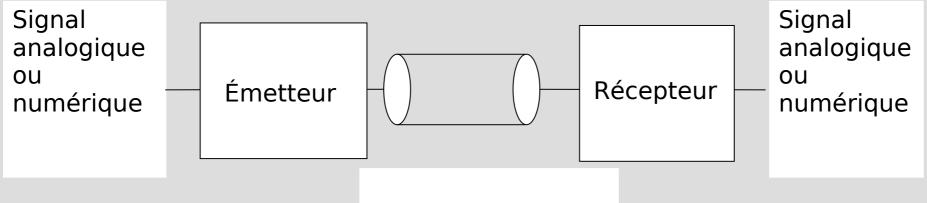
#### R. 402

# Transmissions Numériques Avancées

# Synoptique d'une chaîne de transmission numérique



Support physique:

- câble,
- fibre optique,
- atmosphère.

#### Chaîne de transmission

- Source analogique
- Numérisation
- Compression
- Cryptage
- Code correcteur
- Mise en forme / modulation
- Multiplexage

- Décodeur de source
- Unité de décryptage
- Décodeur canal
- Détecteur
- Démodulateur
- Contrôleur d'accès
- Récepteur

#### Deux étapes supplémentaires

- Accès multiple (multiplexage): gestionnaire d'accès à la ressource de communication; partage de la ressource avec d'autres sources d'information.
- Spread Spectrum : dispositif à étalement de spectre, transforme un signal de largeur de bande B en signal de largeur de bande B<sub>ss</sub> très grande devant B.

- I. La ligne de transmission sans support physique, présentation et problèmes
- II. Multiplexage
- III. Étalement de spectre OFDM et CDMA
- IV. Principe du MIMO

# La ligne de transmission sans support physique

#### L'air

- Pas de support physique, le support de transmission est immatériel.
- Rayons infrarouges;
- Rayons lasers;
- Ondes électromagnétiques :
  - Transmission longues distances,
  - Transmission courtes distances,
  - Transmission par satellites.

### Infra-rouge

- Télécommandes ;
- 36 ou 38 kHz;
- Pour des distances < 1 km ;</li>
- Pas d'obstacle au faisceau ;
- Solution la moins coûteuse lorsqu'il n'y a pas la possibilité d'établir une ligne.

#### **Courtes distances**

- GSM (~1,5 GHz), Wifi (~3 GHz);
- Puissance d'émission faible ;
- Sur 100 300 m jusqu'à qques km.

### Longues distances

- Paraboles d'émission et de réception en hauteur;
- Un faisceau hertzien entre 2 antennes en vue directe => plusieurs km.

#### **Satellites**

- Satellites géostationnaires (36000 km);
- Temps de transmission non négligeables (200 à 300 ns);
- Avec des fréquences autour de 5 GHz.

### Le spectre des fréquences

Cf tableau ANFR Spectre des fréquences

### Le spectre des fréquences

- 900 MHz bande historique du GSM
- 1800 MHz bande d'extension du GSM
- 2,1 GHz bande UMTS
- Pour la 4G, en plus :
  - 2,6 GHz (anciennement armée)
  - 800 MHz (anciennement télévision analogique)

### Le spectre des fréquences

- Pour la 5G, en plus :
  - 3400 . 3800 MHz (3,5 GHz)
  - Bientôt 26 GHz

# Les problèmes posés par la ligne de transmission sans support physique

#### **Atténuation**

- Commune à TOUS les supports de transmission.
- Mais plus ou moins problématique ...
  - autour de 18 dB/100 m à la fréquence
     f = 800 MHz pour un câble coaxial;
  - 0,2 dB/100 km pour une fibre optique!
- Non mesurable pour une transmission hertzienne!

#### **Atténuation**

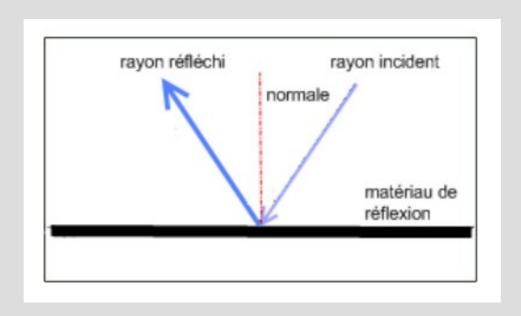
 La puissance reçue, en espace libre, s'exprime :

$$P_r(d) = P_e G_e G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

- Donc l'atténuation
  - est proportionnelle au carré de la distance (en LOS : Line Of Sight) ;
  - augmente avec la fréquence du signal transmis.

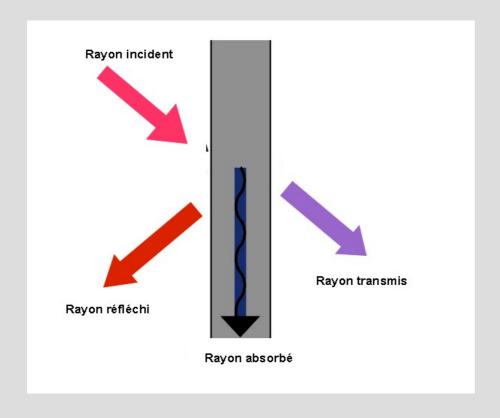
#### Réflexion d'une OEM

 C'est le brusque changement de direction de l'onde à l'interface de deux milieux.



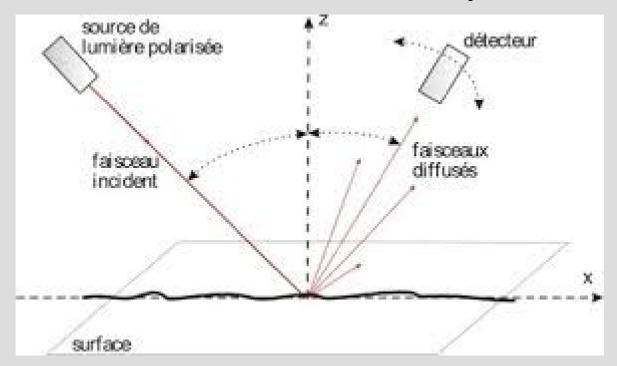
#### Réfraction d'une OEM

 Toute l'énergie de l'OEM n'est pas obligatoirement réfléchie par l'obstacle.



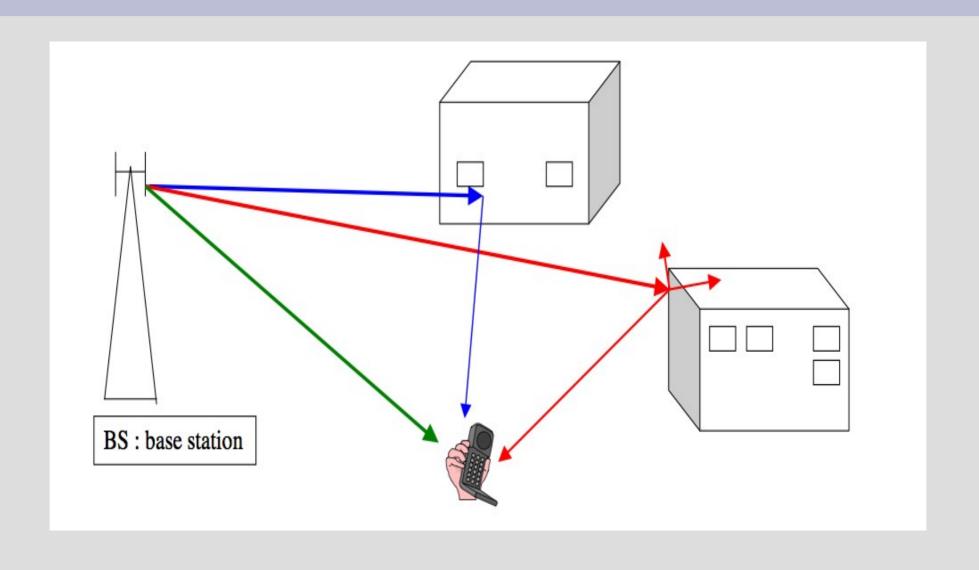
#### **Diffusion**

 Elle est générée par un ensemble d'objets de forme irrégulière (surfaces rugueuses, meubles, véhicules, arbres ...)



Elle entraîne une atténuation du signal reçu.

### Réflexion: trajets multiples

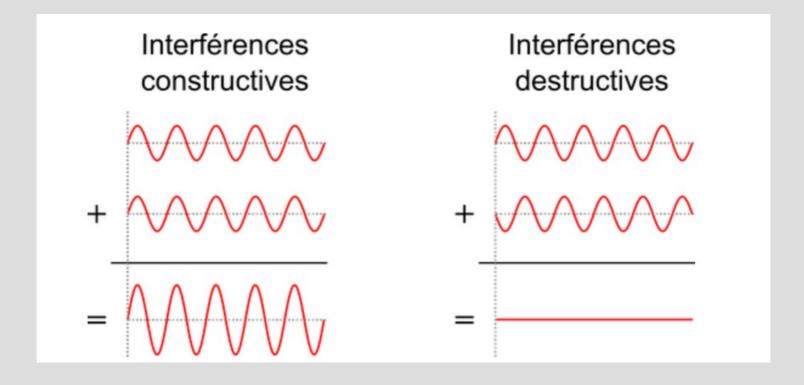


- Les trajets de propagation n'ont pas la même longueur.
- L'onde se propage à la vitesse  $C = 3.10^8 \,\text{m/s}$
- Le récepteur reçoit le signal au bout d'un temps Δt = distance parcourue / C
- Le récepteur ne verra pas les impulsions en même temps!

- Différence de temps de propagation :
  - de 3 à 6 μs en milieu urbain,
  - jusqu'à 20 μs à la campagne
  - Interférences entre symboles si la durée d'un symbole est petite devant la durée du retard ;

- Différence de temps de propagation :
  - de 3 à 6 μs en milieu urbain,
  - jusqu'à 20 μs à la campagne
  - Interférences entre symboles si la durée d'un symbole est petite devant la durée du retard ;
    - > Pour y remédier : augmenter la durée d'un symbole.

Fading de Rayleigh :



- Fading de Rayleigh :
  - résulte des variations aléatoires des phases dans le temps ;
  - évanouissement de l'amplitude tous les  $\lambda/2$ ;
  - en fonction de la fréquence du signal émis,
     l'amplitude du signal reçu sera différente.
- Le signal reçu peut varier de 40 dB autour du signal moyen;

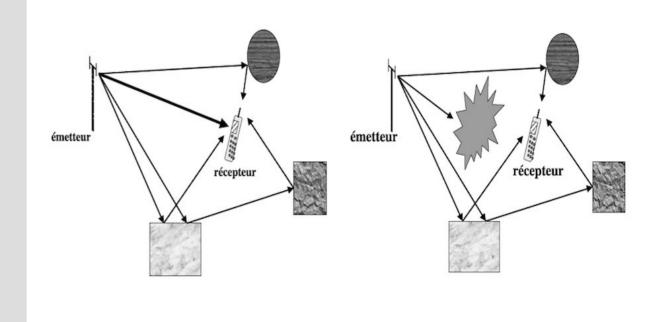
- Fading de Rayleigh :
  - résulte des variations aléatoires des phases dans le temps ;
  - évanouissement de l'amplitude tous les  $\lambda/2$ ;
  - En fonction de la fréquence du signal émis, l'amplitude du signal reçue sera différente.
- Le signal reçu peut varier de 40 dB autour du signal moyen;
  - > Pour y remédier : diversité en fréquence et diversité spatiale.

### **Trajets multiples**

Pas seulement des inconvénients!

 Ils permettent que la communication soit possible même lorsque l'émetteur et le récepteur ne sont pas en vision

directe!



# Adaptation des signaux aux supports

- Le spectre du signal doit être compris dans la bande passante du canal;
- La transmission d'un signal à spectre étroit sur un support à large bande passante provoque une sous utilisation des supports de transmission.
- Et elle peut entraîner aussi une perte quasicomplète du signal!



## Multiplexage

# Intéret

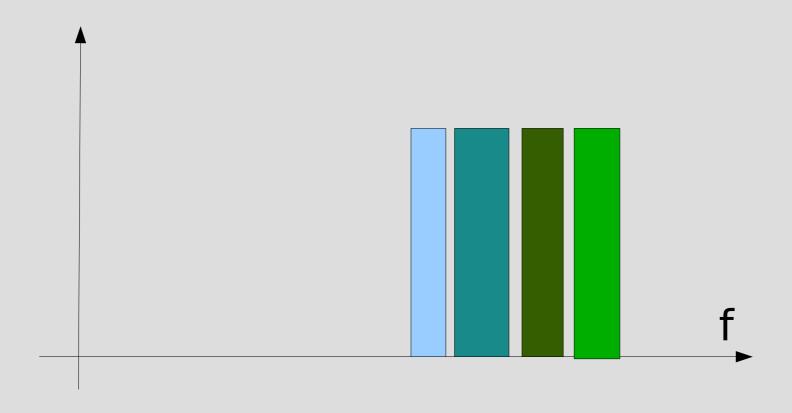
Le multiplexage permet d'augmenter le débit sur un canal en faisant circuler plusieurs signaux sur le même canal.

## 1. Introduction Différents types de multiplexage

### Multiplexage Fréquentiel

- FDMA: Frequency Division Multiple Access
- AMRF : Accès Multiple par Répartition en Fréquence
- Application : bouquet numérique de chaînes de télévision

### Multiplexage Fréquentiel



# Multiplexage par longueur d'ondes

- WDM: Wavelenght Division Multiplexing
- Sur Fibre Optique.
- Chaque « couleur » transporte un signal.
- Permet d'augmenter le débit sur une fibre optique en faisant circuler plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes sur une seule fibre

### **Multiplexage Temporel**

- TDMA: Time Division Multiple Access
- AMRT : Accès Multiple par Répartition dans le Temps
- Application: GSM, MIC 30 (téléphonie fixe)

# Principe du multiplexage temporel

0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	
1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	
1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1		

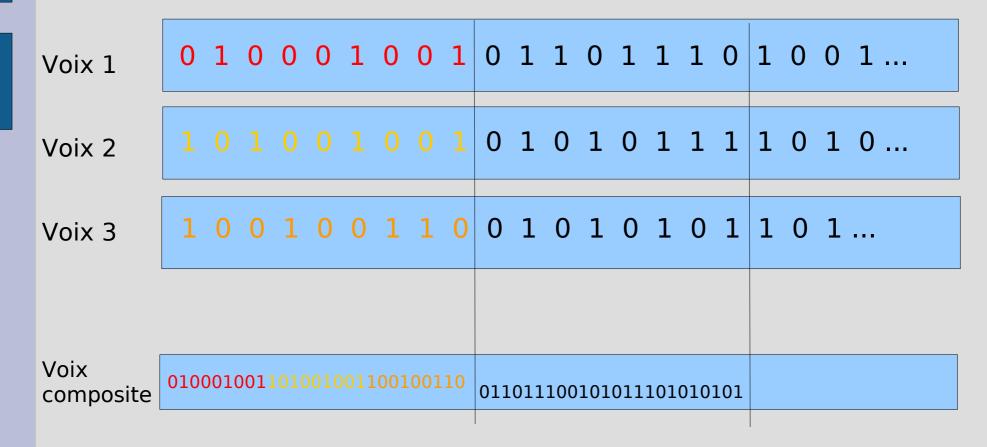
t

# Principe du multiplexage temporel

0	1	0		0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1.	
1	0	1		0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0.	••
1	0	0		1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1		
0100	010001001101001001100100110																					

t

### Principe du multiplexage temporel

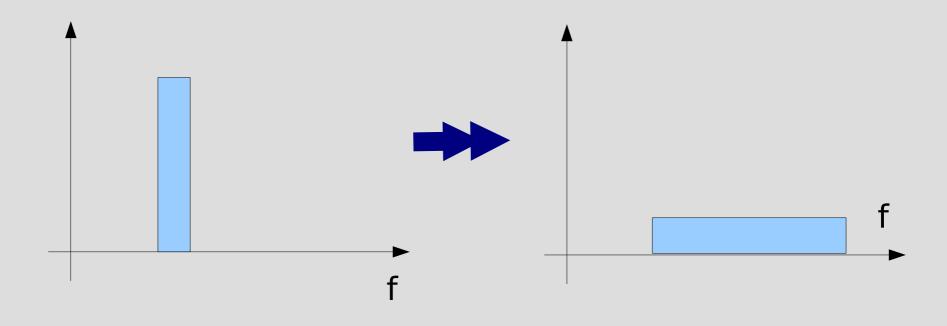


### IV

### Etalement de spectre

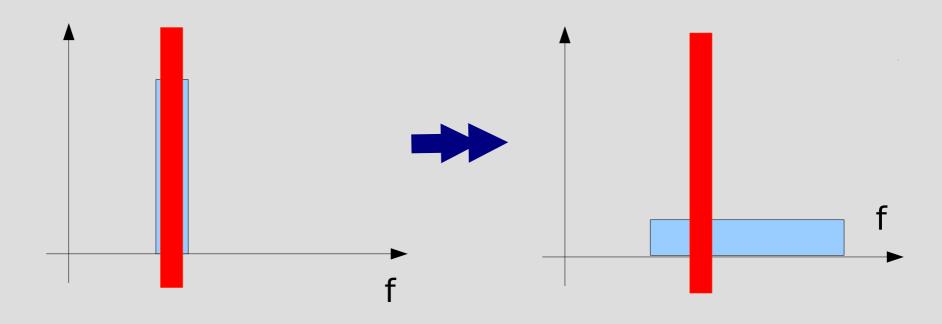
#### **Principe**

 Un signal à bande étroite avec une concentration élevée de l'information est transformé en un signal à bande large avec une basse concentration de l'information.



#### Pourquoi?

 A cause du fading de Rayleigh, le signal reçu, à une certaine fréquence, peut être d'amplitude très faible voire nulle.



#### Pourquoi?

- Seule une petite partie du signal est perdue ;
- On pourra reconstituer le message à partir de la « grande » partie récupérée.

#### Deux types d'étalement de spectre

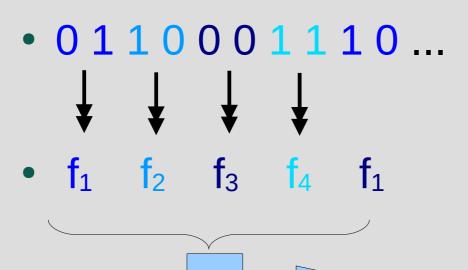
- Étalement par multiplication de fréquence
  - OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
- Étalement par séquence directe
  - CDMA (Code Division Multiple Access)

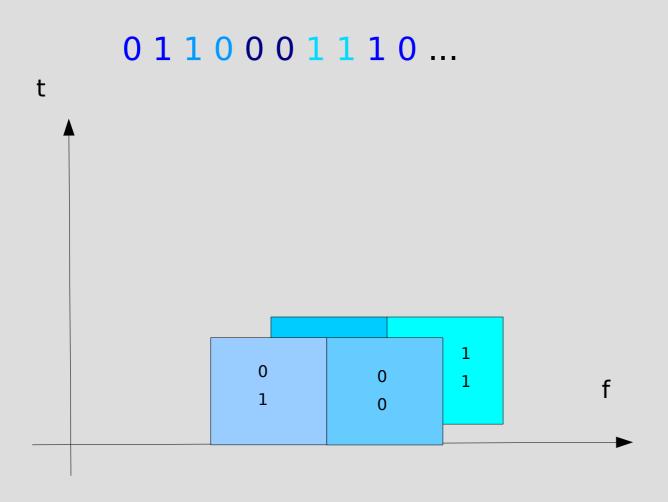
#### 1. OFDM

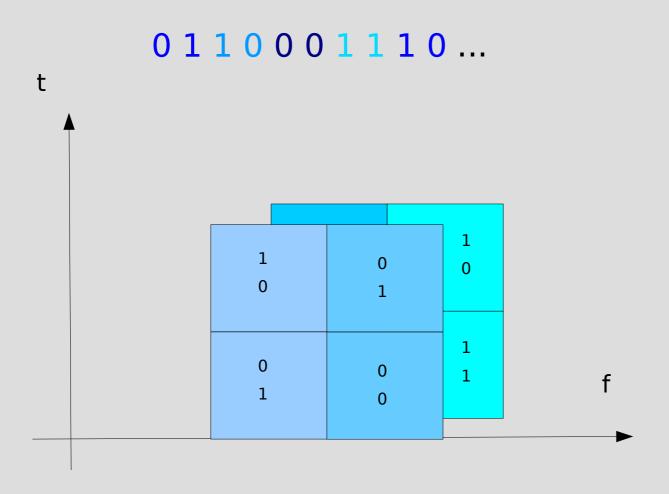
- Transmettre simultanément plusieurs symboles en parallèle sur différentes porteuses.
- Application :
  - radiodiffusion numérique : DAB (Digital Audio Broadcasting) et DVBT (Digital Video Broadcasting Terrestrial)
  - Wireless LAN (IEEE 802.11), Wimax (IEEE 802.16)
  - Téléphonie mobile 4G (LTE), 5G

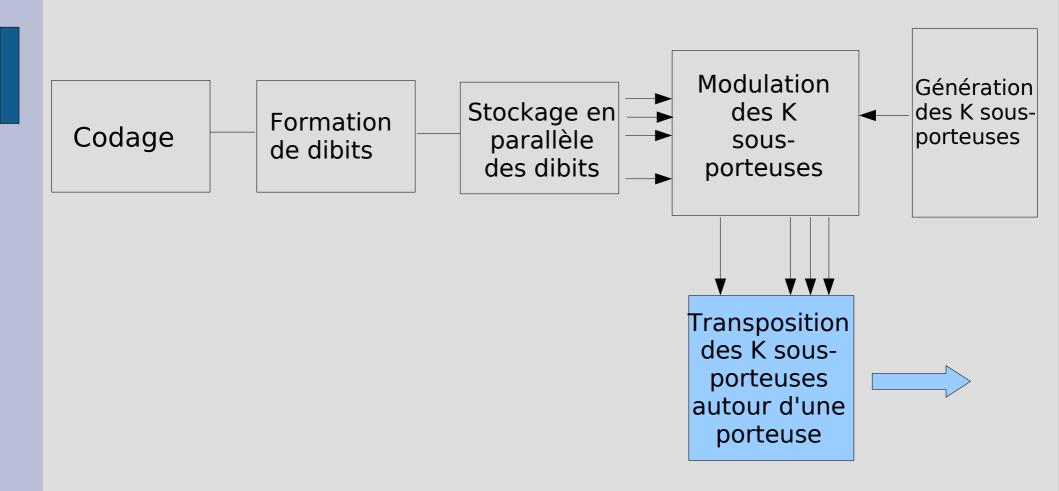
### Principe de l'OFDM Exemple

- OFDM avec une modulation QPSK :
- Les bits sont regroupés par paquets, chaque paquet est modulé avec une porteuse différente, on envoie la somme de chacun de ces signaux.







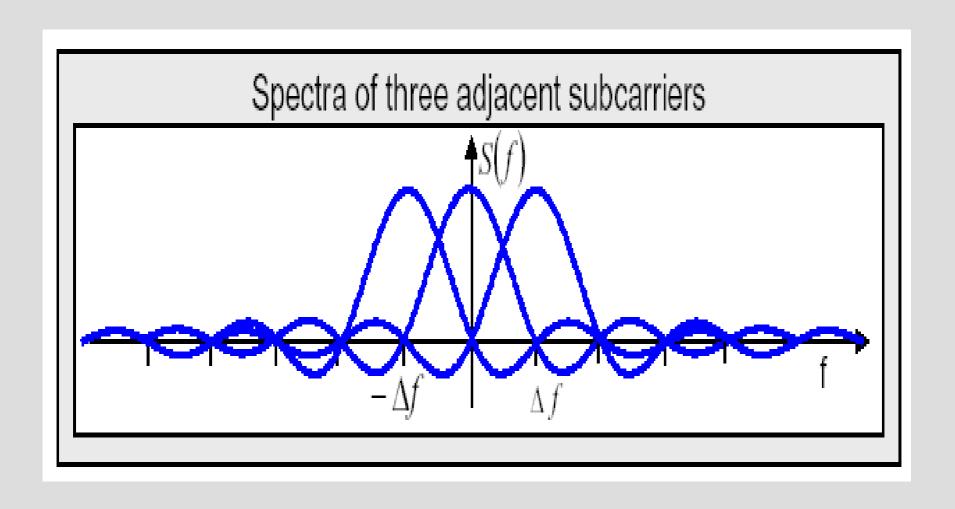


#### Fréquences orthogonales

• Le spectre du signal modulé s'annule pour  $f = f_P \pm k / T_U = f_P \pm k R$ 

• 
$$\Delta f = 1 / T_U = R$$

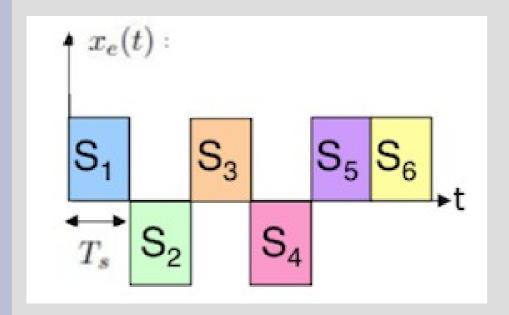
#### Spectre du signal OFDM

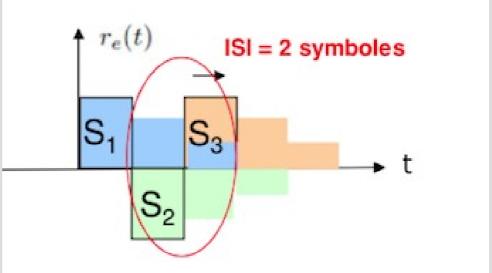


#### Intérêt de l'OFDM

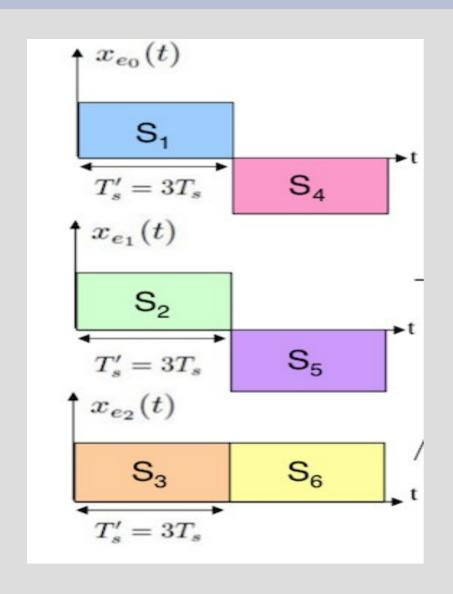
- Le débit pour chaque porteuse diminue ;
- La durée du symbole devient grande devant la différence de temps de propagation entre tous les chemins;
- Les IES sont largement diminués.

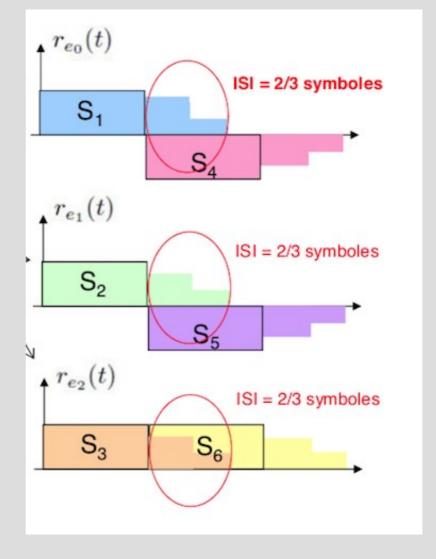
### Intérêt de l'OFDM Diminution des IES





### Intérêt de l'OFDM Diminution des IES

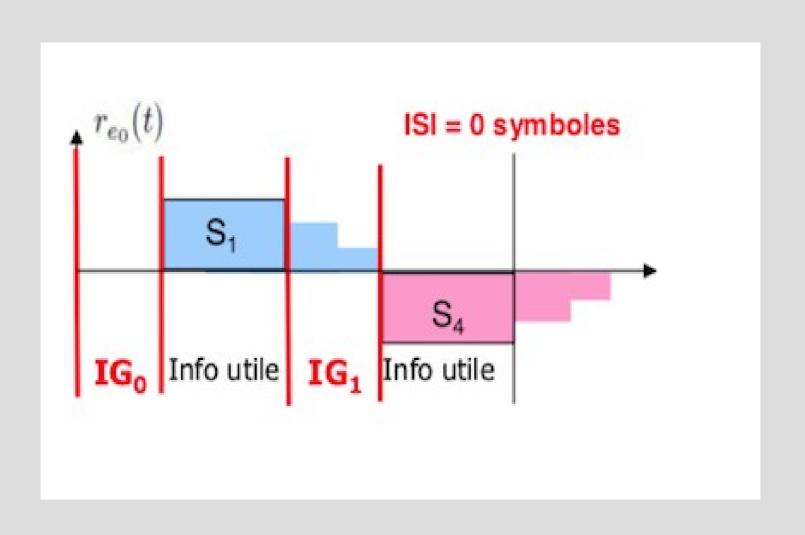


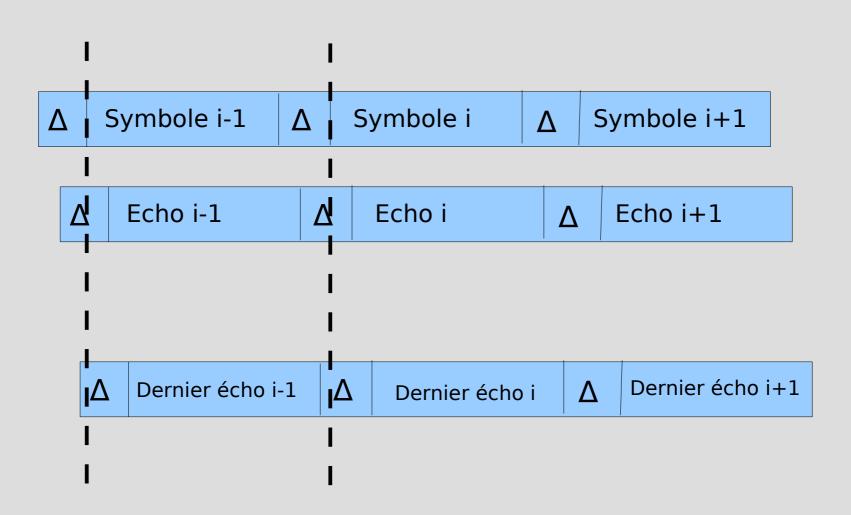


#### Intérêt de l'OFDM

 On rajoute éventuellement un Intervalle de Garde, il doit être plus grand que le plus grand des retards.







Mais alors le débit diminue !

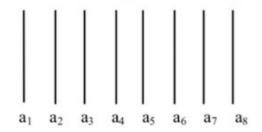
• Avant  $D = qN/T_{U}$ 

• Après  $D = qN / (T_u + \Delta)$ 

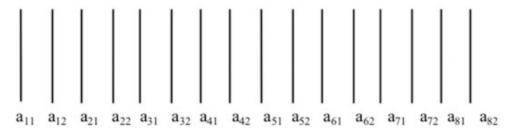
#### Entrelacement fréquentiel

- Entrelaceur : table qui fait correspondre à chaque bit une position sur une porteuse donnée.
- Sélectivité en fréquence : le signal porté par une porteuse risque d'être plus dégradé que le signal porté par une deuxième porteuse.

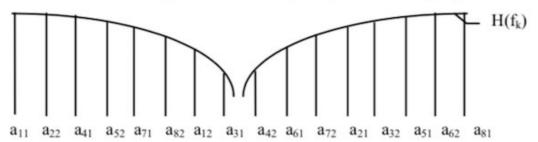
#### Entrelacement fréquentiel



Codage convolutionnel de rendement ½ : chaque donnée indicée i produit 2 données indicées i et i2.



Entrelacement très simple : les indices 3i, 3i+1, 3i+2 sont regroupés

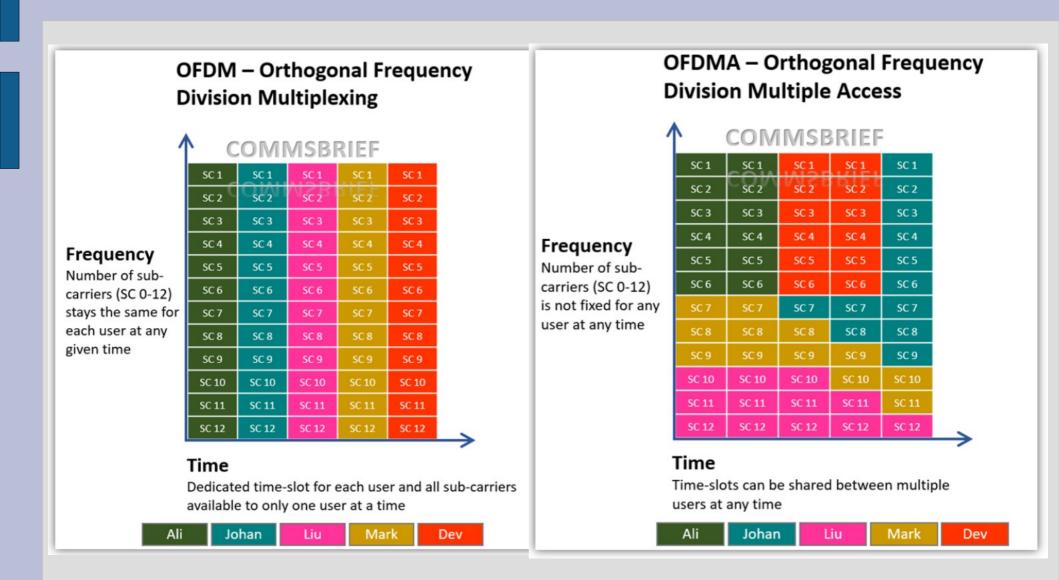


Dans cet exemple, a<sub>31</sub> et a<sub>42</sub> sont très affaiblis, mais peuvent être retrouvés au décodage du code convolutif grâce a<sub>32</sub> et a<sub>41</sub> qui sont dans une zone d'amplifacation

#### **Amélioration: OFDMA**

- Même principe que l'OFDM mais avec accès multiple.
- En LTE (Long Term Evolution) avec 1200 porteuses.
  - Durée IG de 4,7 μs pour des petites cellules, jusqu'à 16,6 μs.
  - Débit de données 3 à 4 fois plus grand qu'avec l'UMTS; du coup, on peut utiliser des codes correcteurs d'erreurs plus performants.

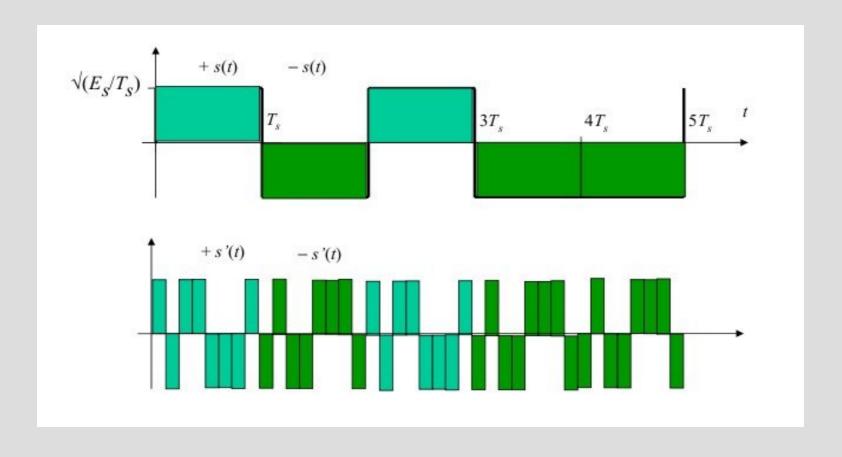
#### **Amélioration: OFDMA**



#### 2. CDMA

#### Principe du CDMA

 Chaque bit d'information est remplacé par une série de chips.



#### Intérêts du CDMA (1)

• Si la série comporte 10 chips, le débit est multiplié par 10 ; l'occupation spectrale est aussi multipliée par 10 !

#### Intérêts du CDMA (2)

 En utilisant des codes orthogonaux, on peut transmettre en même temps des signaux différents.



#### Exemples de codes

• Code 1:

$$-$$
 +1 +1 +1 +1

• Code 2:

$$-$$
 +1 -1 +1 -1

• Code 3:

$$-$$
 + 1 +1 -1 -1

• Code 4:

$$-$$
 +1 -1 -1 +1

#### Intérêts du CDMA (2)

- En utilisant des codes orthogonaux, on peut transmettre en même temps des signaux différents.
- En réception, on multiplie le signal reçu par le code : tous les autres signaux (y compris les interférences) sont étalés et donc sont assimilables à du bruit.

#### Intérêts du CDMA (3)

- Lutte contre les brouilleurs ;
- Camoufle l'information :
  - Interception délicate,
  - Décodage difficile si le code n'est pas connu.

V

### Principe du MIMO

#### **Définitions**

- MIMO : Multiple Input Multiple Output
- SISO: Single Input Single Output
- SIMO (DISO), MISO.

#### **Principe**

- C'est la réponse au problème des trajets multiples (fading de Rayleigh)
- Utilisation de plusieurs antennes au niveau du point d'accès ; on commute alors sur l'antenne qui procure le signal le plus élevé.
- Amélioration : MRC (Maximum Ratio Combining)

#### Longueur d'ondes

•  $\lambda = C / f$ 

- f = 900 MHz;  $\lambda = 33 \text{ cm}$
- f = 1800 MHz;  $\lambda = 16.6 \text{ cm}$
- f = 2100 MHz;  $\lambda = 14,3 \text{ cm}$
- f = 2.4 GHz;  $\lambda = 12.5 \text{ cm}$

### Différentes techniques à l'émission

- Diversité spatiale : on transmet simultanément un même message sur différentes antennes à l'émission.
- Multiplexage spatial : chaque message est découpé en sous-messages, on transmet simultanément les différents sous-messages sur chacune des antennes.
- Un mix des 2!

# Comment encore améliorer la transmission?

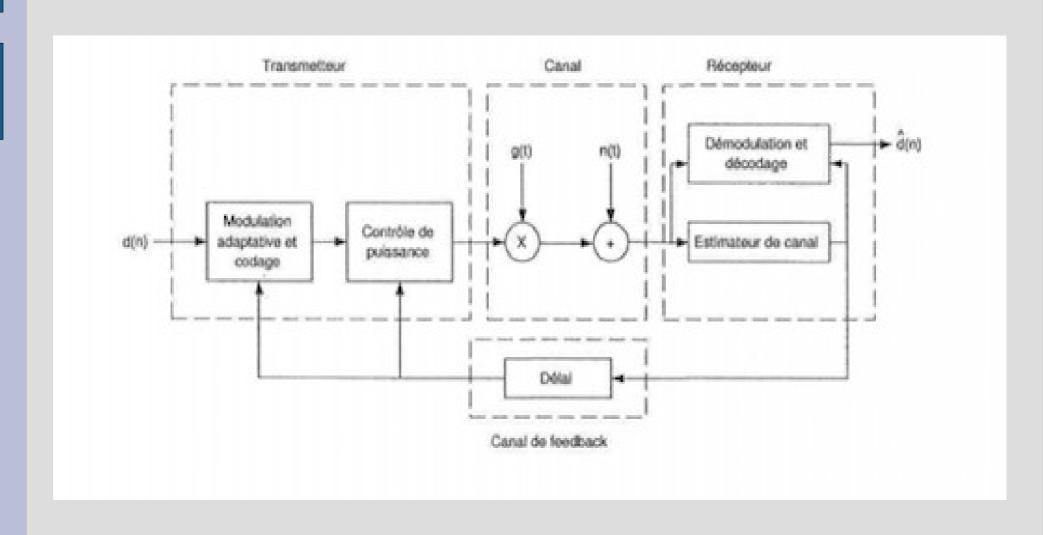
#### **Modulation Adaptive**

- AMC : Adaptive Modulation Codage
- Elle consiste à faire varier de manière dynamique certains paramètres d'un lien de communication afin d'atteindre un débit de transmission maximal.

### AMC, les paramètres modifiables

- La modulation utilisée (valence);
- Le type et les différents paramètres du code correcteur d'erreurs;
- La durée des symboles ;
- La puissance d'émission.

# Schéma d'un lien de communication adaptatif



#### **Attention!**

Ne peut fonctionner que si le canal ne varie pas vite dans le temps, si ses paramètres sont stables dans le temps.