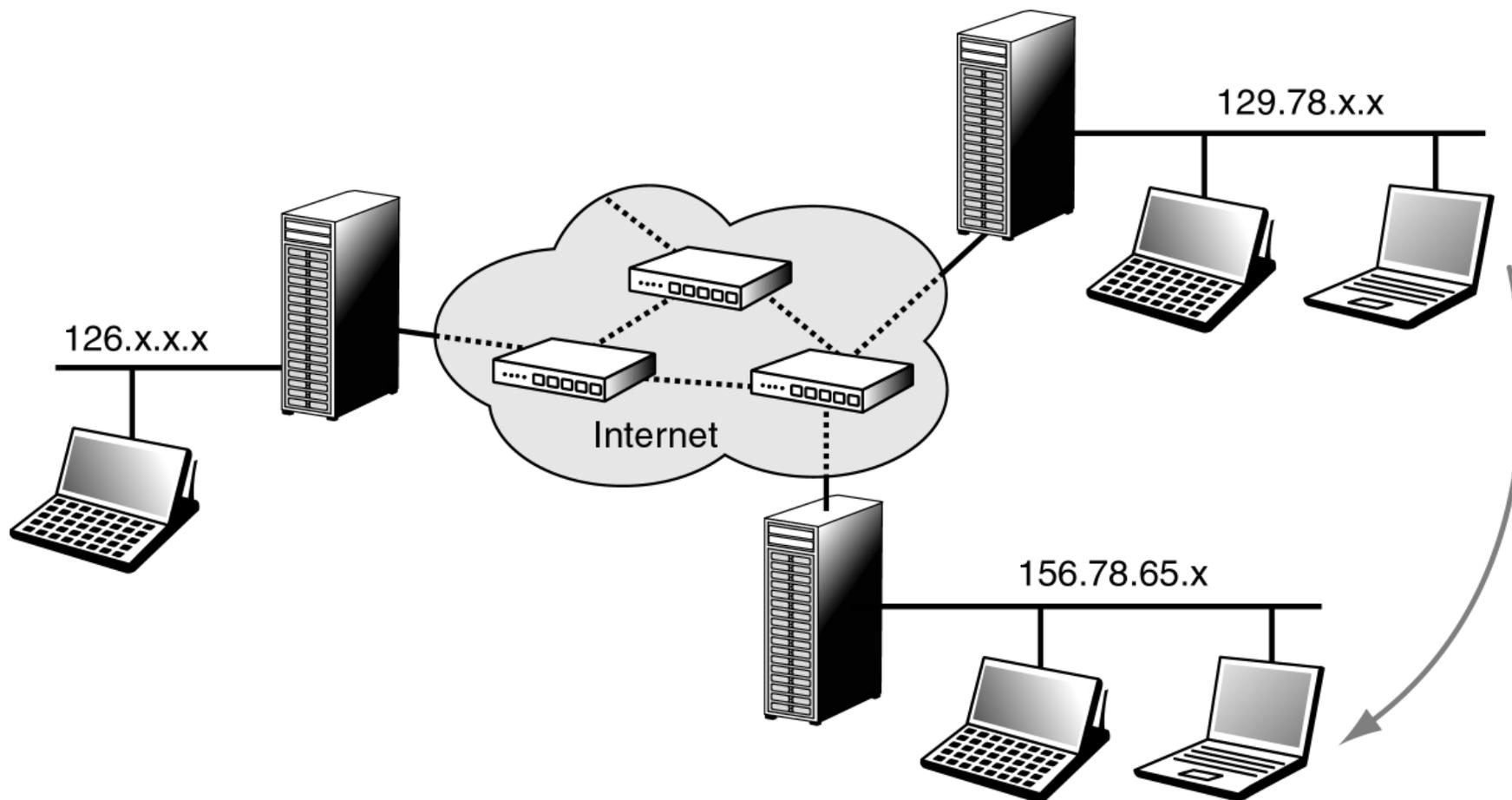
D	mpr	B,E
E	uni-dir	-

IP Mobile

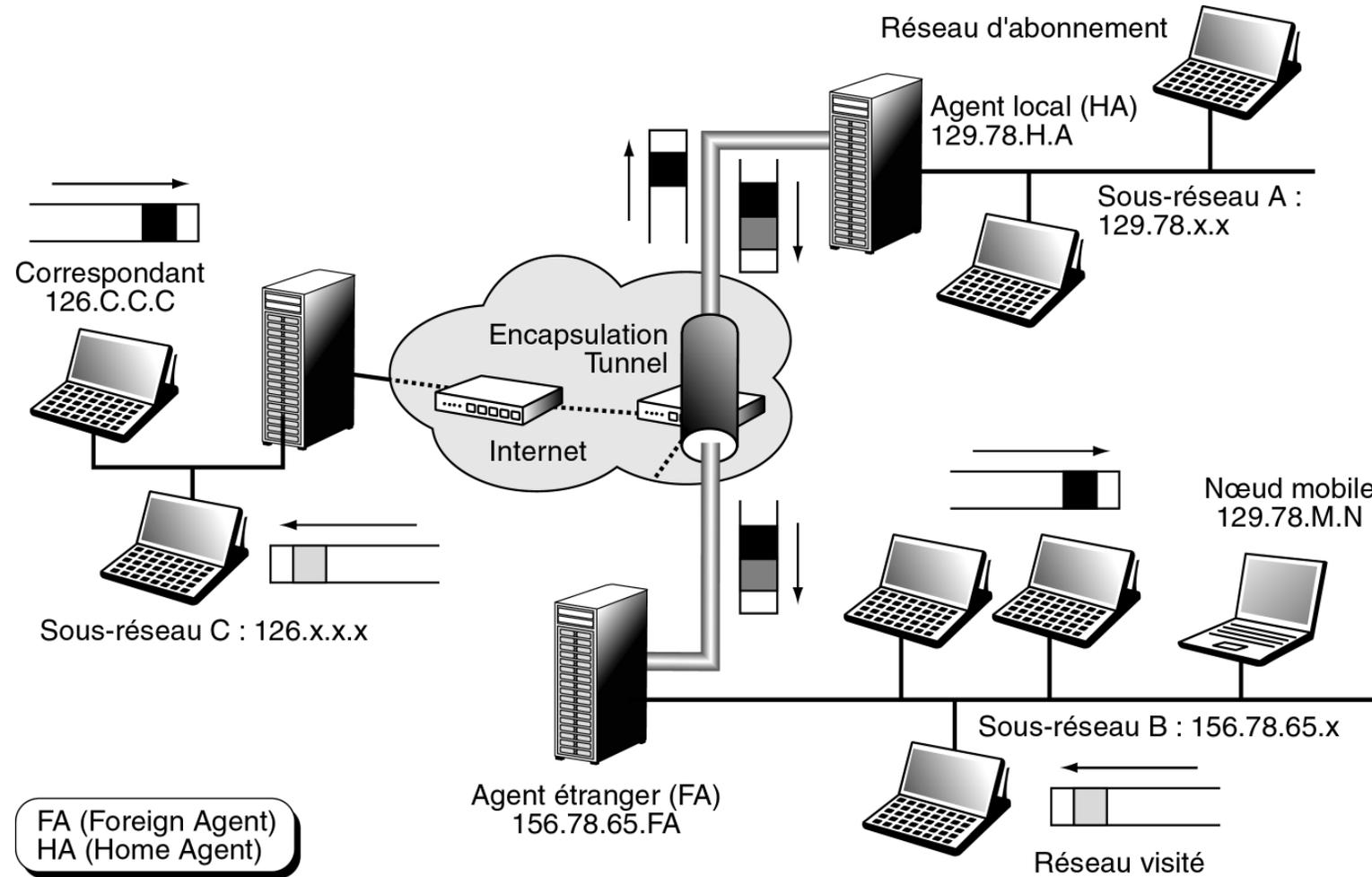
# IP-Mobile : motivation

- Miniaturisation
- Prolifération des communications sans fil
- La promesse : « anywhere, any time, network access », le réseau est la base de données ; accès instantané aux serveurs

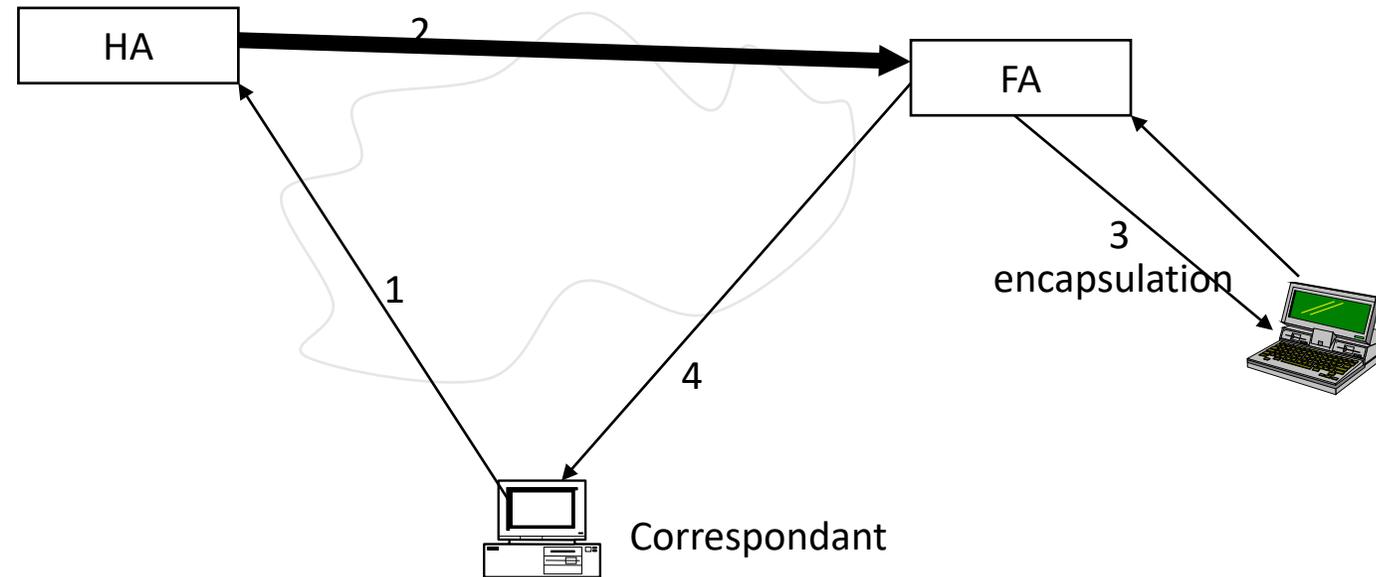
# IP-Mobile : problématique



# Encapsulation



# Optimisation de la route



- triangle routing
- peu optimal
- optimisation de la route

# IPv6 et la mobilité

