

Réseaux cellulaires

Module 3107



IUT Béziers, dépt. R&T © 2014 - 2019

<http://www.borelly.net/>

Christophe.BORELLY@umontpellier.fr

Objectifs du module

- Connaître l'architecture du réseau téléphonique mobile 2G/3G et 4G
- Connaître les critères d'évaluation de la qualité de service dans un réseau cellulaire
- **Compétences visées :**
 - Faire des mesures radio du réseau cellulaire
 - Connaître les équipements des réseaux cellulaires
 - Estimer la couverture des stations de bases (Macro cellule à la Femto cellule)

Les différentes technologies

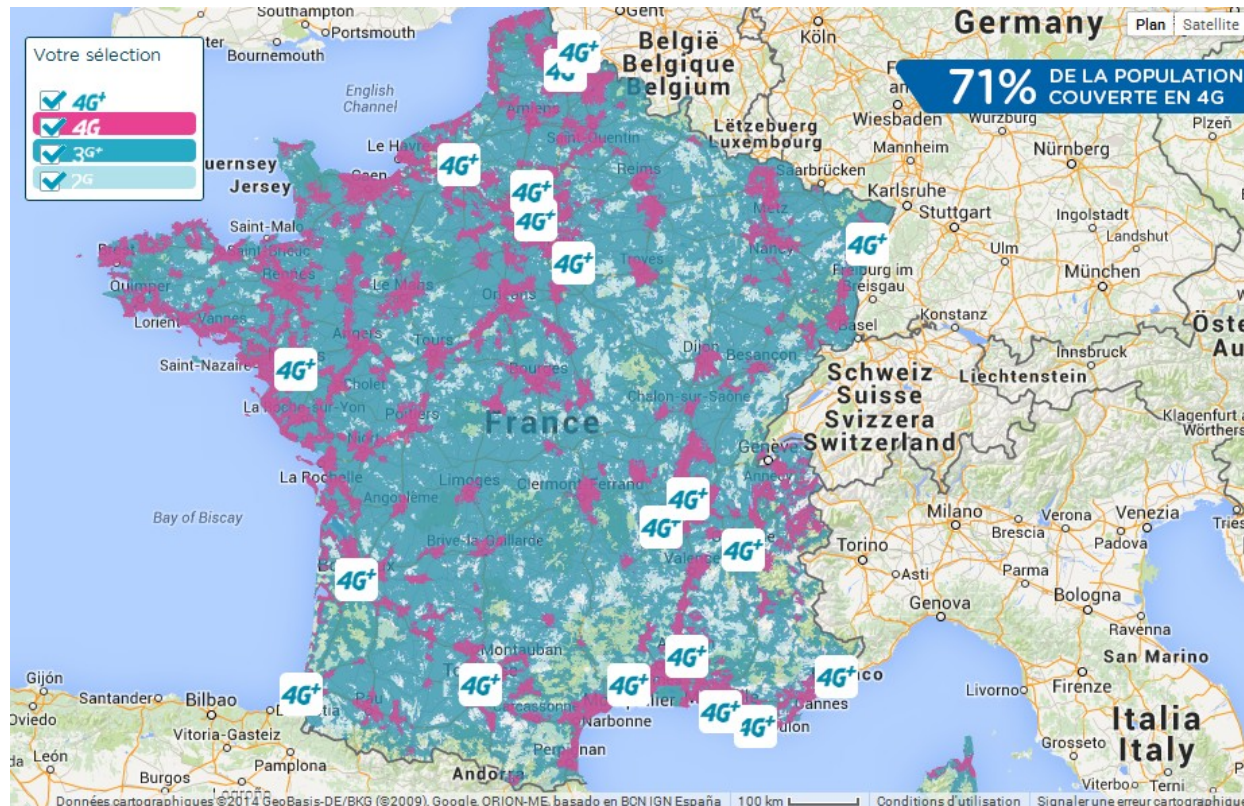
- **1G** : Radiocom 2000 analogique
- **2G** : **GSM** (Global System for Mobile) 9,05 kbps
- **2.5G** : **GPRS** (Global Packet Radio Service) 171,2 kbps
- **2.75G** : **EDGE** (Enhanced Data Rate for GSM Evolution) 384 kbps
- **3G** : **UMTS** (Universal Mobile Telecommunications System) 1,9 Mbps
- **3.5G** (3G+) : **HSPA** (High Speed Packet Access) 14,4 Mbps
- **3.75G** (3G++, H+) : **HSPA+** (High Speed Packet Access +) 21 Mbps
- **3.75G** (H+ Dual Carrier) : **DC-HSPA+** (Dual-Cell HSPA +) 42 Mbps
- **3.9G** (4G) : **LTE** (Long Term Evolution) 300 Mbps
- **4G** : **LTE-Advanced** 1 Gbps
- **4.5G/4.9G** : **LTE-A Pro** 3 Gbps
- **5G** : **NR** (New Radio) jusqu'à 100 fois plus rapide que la 4G

Réseaux cellulaires

- Les réseaux radios sans fil permettent à un utilisateur de se déplacer tout en gardant l'accès aux services proposés par l'opérateur.
- On installe donc des antennes fixes aux endroits « stratégiques » du territoire.
- Chaque antenne définit une ou plusieurs **cellules** (zone où l'on peut recevoir le signal d'une antenne donnée sur une fréquence donnée).

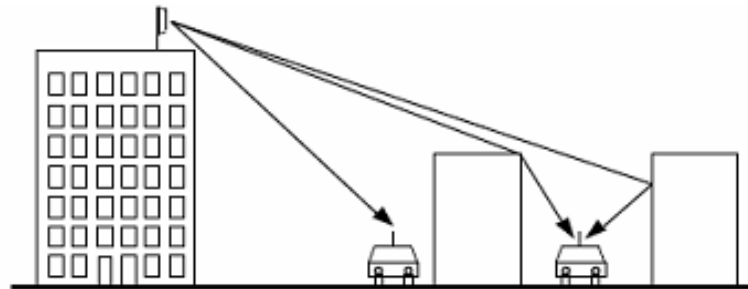
Zone de couverture

- La totalité des cellules d'un opérateur forme ce que l'on appelle la **zone de couverture**.



Propagation des ondes radio

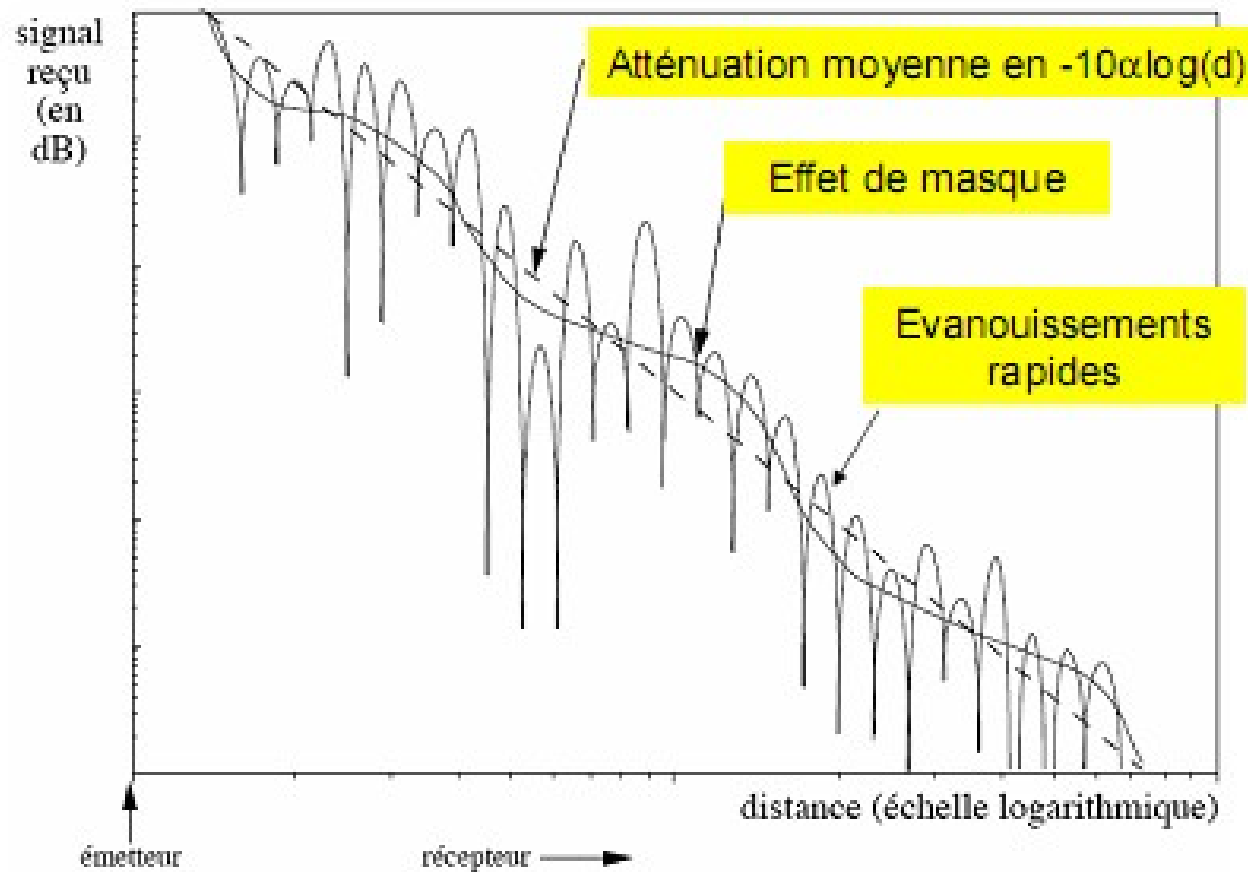
- Un onde électromagnétique peut subir plusieurs altérations sur son trajet :
 - Diffractions, réflexions, diffusions (évanouissements rapides).
 - Trajets multiples (en milieu urbain peu de trajets directs).
 - Obstacles (pouvant être mobiles) donnant des effets de masque (shadowing - évanouissements lents).
- Le signal reçu est la somme de toutes ces ondes :



Puissance reçue

- Dans le vide, on a en décibel ($10 \cdot \log_{10}(P)$) :
 - $P_r = P_e + G_e + G_r - \text{Pertes}$
- Atténuation en espace libre (Free Space Loss) :
 - $A_{\text{FSL}} \text{ (dB)} = 32,45 + 20 \cdot \log_{10}(d_{\text{Km}}) + 20 \cdot \log_{10}(f_{\text{MHz}})$
- Dans le cas général, on a :
 - $P_r = P_e + G_e + G_r - [A_{\text{FSL}} + A_{\text{shadow}} + A_{\text{fading}} + \dots]$

Variation du signal reçu



Modèles de propagation

- Modèle anglais
- Okumura-Hata
 - zones suburbaines et rurales (1 - 20 km)
- IMT2000 outdoor-to-indoor pedestrian
 - Pico-cellules
 - Faible déplacement de l'utilisateur
- IMT2020 IUT-R M.2412-0 (1 GHz-100 GHz)...

Modèle Anglais

- Dans un environnement urbain, on peut modéliser la propagation d'un signal GSM900/DCS1800 par la formule anglaise (cf. page 514 réf. 4).

$$A_{\text{dB}} = 40 \cdot \log_{10}(d_m) - 20 \cdot \log_{10}(he \cdot hr) \\ + f_{\text{MHz}}/40 + 0,18 \cdot L - 0,34 \cdot (he - hr)$$

- he et hr sont les hauteurs de l'émetteur et du récepteur en mètres.
- L est le pourcentage de surface couverte par des bâtiments.

Modèle Okumura-Hata (1)

- Modèle empirique de Okumura-Hata (cf. page 58 réf. 3) :
 - Gamme de fréquences (f) : 150-1000 MHz, 1500-2000 MHz
 - Distances (d) : 1 à 20 km
 - Hauteur de la station de base (Hb) : 30 à 200 m
 - Hauteur de l'antenne de la station mobile (Hm) : 1 à 10 m

- Affaiblissement en zone rurale, terrain quasi découvert :

$$A_{rqo} \text{ (dB)} = L_u - 4,78 \cdot [\log(f)]^2 + 18,33 \cdot \log(f) - 35,94$$

- Affaiblissement en zone rurale, terrain découvert :

$$A_{ro} \text{ (dB)} = L_u - 4,78 \cdot [\log(f)]^2 + 18,33 \cdot \log(f) - 40,94$$

- Affaiblissement en zone suburbaine :

$$A_s \text{ (dB)} = L_u - 2 \cdot [\log(f/28)]^2 - 5,4$$

Modèle Okumura-Hata (2)

- Affaiblissement en zone urbaine (COST 231):

$$A_u \text{ (dB)} = 46,3 + 33,9 \cdot \log(f) - 13,82 \cdot \log(H_b) \\ - a(H_m) + [44,9 - 6,55 \cdot \log(H_b)] \cdot \log(d) + C_m$$

- Hauteur de l'antenne mobile :

$$a(H_m) = [1,1 \cdot \log(f) - 0,7] \cdot H_m - [1,56 \cdot \log(f) - 0,8]$$

- $C_m = 0$ dB pour villes de taille moyenne et centres suburbains avec densité arboricole modérée
- $C_m = 3$ dB pour les centres métropolitains (grandes villes)

Modèle IMT2000

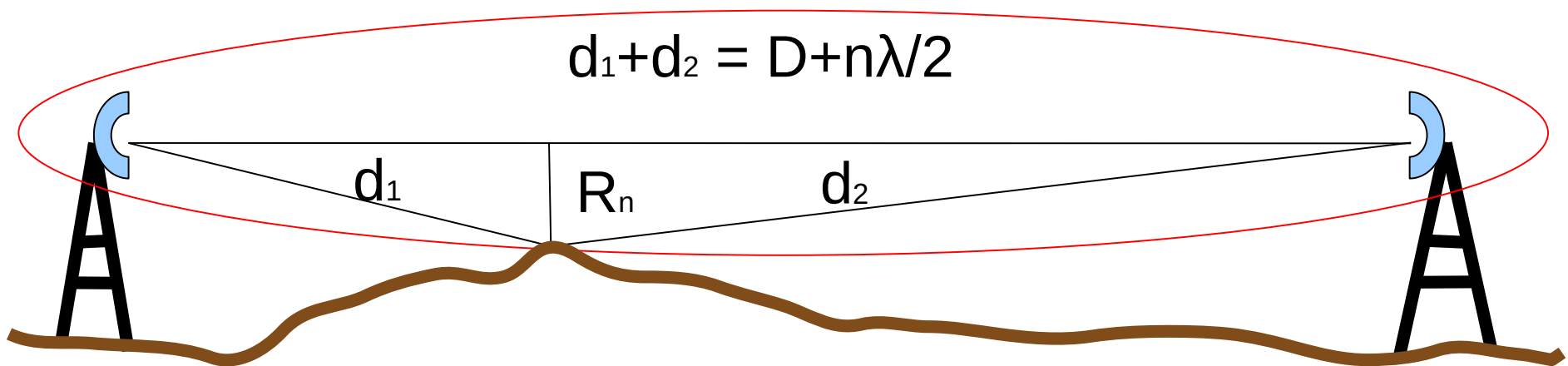
- Le standard de l'ITU-R M.1225-0 page 26, IMT2000, propose un modèle de propagation en environnement urbain pour un piéton dans la bande des 2 GHz :

$$A_{\text{dB}} = 49 + 30 \cdot \log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 40 \cdot \log_{10}(d_{\text{m}})$$

Ellipsoïdes de Fresnel

- UIT-R P.526-5
- Permet d'évaluer l'atténuation apportée par un obstacle.
- La règle expérimentale conseille d'avoir une zone dégagée sur 60% de la valeur du rayon du premier ellipsoïde ($R > 0,6 \cdot R_1$) pour ne pas avoir de pertes.

$$R_n = \sqrt{\frac{n \cdot \lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}} \Rightarrow R_{n(m)} \approx 547,533 \cdot \sqrt{\frac{n \cdot d_{1(Km)} \cdot d_{2(Km)}}{F_{Mhz} \cdot (d_{1(Km)} + d_{2(Km)})}}$$



Taille des cellules

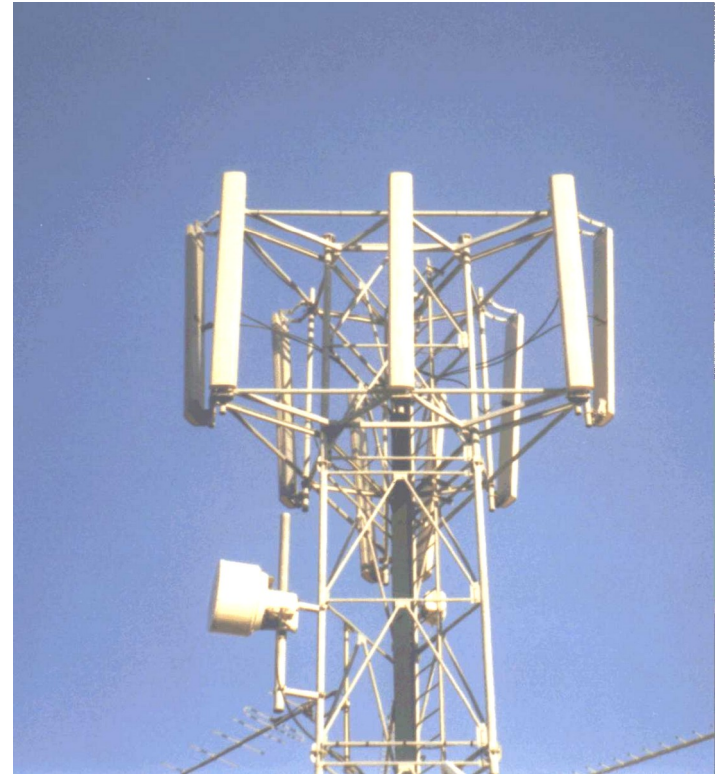
- La taille des cellules dépend de :
 - P_e , la puissance d'émission (GSM de 10 mW à 320 W)
 - G_e , le gain des antennes d'émission (GSM 11 à 17 dBi)
 - **dBi** est le gain de l'antenne par rapport à une antenne isotrope (qui rayonne de la même façon dans tous les sens).
 - G_r , le gain des antennes de réception (e.g. 0 dBi)
 - Des différentes atténuations...
 - De la sensibilité de réception des mobiles (GSM -102 dBm).
 - **dBm** est une mesure de puissance en dB par rapport à 1 mW.
- Au final la taille des cellules peut aller de 10 m à 35 Km en GSM.

Les différents types de cellules

- Chaque cellule utilise une fréquence donnée.
- Les **macro**-cellules :
 - 1 à 35 Km (zône rurale)
- Les **micro**-cellules :
 - 100 à 1 Km (zône sub-urbaine)
- Les **pico**-cellules :
 - 10 à 100 m (zône urbaine)
- Les **femto**-cellules :
 - En dessous de 10 m (« chez soi »)

Les antennes

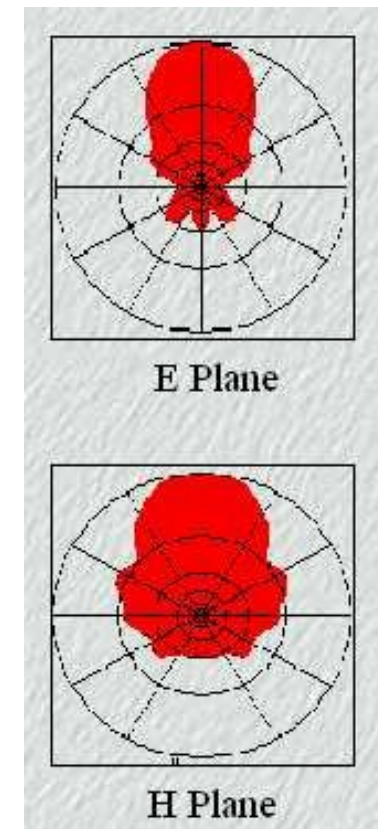
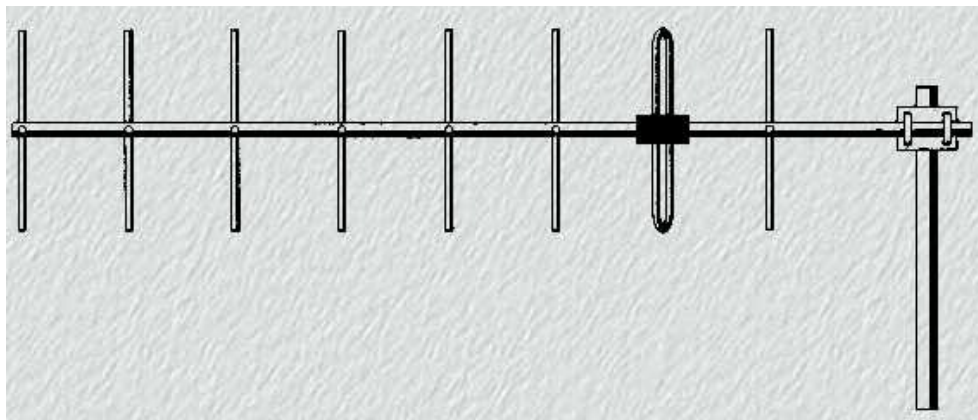
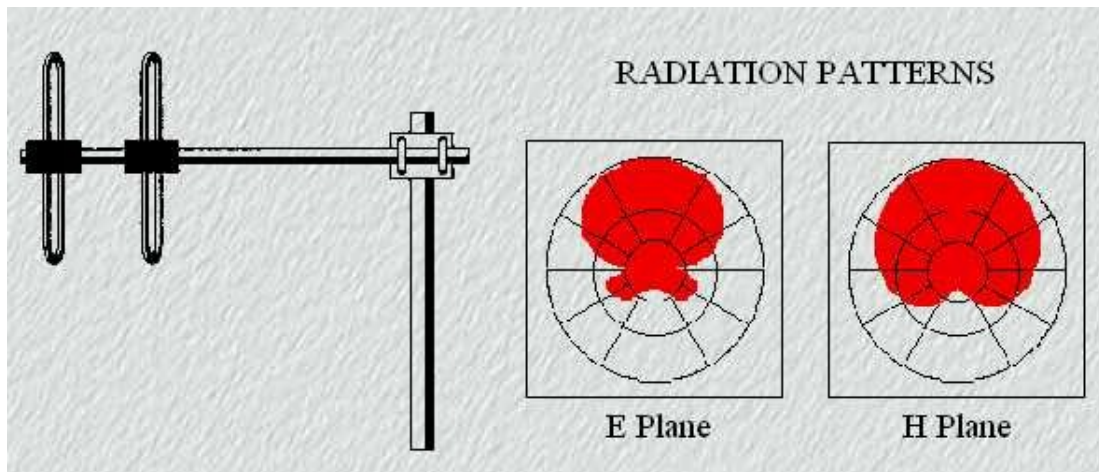
- Regroupement des équipements fixes du réseau radio
- Antennes de plusieurs cellules (e.g. 3 cellules)
- Interconnexion avec les autres équipements du réseau par Liaisons Spécialisées ou Faisceaux Hertziens
- 2G : **BTS** (Base Transceiver Station)
- 3G : **nodeB**
- 4G : **eNodeB** (Evolved Node B)
- 5G : **gNB** (next generation Node B)



Exemples



Diagrammes de rayonnement d'une antenne YAGI



Configuration des antennes

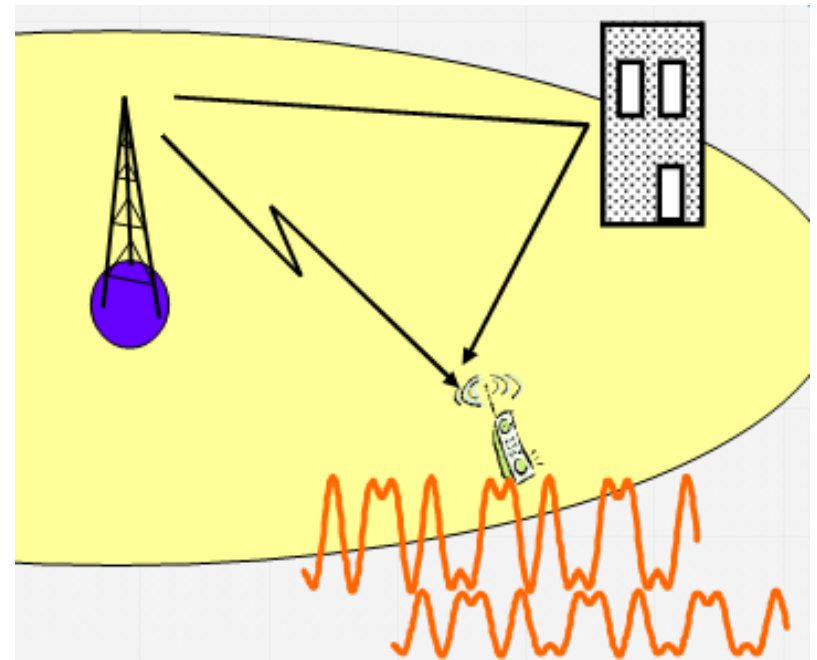
- Configuration équi-directive
 - Rayonnement identique dans toutes les directions
- Configuration sectorielle
 - Rayonnement dirigé dans une zone donnée
 - Secteurs de 120°
 - Secteurs de 60°
- Diversité
 - Amélioration de la réception du signal

Rapport signal/bruit

- **C** représente la puissance du signal utile
- **I** représente la puissance des interférences
 - IIS, ICC, ICA
- **N** représente la puissance du bruit (thermique)
 - e.g. de l'ordre de -120 dBm
- Plusieurs appellations pour le rapport des puissances :
 - C/I, SIR, SNR, C/(I+N), SINR, ...
- En GSM, on doit avoir $C/I > 9$ dB

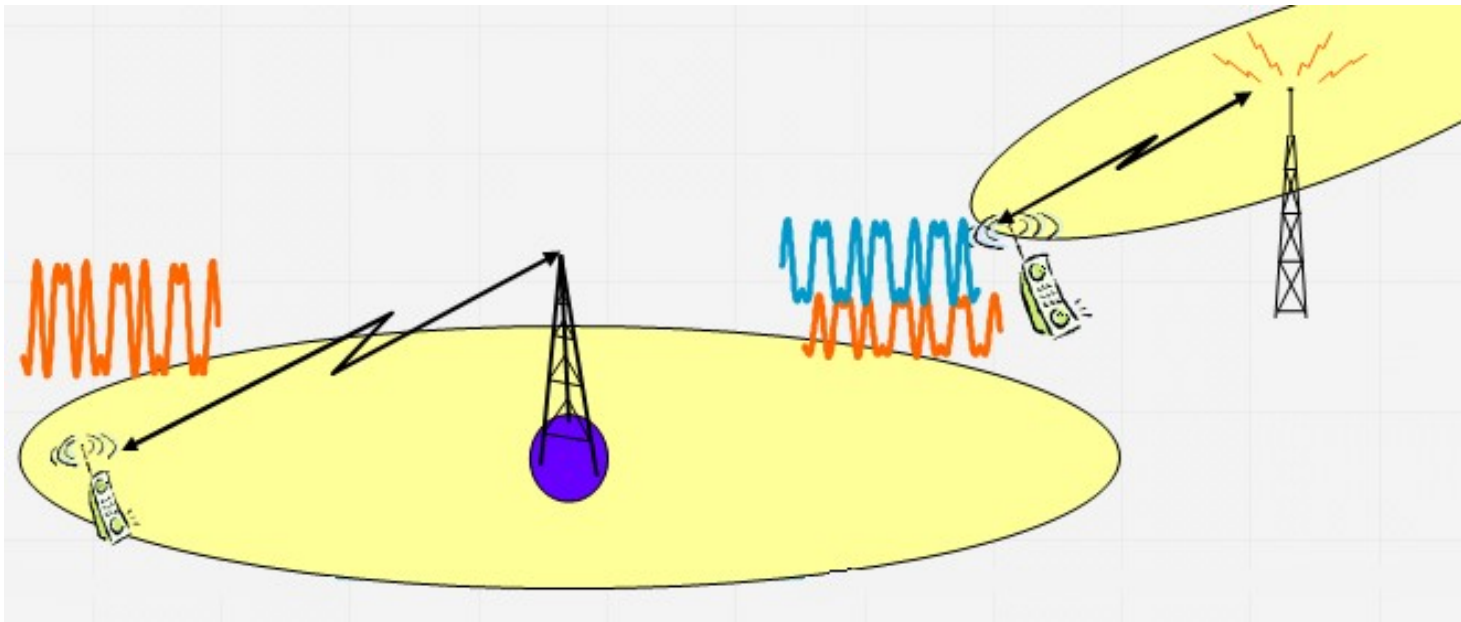
Interférences IIS

- Interférences Inter-Symboles (**temporel**)
- Un symbole (1 ou plusieurs bits) est codé en général sur un Intervale de Temps (IT).
- Lorsqu'une partie des symboles « voisins » se retrouvent dans l'IT d'un symbole donné (délais, réflexions,...), cela perturbe le décodage.



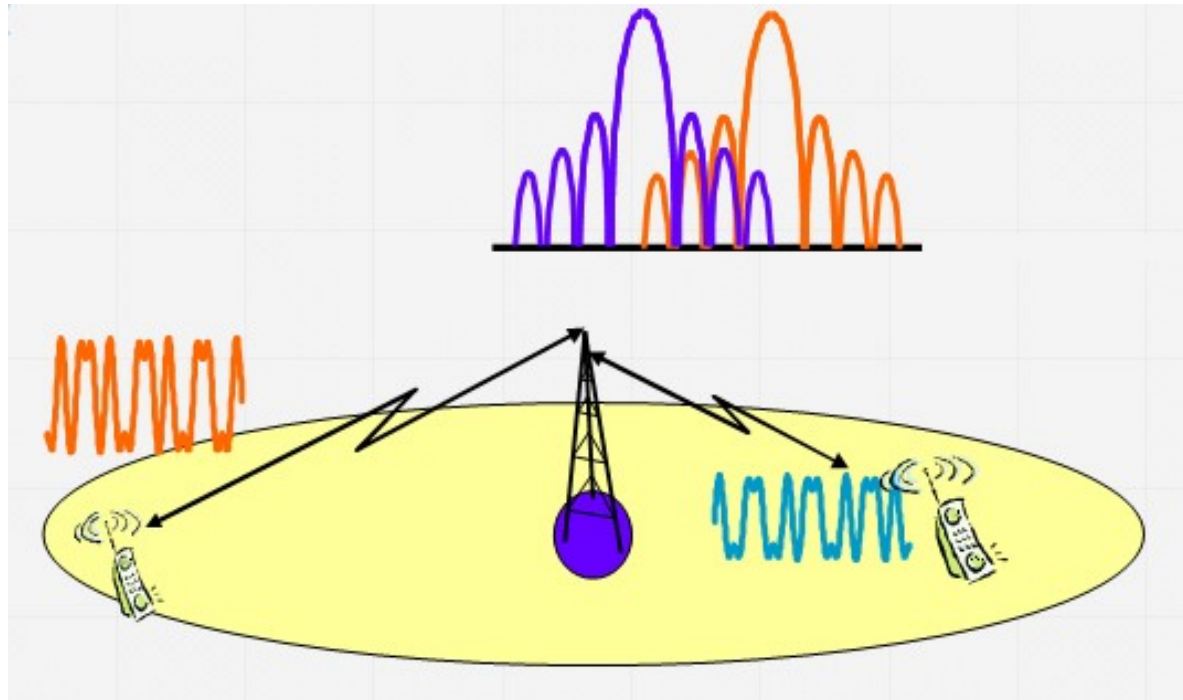
Interférences ICC

- Interférences Co-Canal
- Interférences dûent à une **même fréquence** utilisée par des équipements différents et proches spatialement.



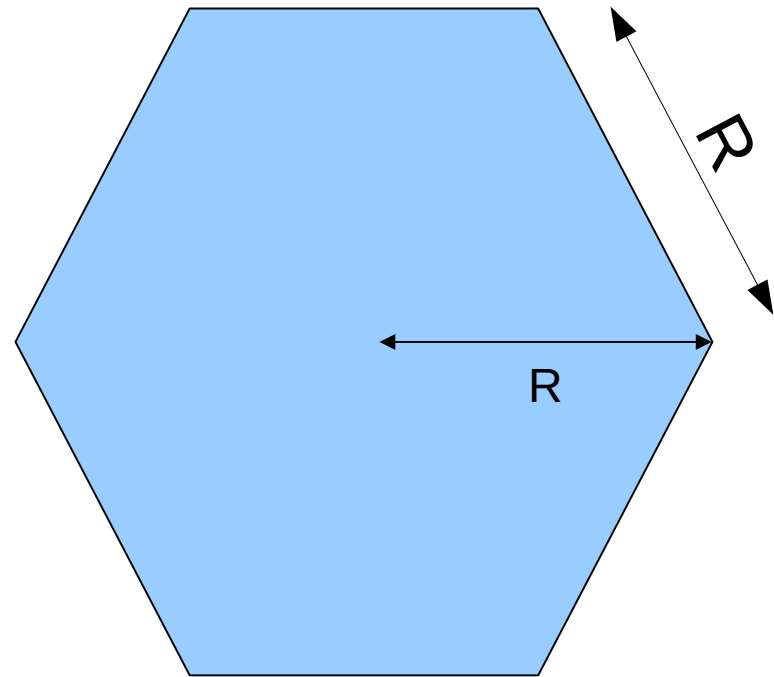
Interférences ICA

- Interférences des Canaux Adjacents
- Utilisation de **fréquences voisines** engendrant des interférences au niveau du spectre.



Planification du réseau

- Modélisation des cellules sous forme d'un hexagone.
- 6 cellules voisines pour une cellule donnée



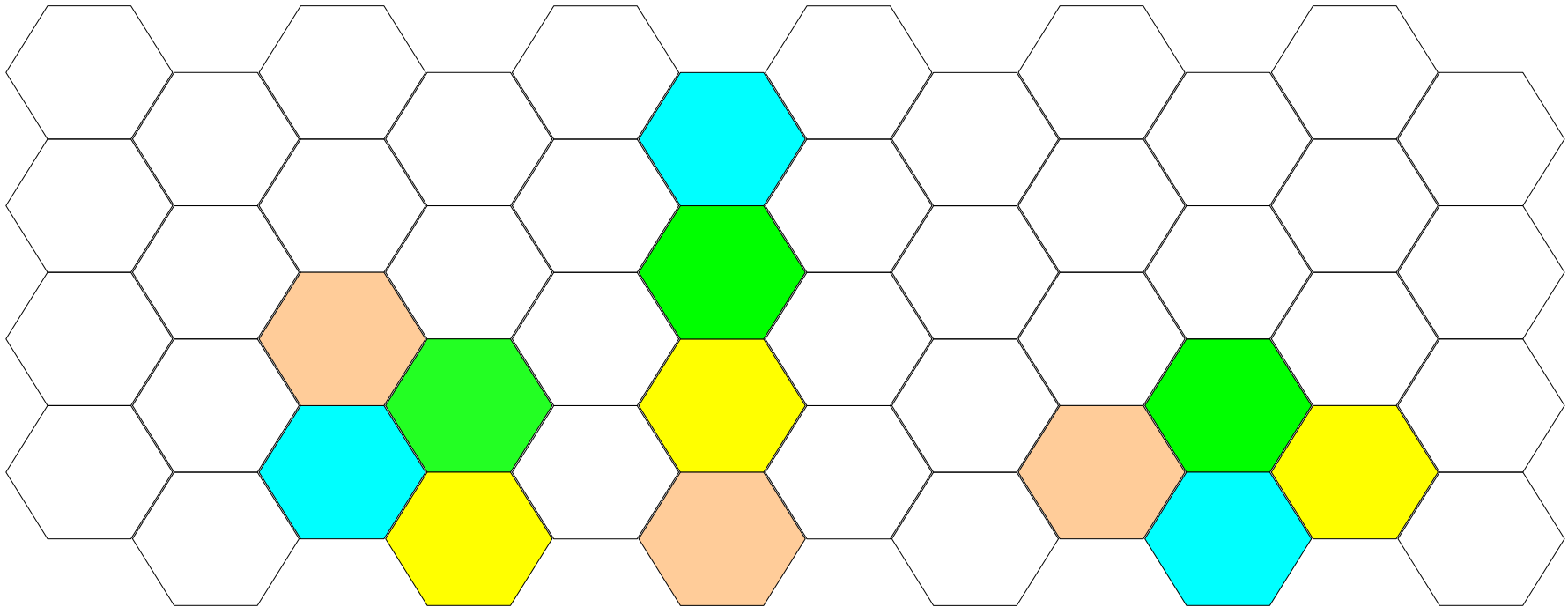
$$S = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot R^2$$

Distance de réutilisation des fréquences

- Les **co-cellules** sont des cellules qui utilisent la même fréquence.
- Pour ne pas avoir d'interférences **ICC**, il faut les éloigner d'une distance D . C'est la **distance de réutilisation**.
- Pour des cellules de rayon R , le rapport Carrier-Interference C/I est fonction du rapport de réutilisation $Q=D/R$.

Répartition des fréquences

- Comment disposer les canaux sur le territoire ?
- Exemple avec 4 canaux :

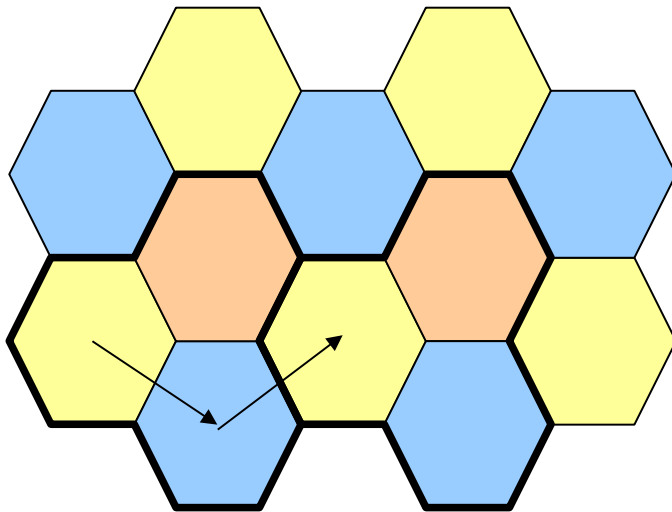


Taille des motifs

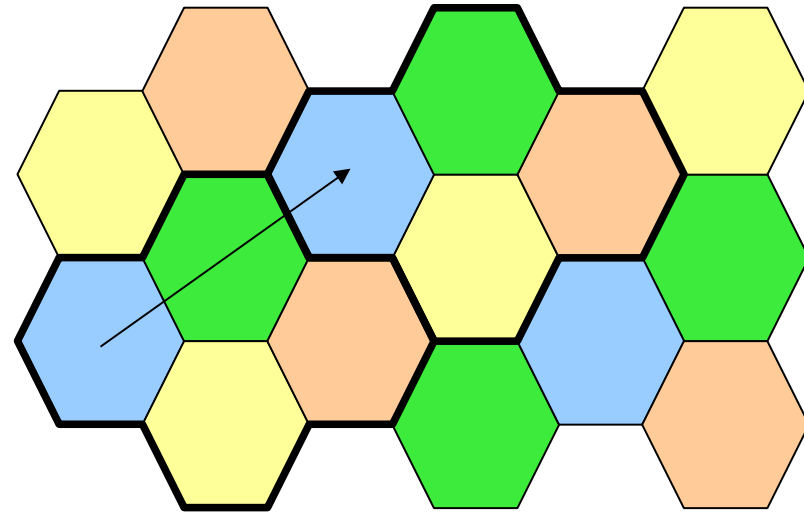
- Pour un motif de N cellules, on peut montrer que :
 - $Q = D/R \approx \sqrt{(3N)}$
 - $c/i \approx Q^\alpha/6$ (α entre 2 et 4, e.g. $\alpha = 3,5$)
- Pour un c/i seuil, on doit avoir :
 - $N > 1/3.[6.(c/i)_{\min}]^{2/\alpha}$
- En GSM, $C/I > 9 \text{ dB} \Rightarrow c/i=10^{9/10}$
 - $\alpha = 2,5 \Rightarrow N > 7,335$
 - $\alpha = 3 \Rightarrow N > 4,382$
 - $\alpha = 3,5 \Rightarrow N > 3,033$

Théorie des graphes

- En utilisant des déplacements sur les axes i et j à 120° (dans les hexagones), on détermine la taille d'un motif pour une combinaison de i et j donnée ($N=i^2+i.j+j^2$)



$N=3$ ($i=1, j=1$)

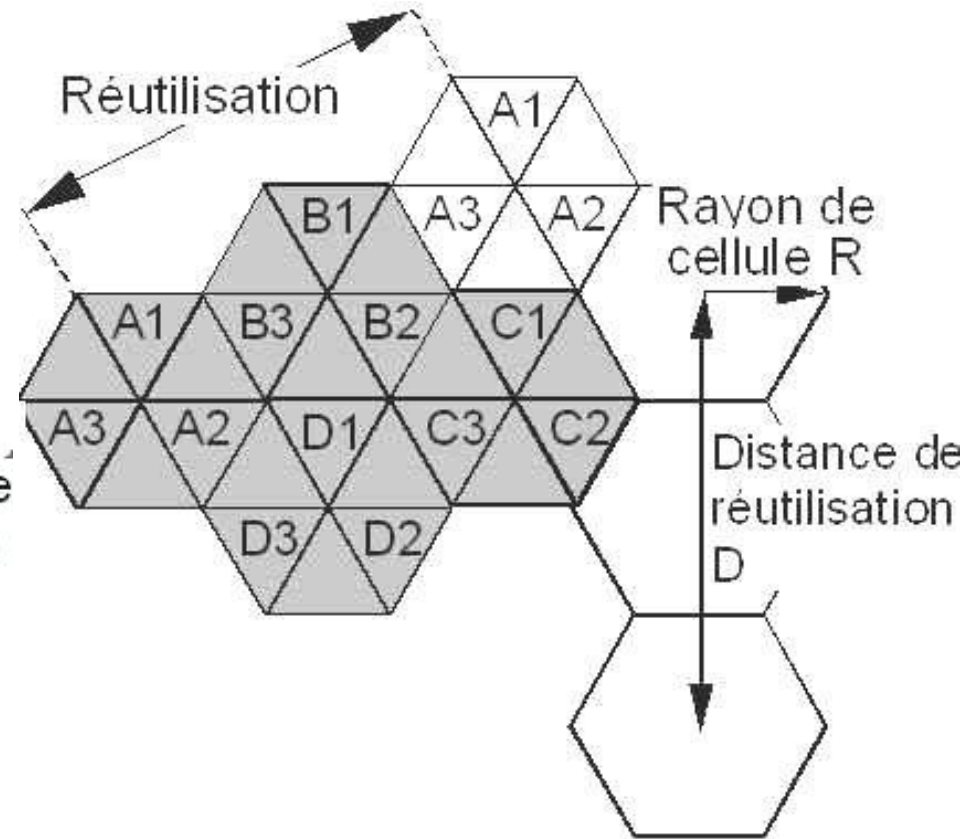
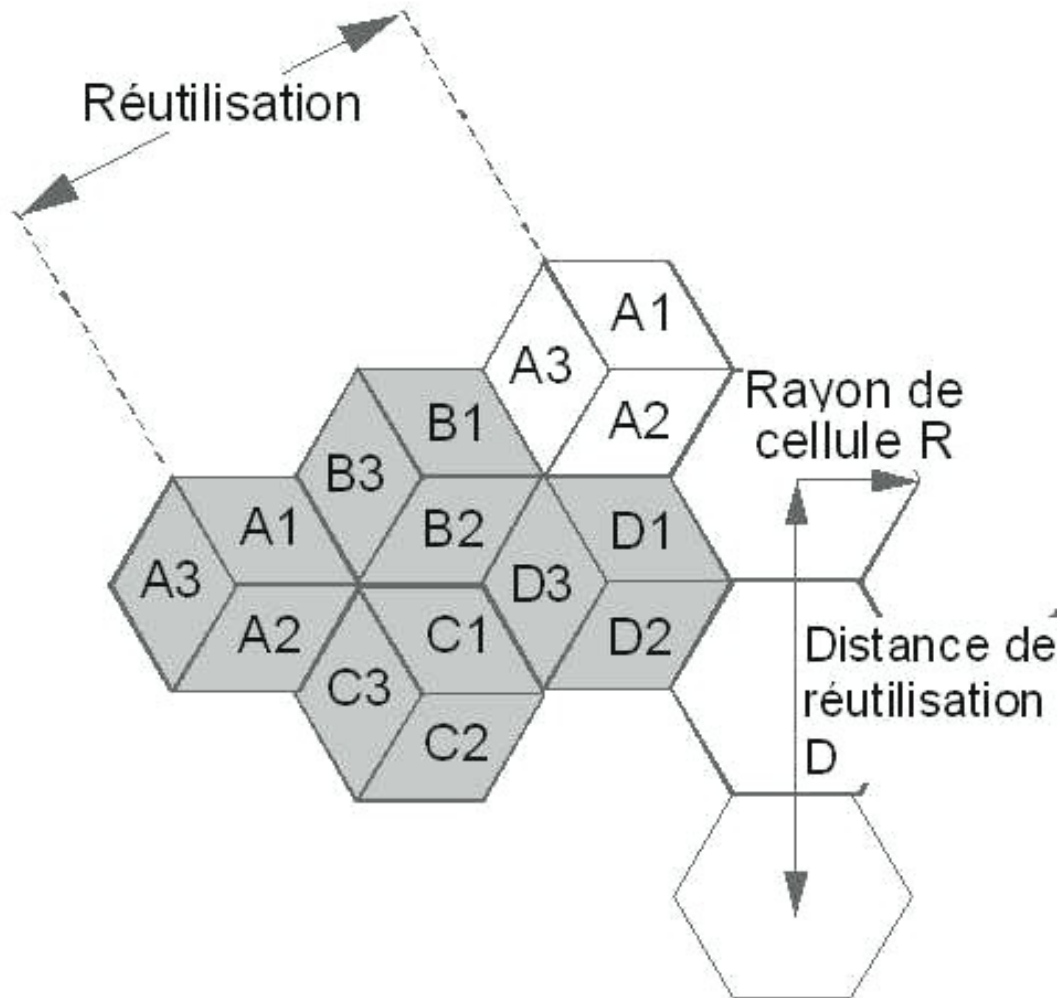


$N=4$ ($i=0, j=2$)

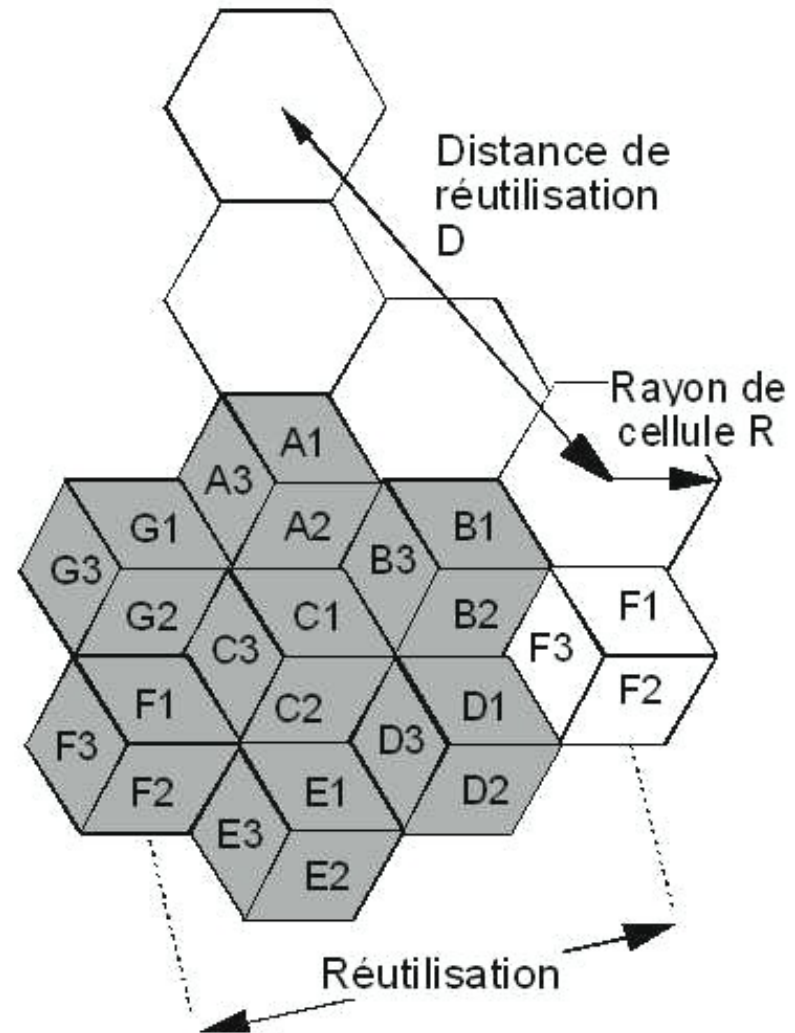
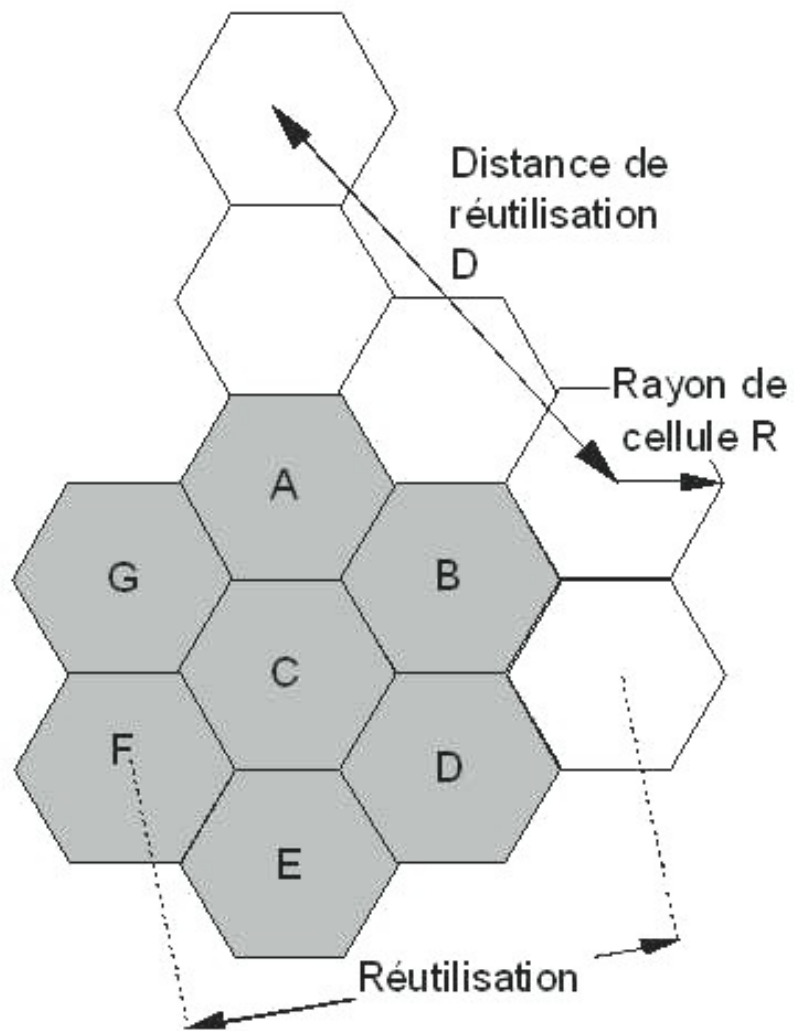
La sectorisation

- La sectorisation (re-découpage des cellules) est nécessaire quand il y a une forte densité des abonnés.
- Développement du réseau en terme de capacité :
 - Infrastructure existante (BTS et interconnexion)
 - Coûts minimisés
 - Planification du réseau :
 - Réserve de canaux, prévision du trafic

Motifs à 4 cellules



Motifs à 7 cellules



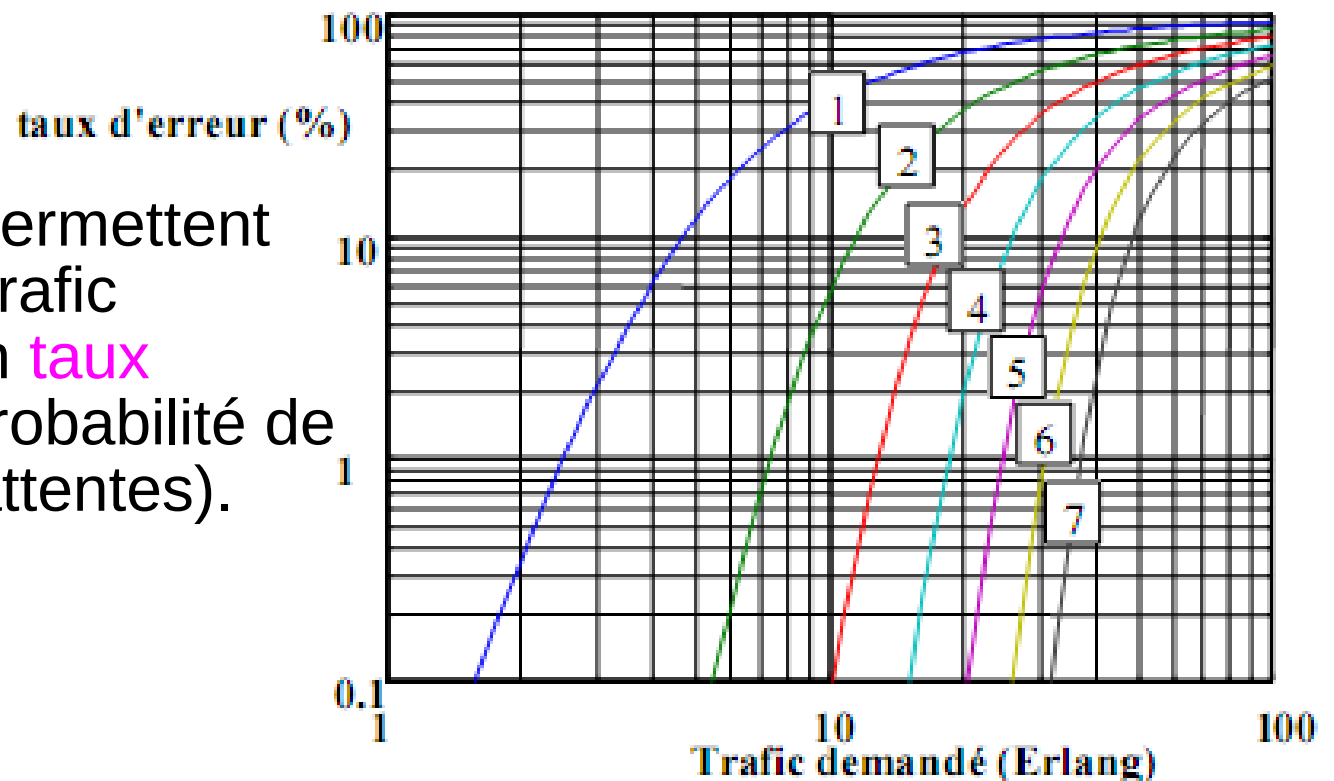
Mesure du trafic et capacité du réseau

- Le trafic d'un réseau téléphonique se mesure en **Erlangs**.
- Il correspond au rapport entre la durée du trafic réel et la durée de mesure.
- Exemple : si sur une heure, on a 4 appels de 50 s, 1 min 20, 40 s et 1 min 10, alors le trafic est de :
 - $T = 4/60 = 66,7 \text{ mErl}$
- La capacité du réseau se mesure en **Erl/Hz/m²**.

Probabilité de perte en fonction du trafic

- Suivant le trafic à écouler sur une cellule, le système peut être saturé.

- Des graphiques permettent de déterminer le trafic maximum pour un **taux d'erreur** donné (probabilité de perte - cf. files d'attente).

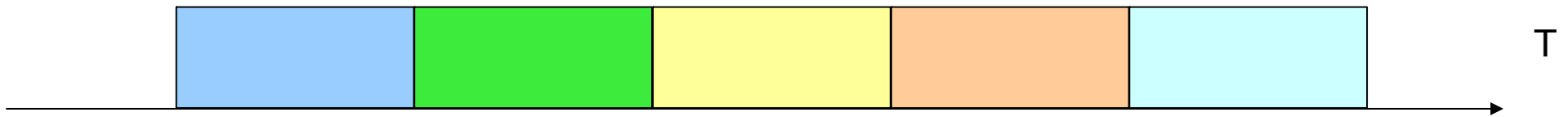


Techniques d'accès multiple

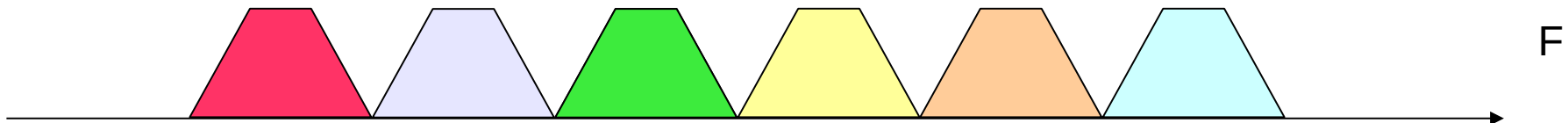
- Accès au réseau par plusieurs utilisateurs de façon simultanée.
- **TDMA** : Time Division Multiple Access
- **FDMA** : Frequency Division Multiple Access
- **OFDMA** : Orthogonal Frequency Division Multiple Access
- **CDMA** : Code Division Multiple Access

TDMA et FDMA

- **TDMA** : Intervalles de temps (slots). Implique une synchronisation temporelle fine (attention au délais de propagation / interférences IIS).

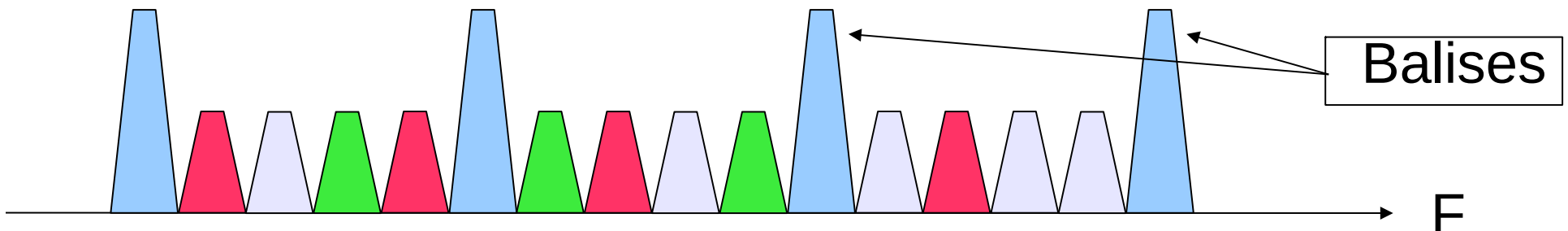


- **FDMA** : Utilisation de canaux fréquentiels (compromis bande passante / interférences ICA).



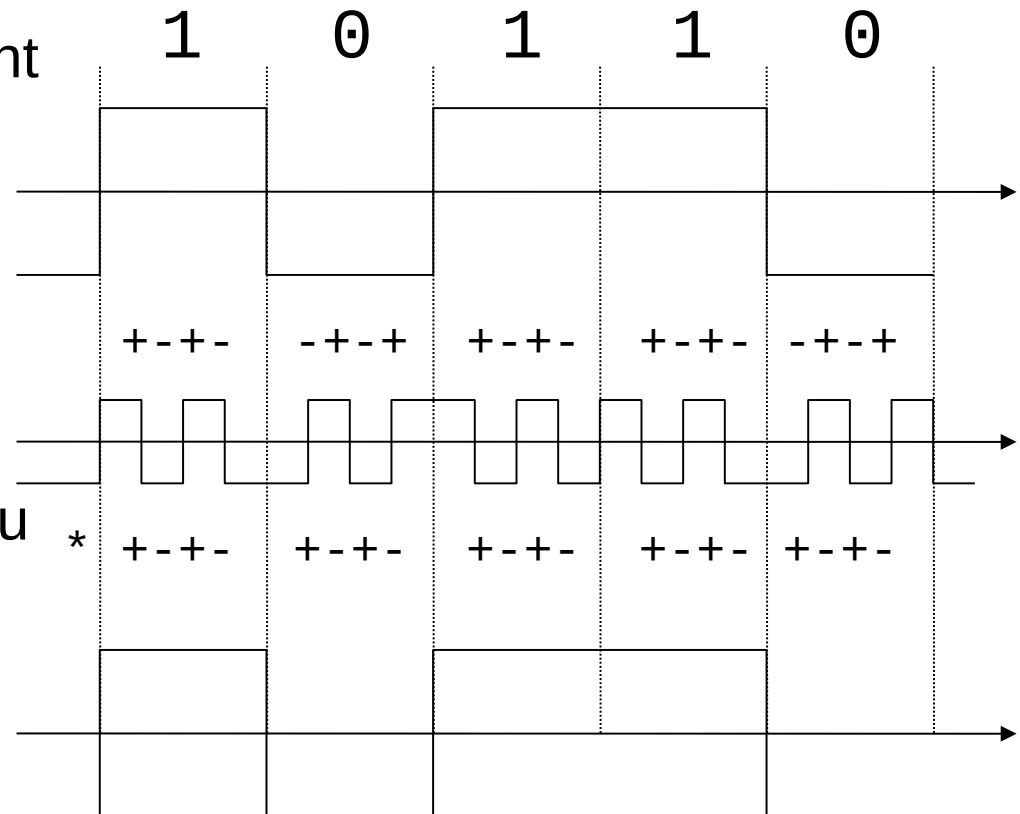
OFDMA

- **OFDMA** : allocation dynamique de canaux par rapport aux mesures réalisées par les utilisateurs, au débit et au taux d'erreur désiré.
 - Les sous porteuses sont orthogonales, c'est à dire qu'elles ne se génèrent pas d'interférences entre elles.
 - Utilise la FFT (Fast Fourier Transform).
 - Meilleure efficacité spectrale.
 - Utilisé par (HSOPA 3GPP rel. 8) et WiMax (IEEE 802.16)

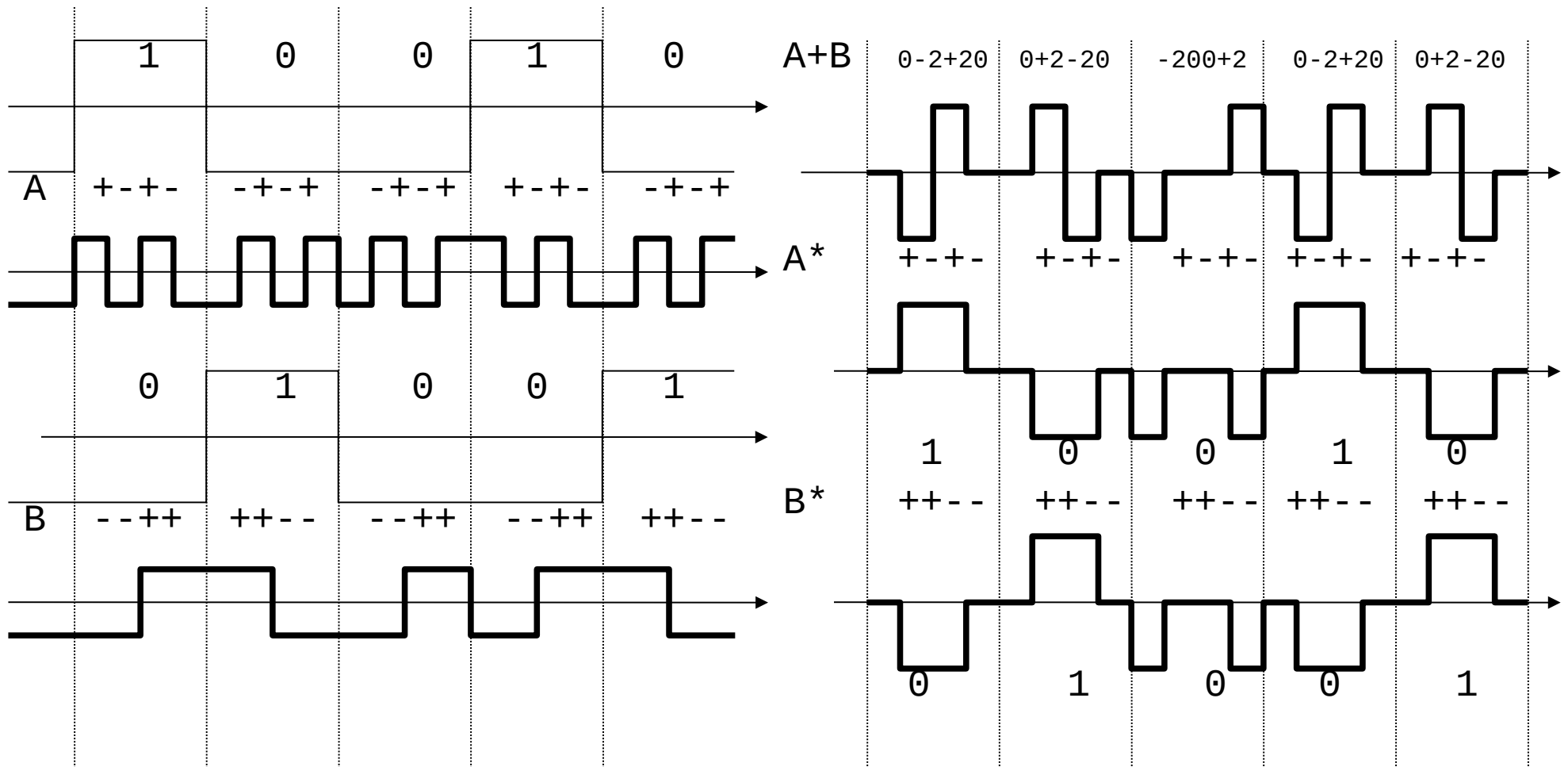


CDMA

- Découpage d'un bit en n « chips » implique un étalement du spectre d'un facteur n.
- Moins de sensibilités aux interférences
- Le décodage se fait par multiplication et sommation
- Suivant les codes utilisés, le système doit être synchrone ou non.
- Exemple codes orthogonaux :
 - + + + +, + - + -, + + - -, + - - +

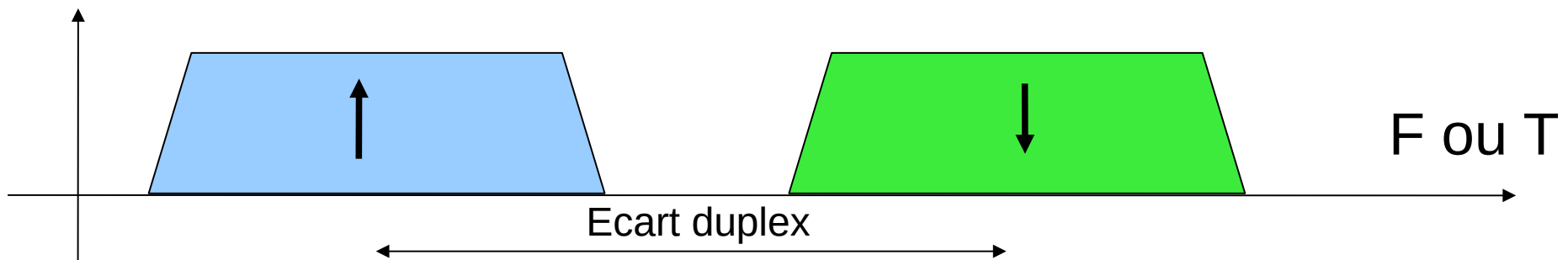


CDMA (2 utilisateurs)



Techniques de duplexage

- Séparation du sens **montant** et **descendant**
- Attention aux interférences IIS ou ICA suivant l'écart duplex.
- **FDD** : Frequency Division Duplexing
- **TDD** : Time Division Duplexing



Références

- [1] <http://www.3gpp.org/>
- [2] BDT, “MANUEL SUR LE DÉVELOPPEMENT DES COMMUNICATIONS MOBILES”, ITU 1997
- [3] Sami TABBANE, “Réseaux mobiles”, HERMES 1997, ISBN 2-86601-622-X
- [4] Roger L. FREEMAN, “Radio System Design for telecommunications”, Wiley-Interscience 1997, ISBN 04-7116-2604
- [5] Philippe GODLEWSKI, Philippe MARTINS, Marceau COUPECHOUX - “Concepts Cellulaires et Paramètres Radio” – ENST Telecom Paris