

## Partie 4 :

# Les systèmes réels : cas des systèmes radio

---

Stratégie : gestion optimale des ressources fréquentielles et de la puissance

### 1) Choix de la modulation

- Cas bande fréquentielle limitée (haut débit)
- Cas consommation limitée (bas débit)

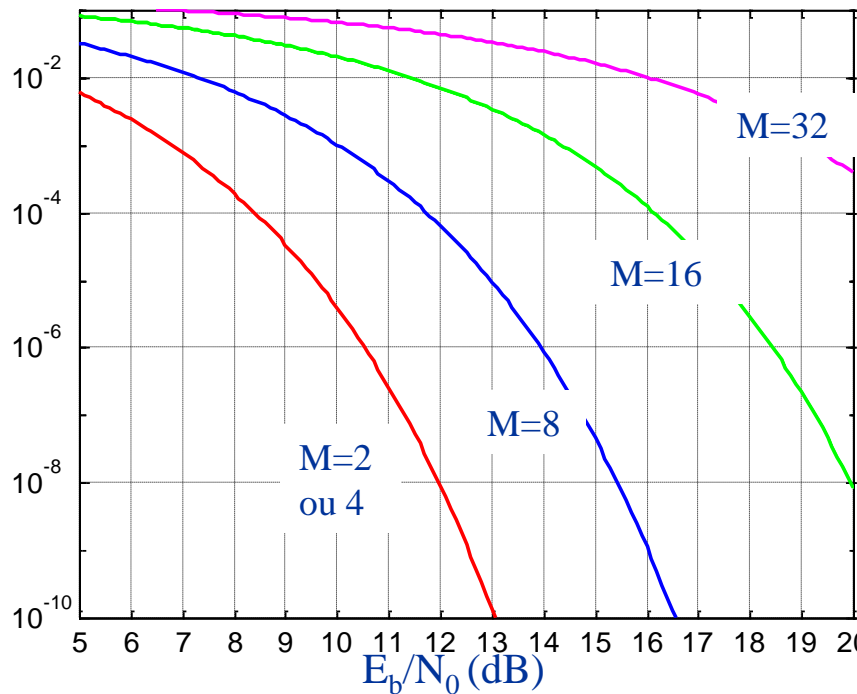
### 2) Défauts supplémentaires

## Rappel :

Intérêt d'augmenter le nombre d'états = moins d'occupation spectrale

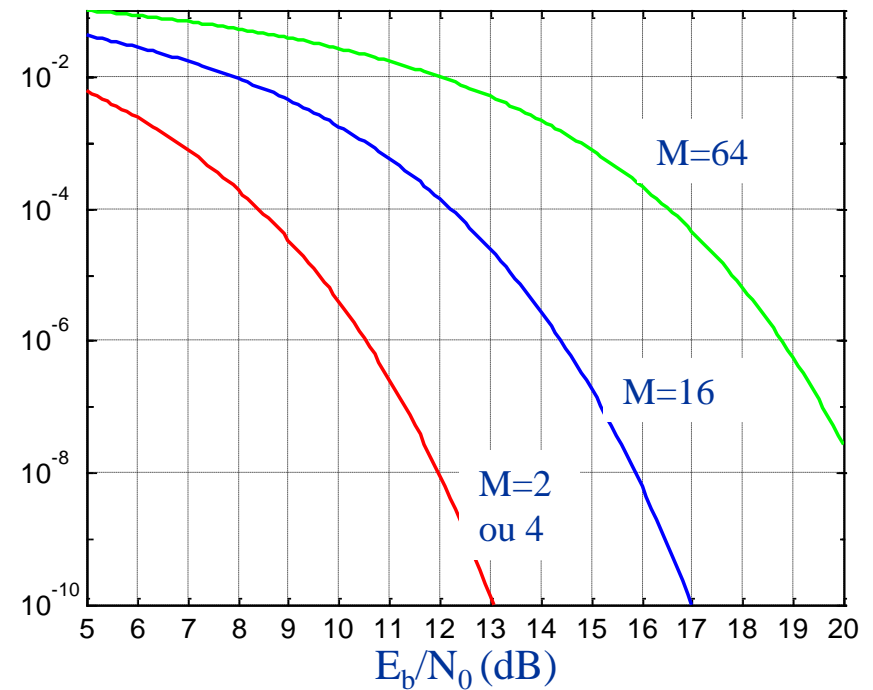
### Modulations PSK-M

$P_{\text{erreur}}$



### Modulations QAM-M

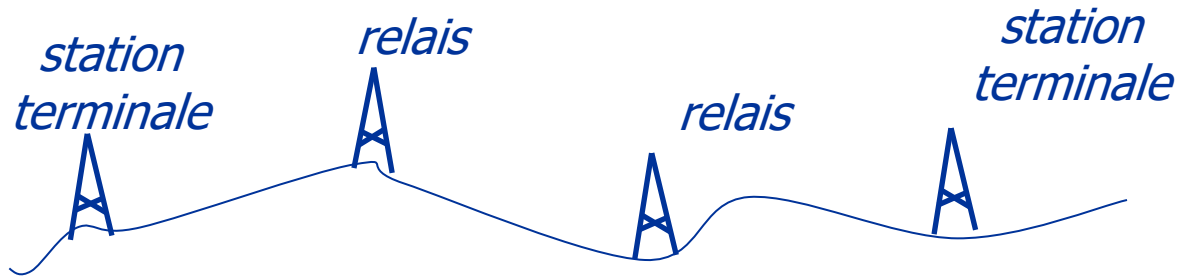
$P_{\text{erreur}}$



=> Intérêt de choisir M assez grand : PSK8 , QAM16,...QAM256 ...

### Cas des faisceaux hertziens numériques

système de transmission radioélectrique comportant, en général, des stations relais entre le point de départ du signal et son point d'arrivée, en visibilité directe



Applications : sécurisation du réseau de transport de télécommunications, liaisons vers sites isolés, interconnexion d'équipements de réseaux des opérateurs (ex : liens BTS-BSC), interconnexion de sites d'entreprises, télévision numérique

Fréquences : 2, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 13 et 15 GHz

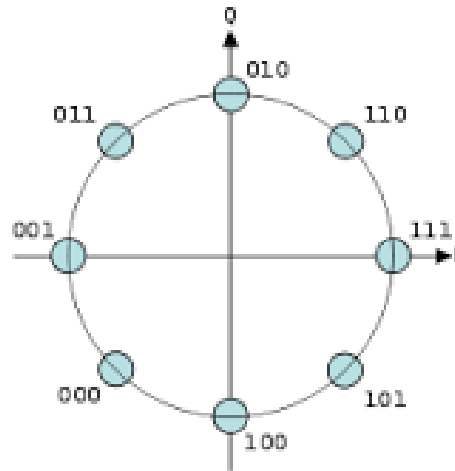
Modulations : PSK4, PSK8, QAM16, QAM64...



## Cas des systèmes cellulaires 'haut' débit (pour données)

### **2.5 G : Edge**

Modulation PSK-8



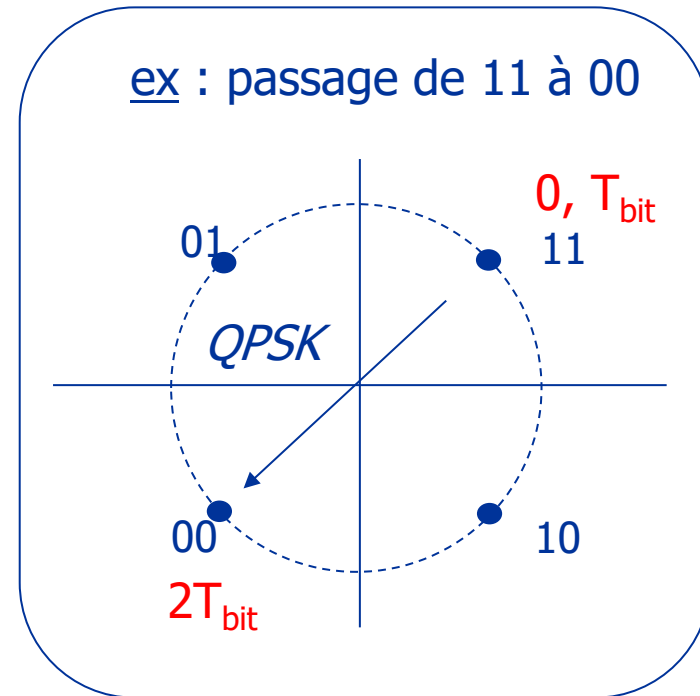
**PSK 8 constellation**

### **3G / 4G**

Modulations complexes  
basées sur QAM-M

### Modulation QPSK

- intérêt de la modulation QPSK : meilleur rapport puissance/bande occupée (courbes M=2 et M=4 confondues)
- Problème QPSK : sauts de phase de  $\pi \Rightarrow$  passage par amplitude nulle

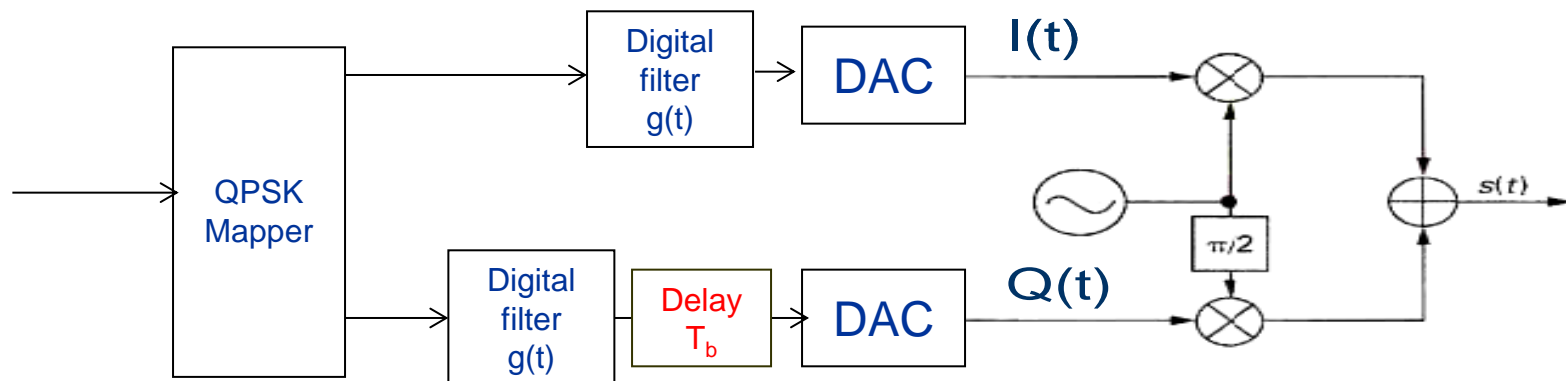
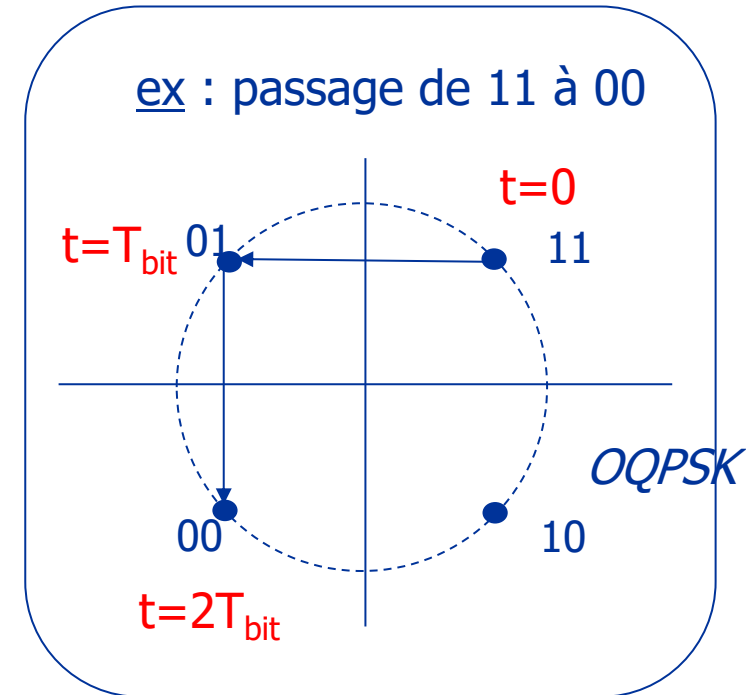


## Modulation OQPSK

- Offset QPSK

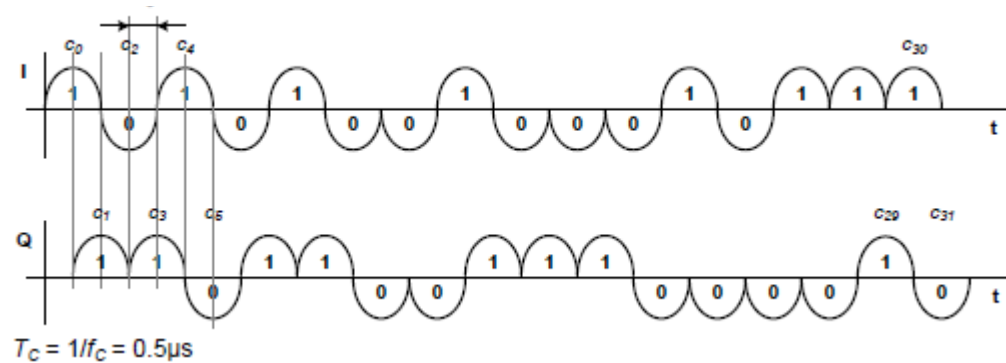
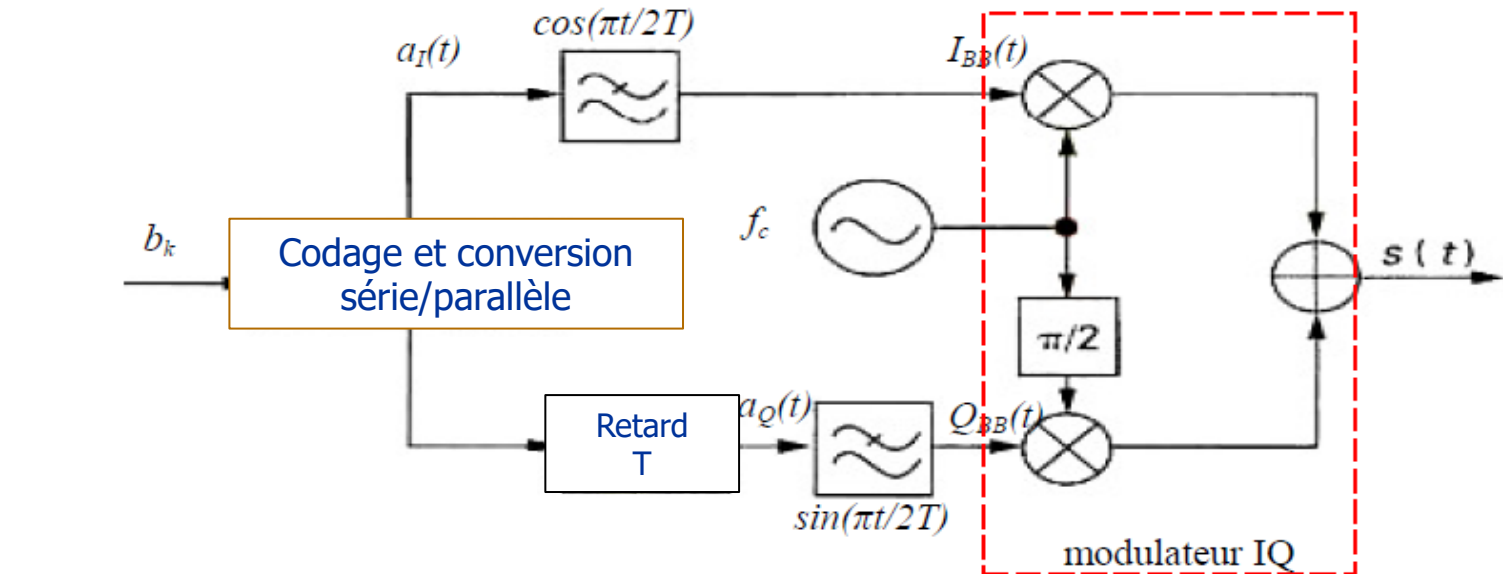
= modulation QPSK avec les deux trains binaires en phase et en quadrature décalés de  $T_{\text{bit}}$

=> limitation des sauts de phase possibles de  $\pi$  à  $\pi/2$

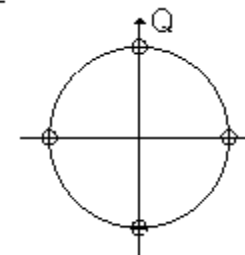


## Modulation O-QPSK avec mise en forme sinusoïdale

3



Modulation à enveloppe constante



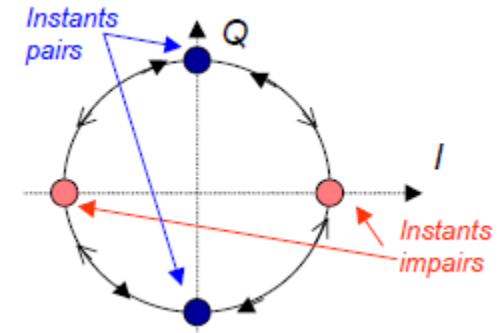
## Modulation MSK

- variation linéaire de la phase pendant  $T_{\text{bit}}$  lors d'une transition :

avec  $\theta \in \{\pi/4, 3\pi/4, -\pi/4, -3\pi/4\}$

$$\begin{cases} \text{pour } kT \leq t < (k+1)T, \\ s(t) = \cos(2\pi f_c t + \phi(t)) \text{ où } \phi(t) = b_k \frac{\pi t}{2T} + \phi_H \end{cases}$$

$b_k = \pm 1$ ,  $\phi_H$  assure la continuité de la phase



- = modulation de fréquence avec  $\Delta f = 1/2T_{\text{bit}}$ , indice de modulation 0,5

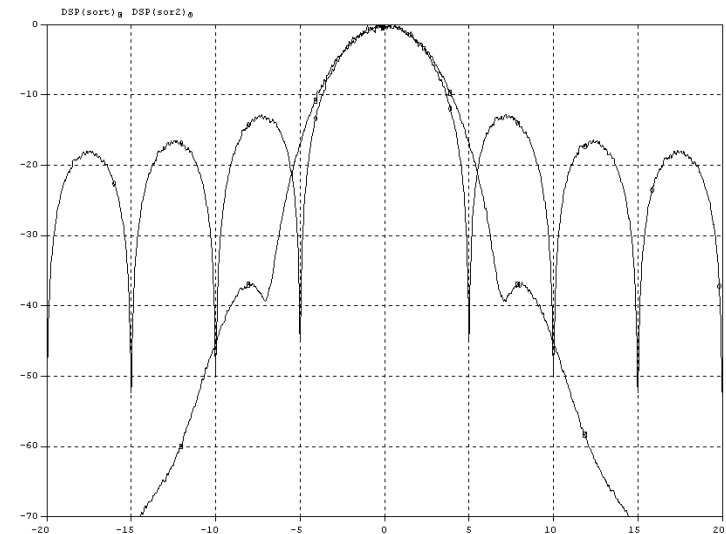
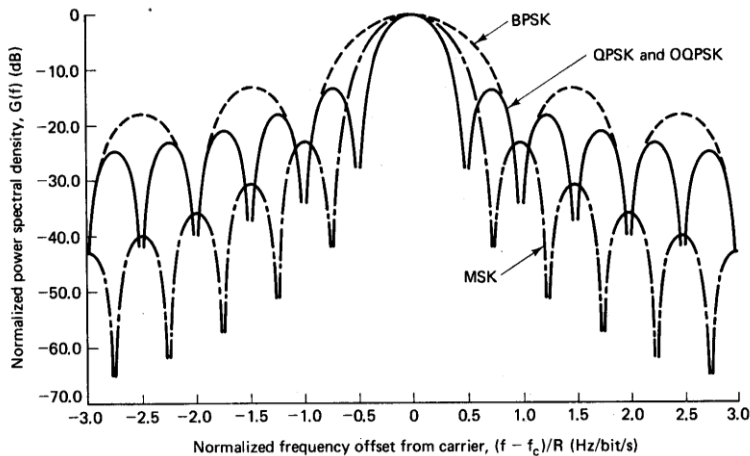
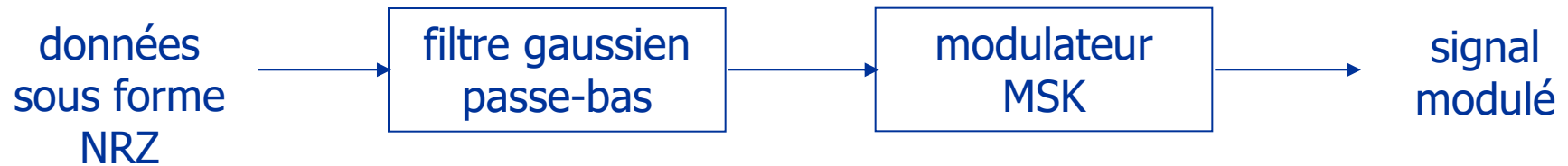
'Minimum shift keying'



## Modulation GMSK

= Gaussian-filtered Minimum Shift Keying

Principe :



### Applications des modulations OQPSK, MSK et GMSK

- Satellite communications: OQPSK



- Zigbee : réseau sans fil courte portée, basse consommation (ex application : domotique) MSK à 1 Msymb/s



- Bluetooth: GFSK, indice entre 0.28 et 0.35



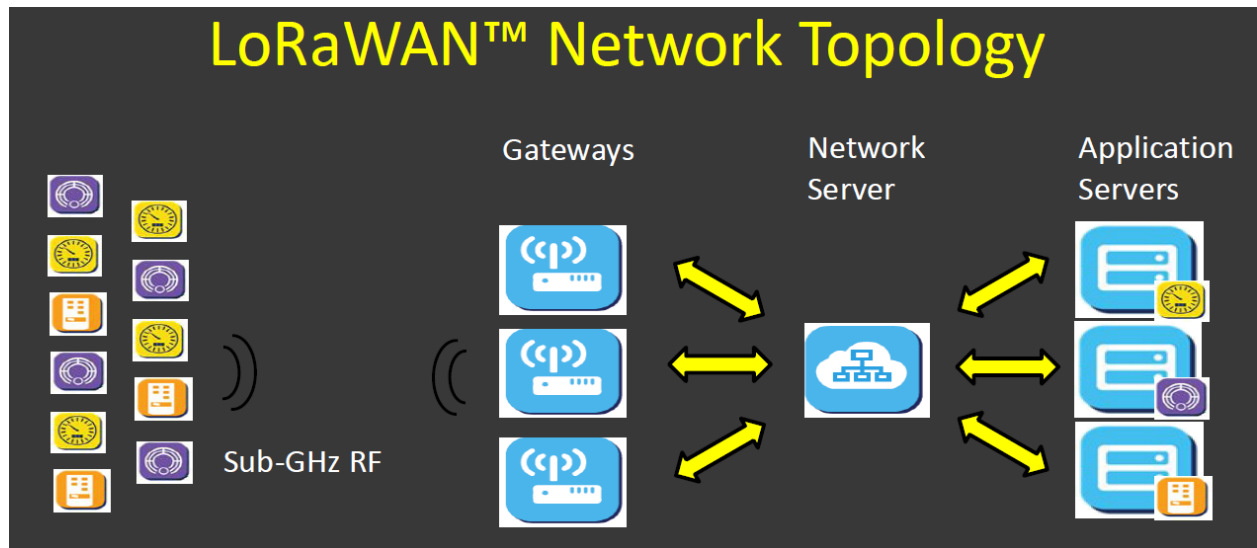
- DECT (Digital Enhanced Cordless Telephone) : GMSK



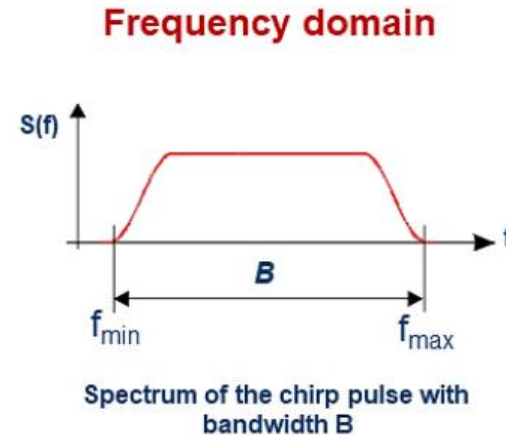
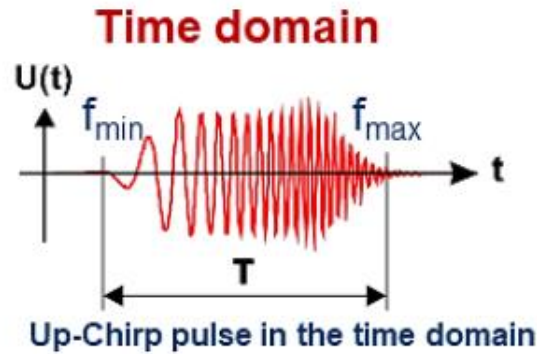
- GSM (Global System for Mobile communications) : GMSK

## Cas LoRa : réseau sans fil longue portée

---



# Modulation LoRa : CSS Chirp Spread Spectrum

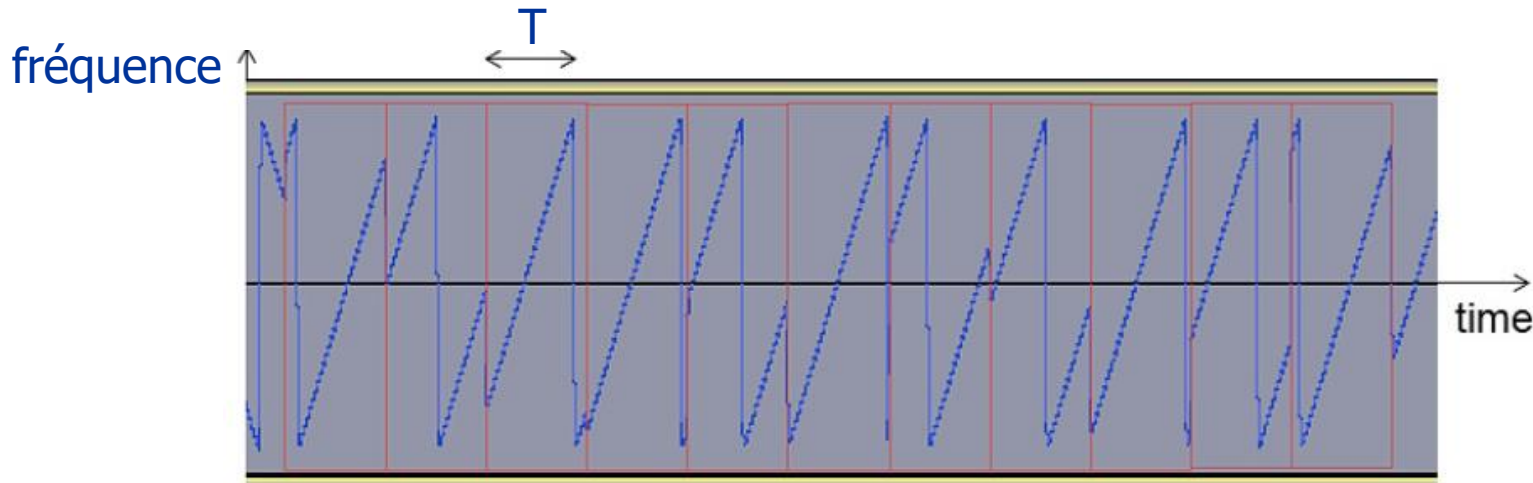


Chirp de durée  $T$  : fréquence variant linéairement dans bande  $B$  de  $f_{\min}$  à  $f_{\max}$

Un chirp transporte  $SF$  bits :  $D_b = SF/T$ ,  $2^{SF}$  symboles possibles

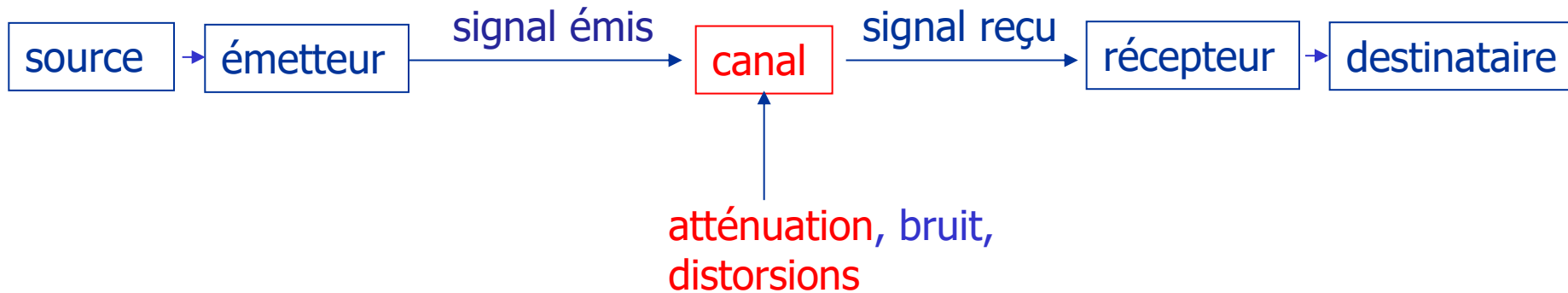
Information codée par le décalage de l'origine du balayage de fréquence (modulo  $B$ )

Relation :  $B \times T = 2^{SF} \Rightarrow B = (D_b \times 2^{SF}) / SF$  étalement de spectre



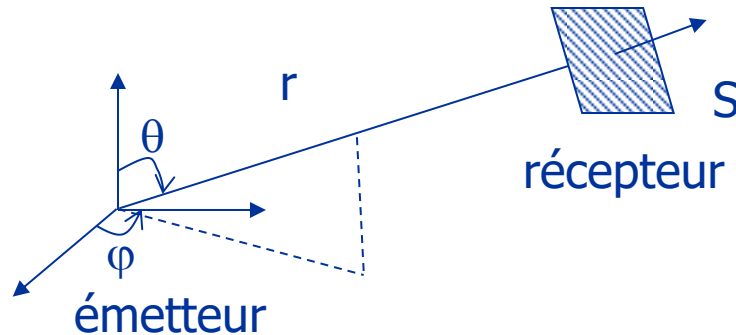
### Effets du canal de transmission réel

---



# Atténuation du canal radio en espace libre : rôle des antennes

---



puissance reçue à la distance  $r$  :

$P$  : puissance émise

$S$  : surface de captation ou surface effective

$$P_R = \frac{P}{4\pi r^2} g_E(\theta, \phi) \times S$$

puissance / unité de surface  
pour une source isotrope

gain de l'antenne  
émettrice dans la direction  
considérée



## Bilan de liaison radio en espace libre

gain de l'antenne réceptrice :  $g_R = \frac{4\pi}{\lambda^2} S$

$$P_R = g_E \cdot g_R \cdot P \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

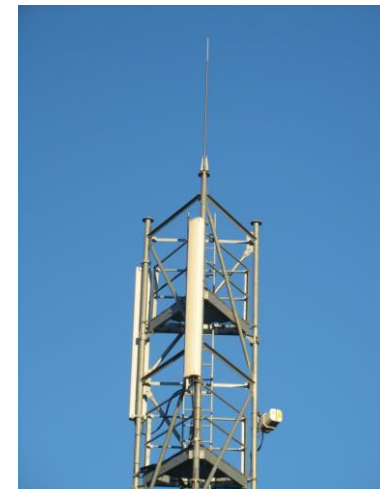
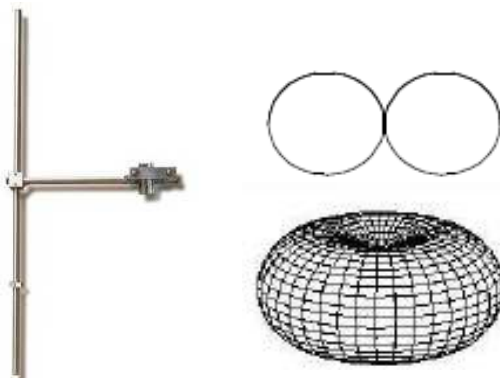
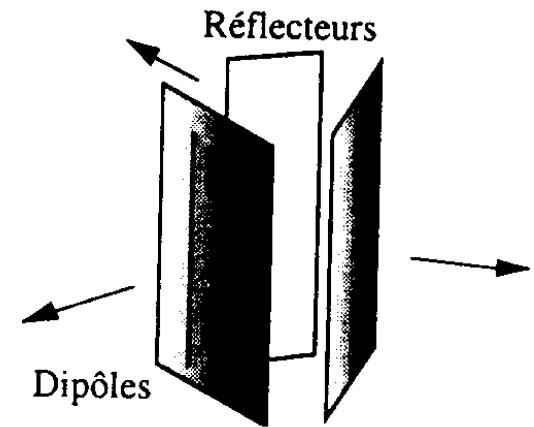
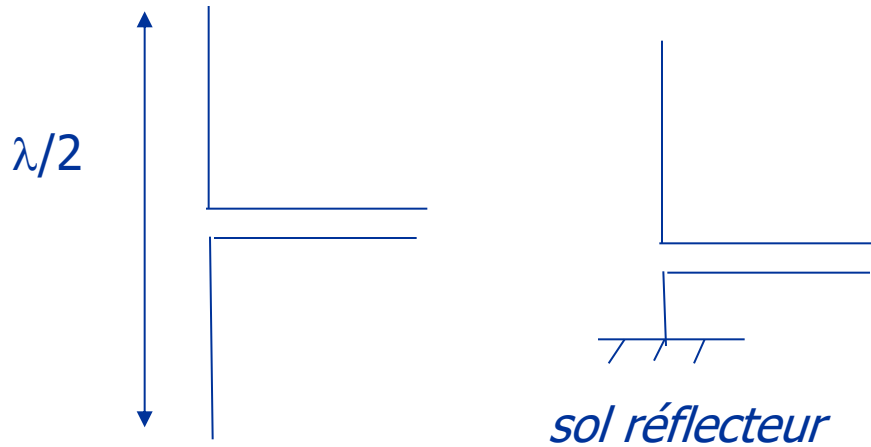
Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) :  $g_E \cdot P$

$$\left( \frac{P_R}{P} \right)_{dB} = g_{E_{dB}} + g_{R_{dB}} + 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)$$

← affaiblissement en espace libre entre 2 antennes isotropes

*=> Les antennes 'concentrent' l'énergie dans la direction voulue : elles augmentent la puissance reçue*

- Antennes dipôle, omindirectionnelles ou à panneau réflecteur : *application pour les mobiles*



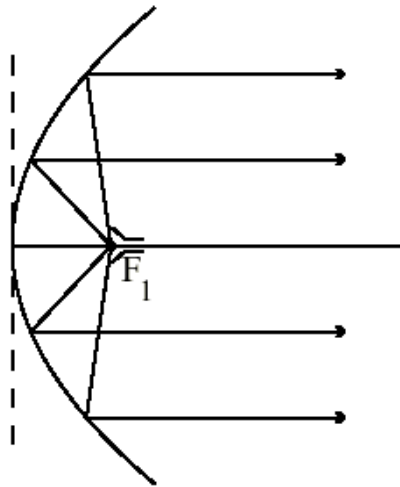


# Types d'antennes (2)

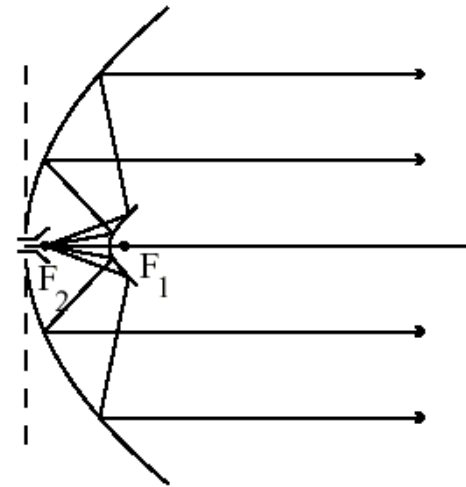
## 2) Défauts supplémentaires

Antennes directives de faisceau hertzien : à réflecteur de type parabolique

*antenne parabolique*



*antenne Cassegrain*

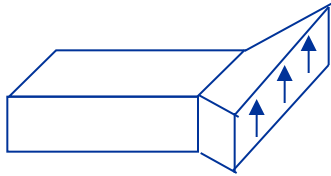


- gains d'environ 22 à 24 dB pour un diamètre égal à  $5 \lambda$ ,
- gain de 40 à 50 dB pour les faisceaux hertziens terrestres
- gain jusqu'à 70 dB pour les satellites (réflecteur de type Cassegrain)

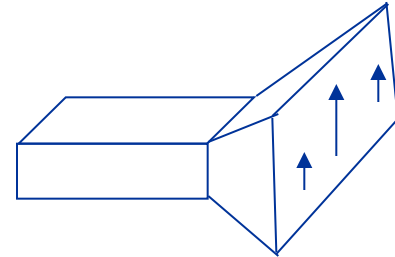
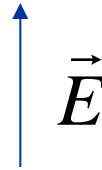
## Types d'antennes (3)

### 2) Défauts supplémentaires

- Antennes directives à cornet (pas de réflecteur) : *liaisons courtes à  $f > 10 \text{ GHz}$*

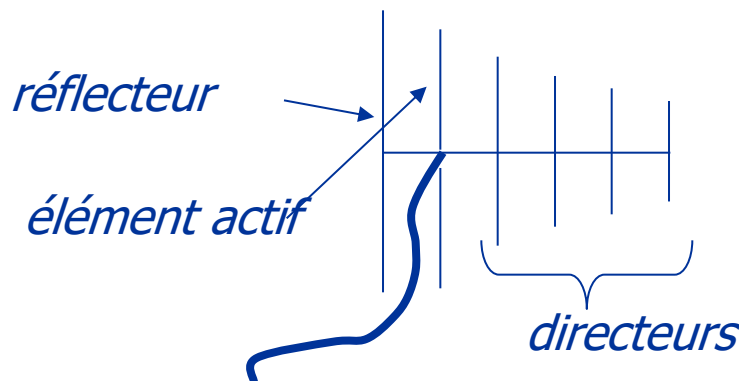


cornet sectorial



cornet pyramidal

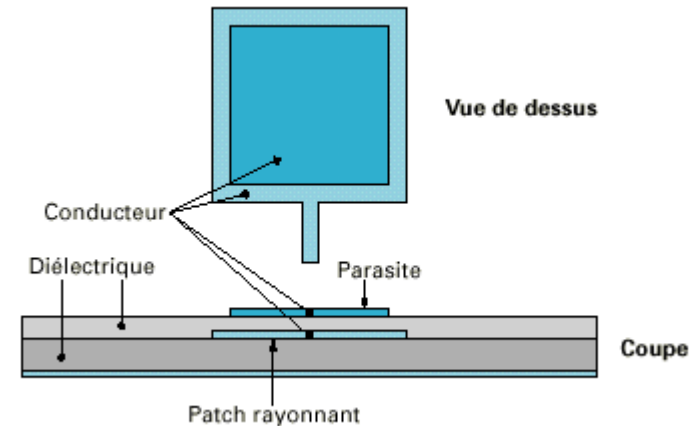
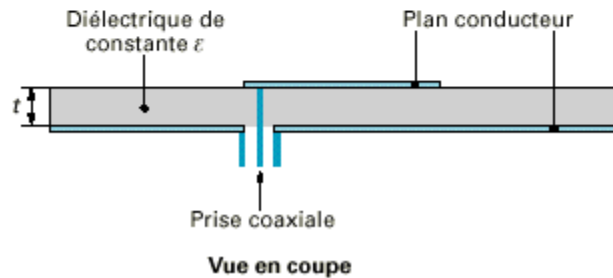
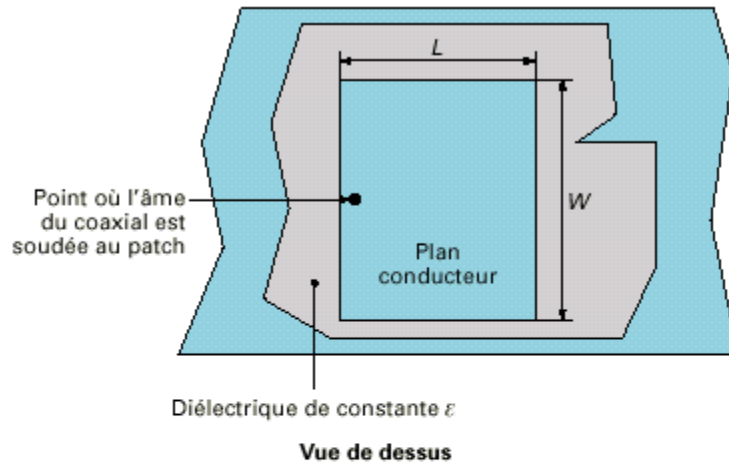
- Antennes Yagi , à multiéléments verticaux placés en parallèle et un réflecteur : *réception TV et FM*



# Types d'antennes (4)

## 2) Défauts supplémentaires

- Antennes 'patch'

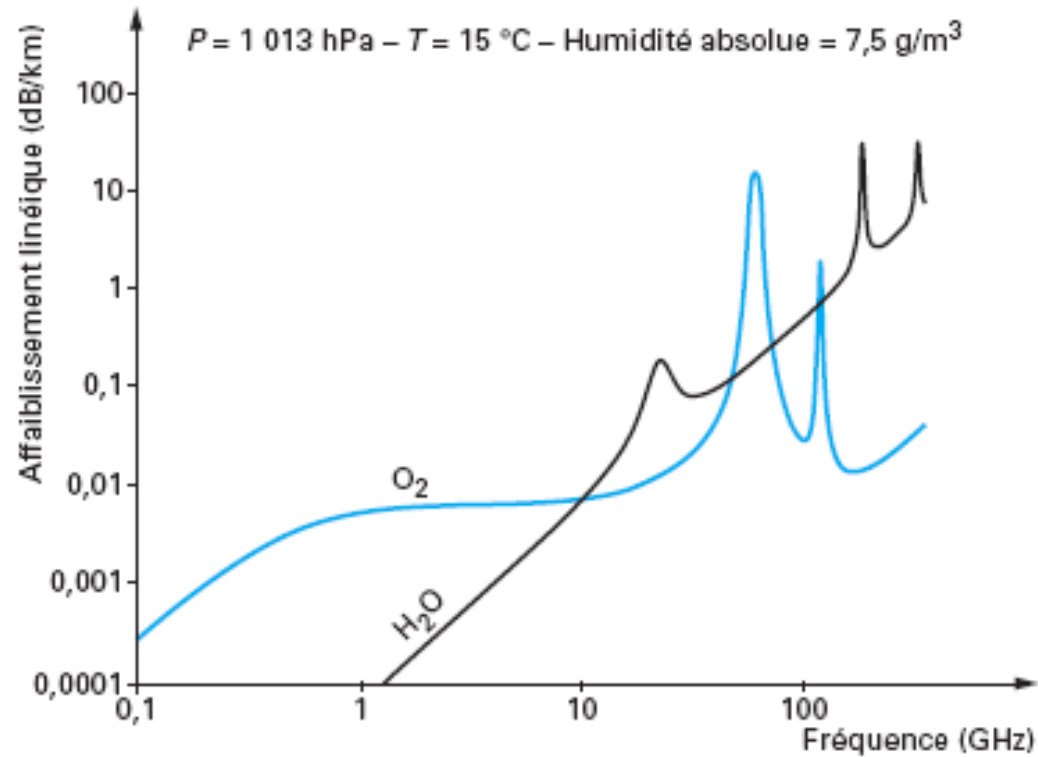


Utilisation d'un patch parasite pour augmenter la bande passante

*cf Techniques de l'ingénieur, E 3284*

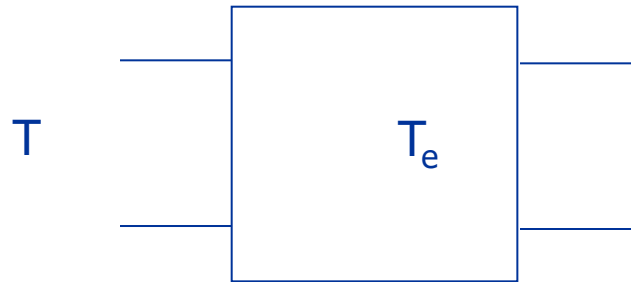
### Atténuation dans l'air

---



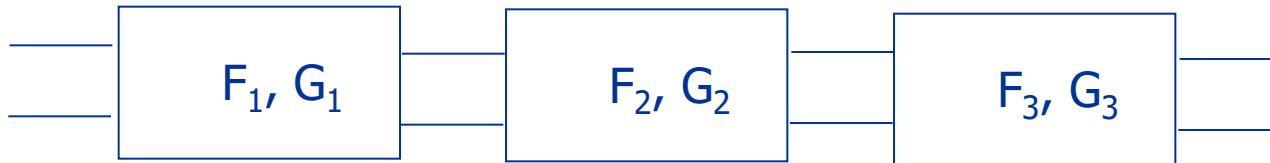
## 2) Défauts supplémentaires

### Ajout de bruit par les composants électroniques : facteur de bruit



$$F = \frac{(S / B)_e}{(S / B)_s}$$

Mise en cascade de quadripôles : formule de Friis



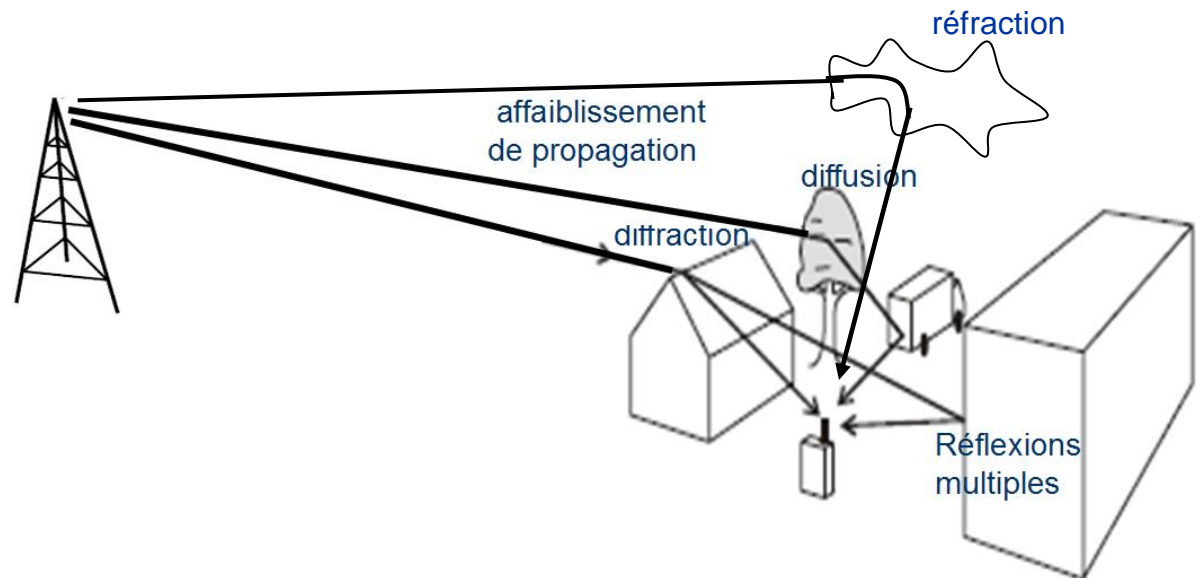
$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots$$

### Les trajets multiples

---

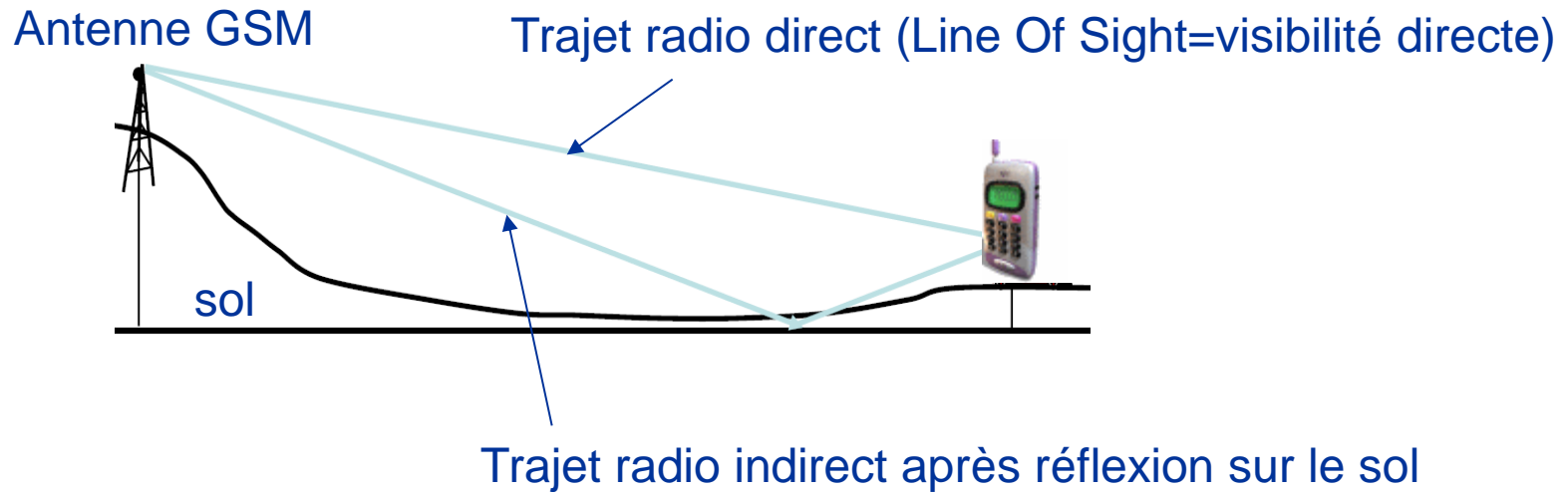
Pas un seul trajet direct : réflexions, réfraction (indice variable selon l'altitude, les perturbations atmosphériques ...), diffraction, diffusion

=> **Trajets multiples**



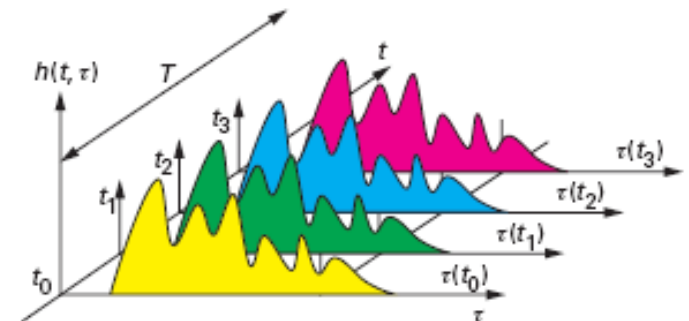
# Trajets multiples => canal sélectif en fréquence

Ex : 2 trajets

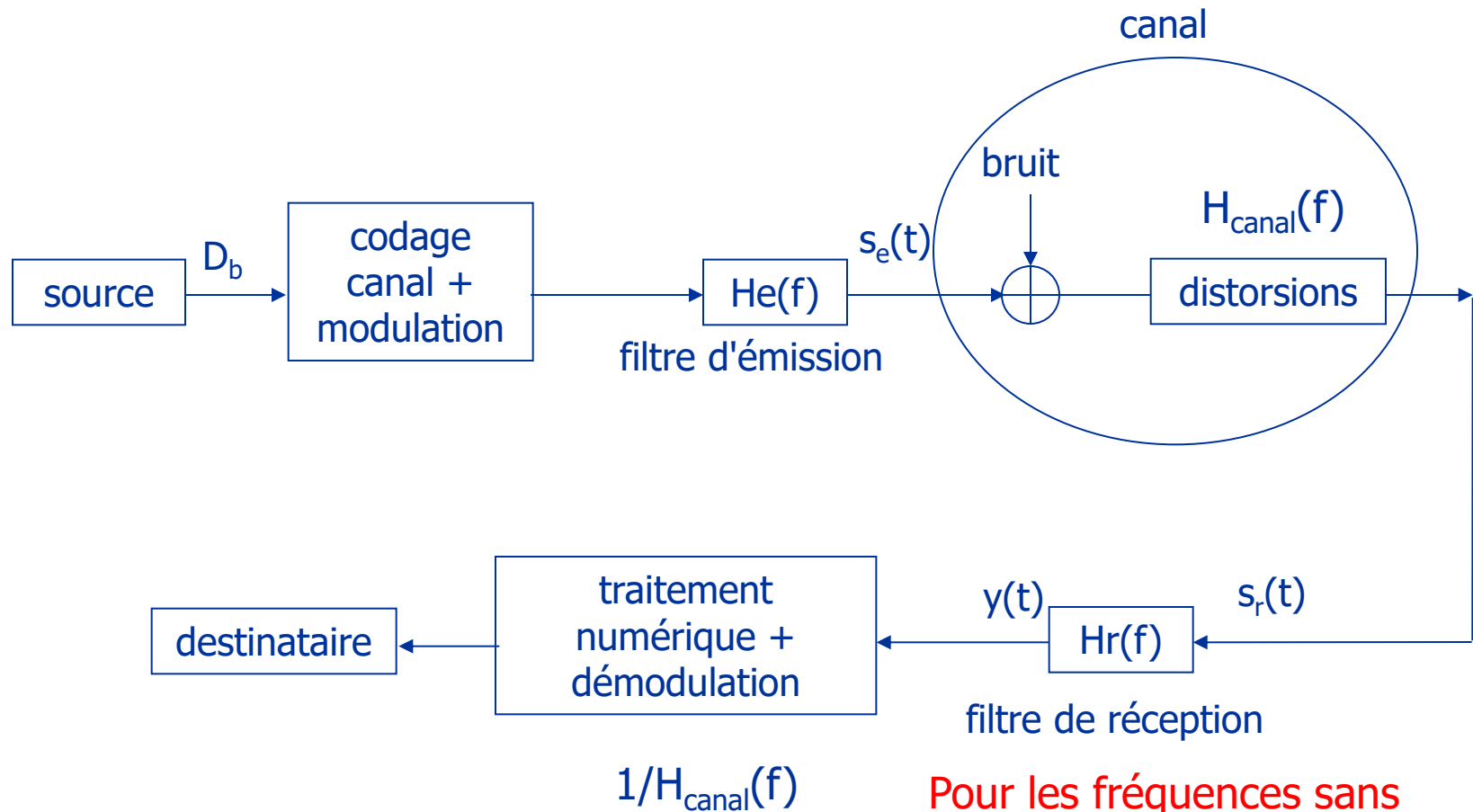


Selon lien fréquence / délai entre les 2 trajets, interférences destructives possibles !

Problème des trajets multiples : canal sélectif en fréquence, variable au cours du temps



# Techniques d'égalisation



Pour les fréquences sans évanouissement !

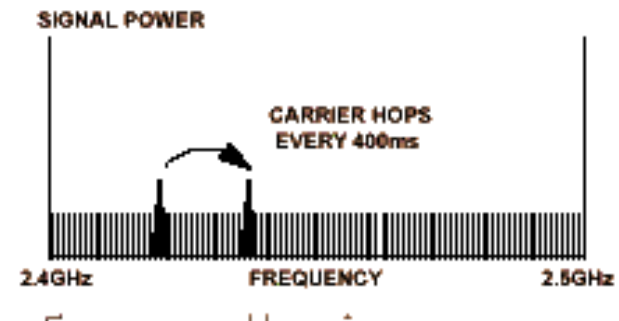
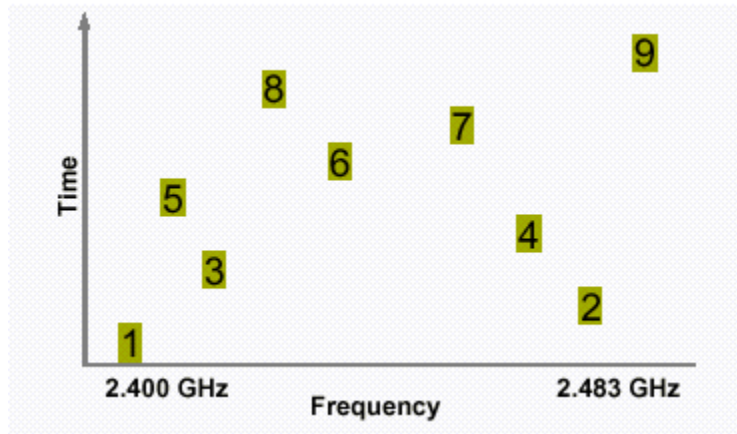
=> traitements numériques supplémentaires pour compenser les distorsions du canal, techniques adaptatives



# Etalement de spectre par saut de fréquence

---

= Frequency Hopping Spreading Spectrum



## Ex : Bluetooth

Gamme de fréquences : bande ISM 2,4 GHz

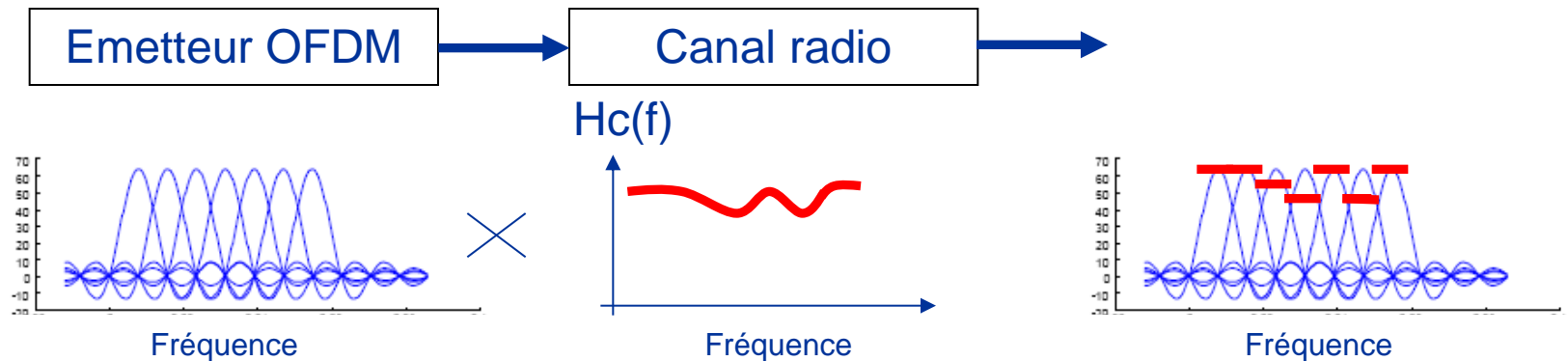
Technique : FHSS (1600 sauts/s parmi 79 canaux de 1 MHz)

# Modulation multi-porteuses : OFDM

Principe : modulation QAM multi-porteuses

Découpage du canal fréquence en petites sous-bandes

où réponse fréquentielle  $\approx$  simple coefficient complexe qui ne dépend pas de la fréquence



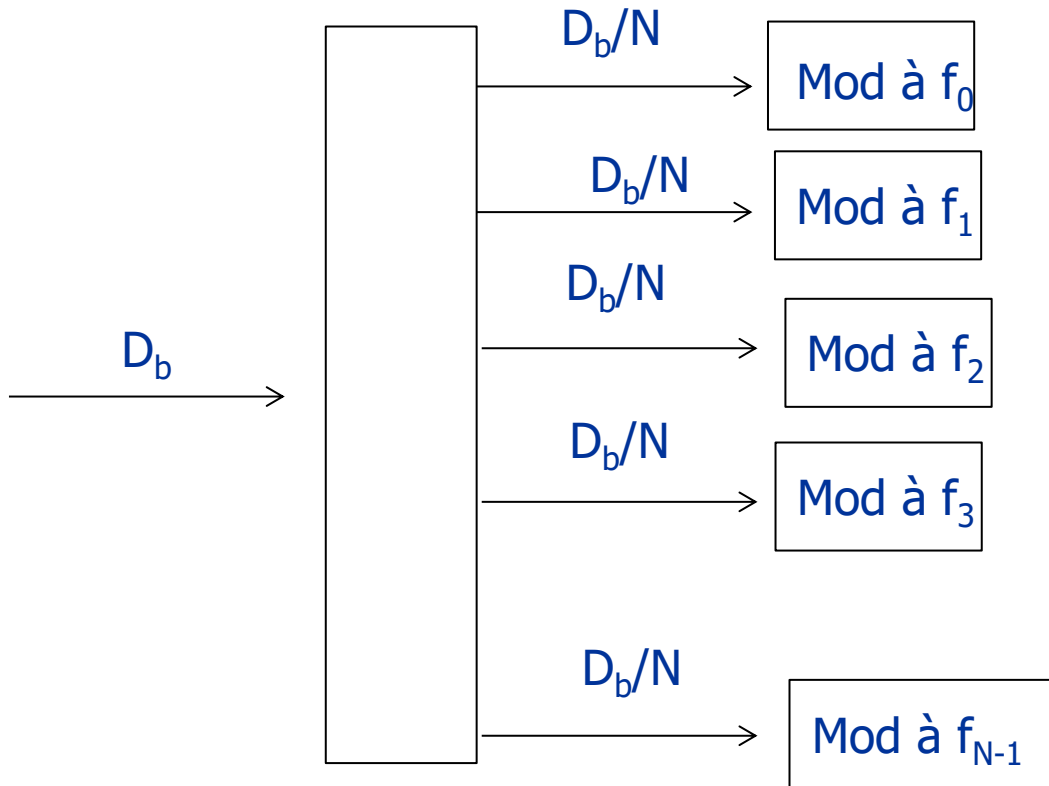
Le canal agit comme un simple coefficient pour chaque porteuse

=> facile à compenser en réception (égalisation)

Rmq : Si évanouissement, perte d'une partie des infos numériques seulement (transmises dans la sous-bande où il y a pb)

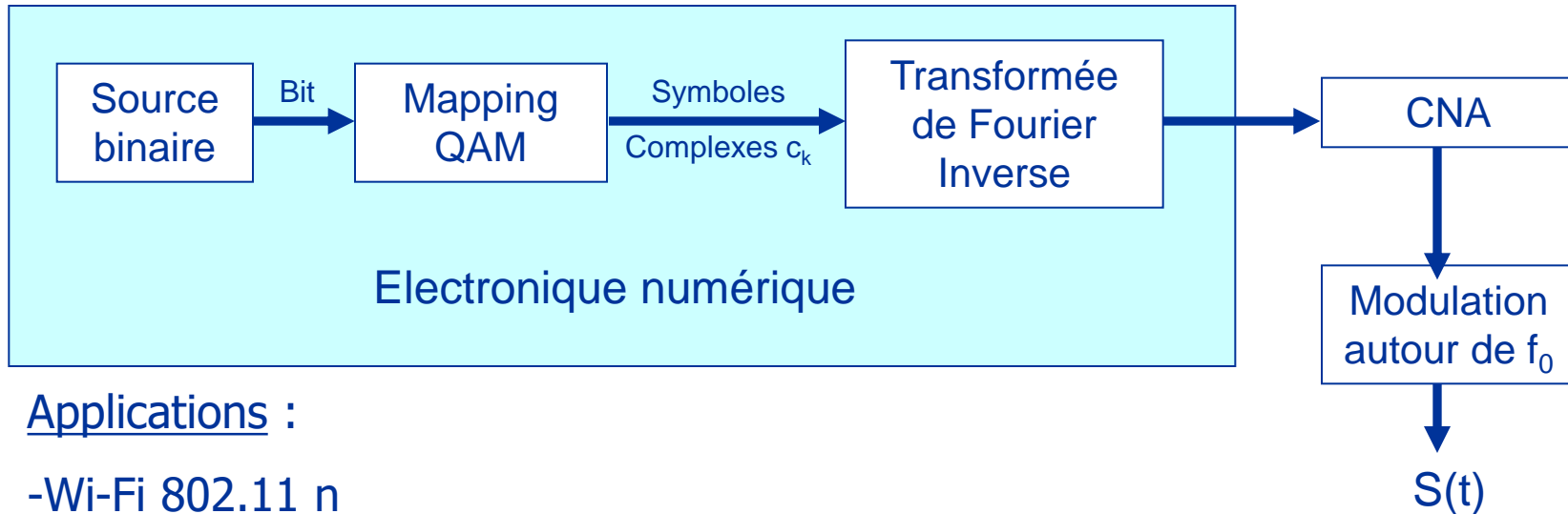
# Modulation multi-porteuses : OFDM

Principe : modulation QAM multi-porteuses



- Simple calcul de Transformée de Fourier Inverse dans le domaine numérique

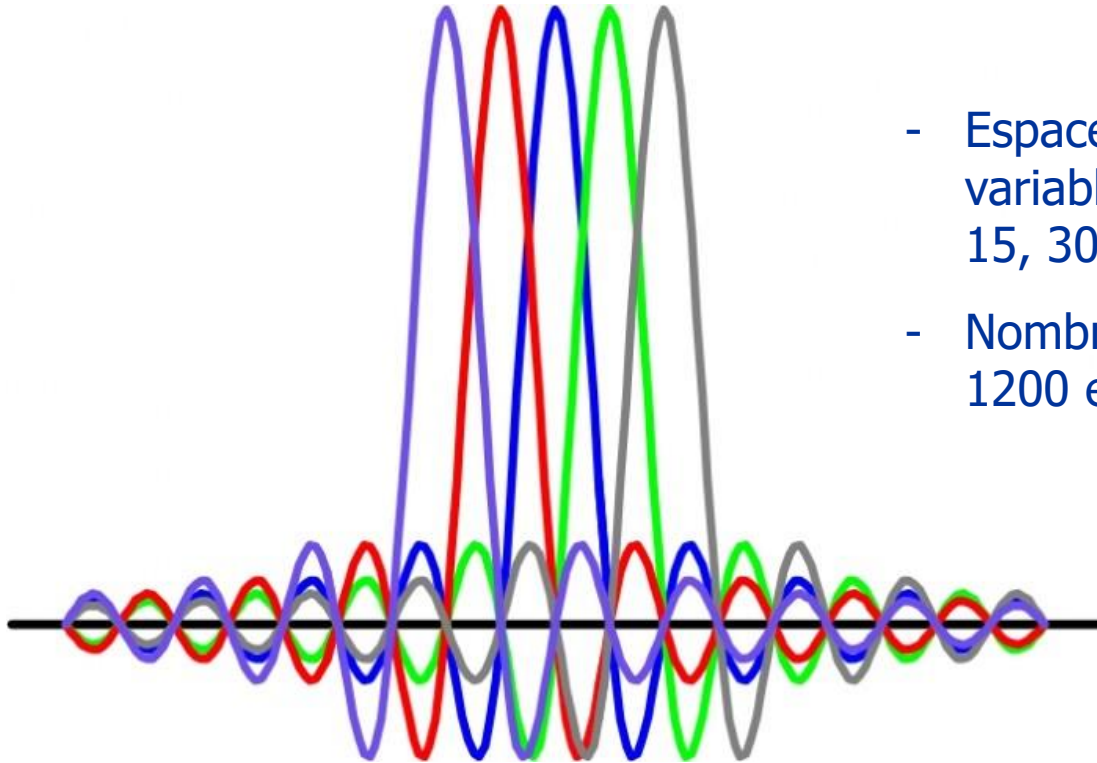
$$s(t) = \left[ \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp(j2\pi f_k t) \right] \times \exp(j2\pi f_0 t) \text{ où } f_k = \frac{k}{T_S}$$



### Applications :

- Wi-Fi 802.11 n
- TNT
- ADSL
- 4G / 5G

...

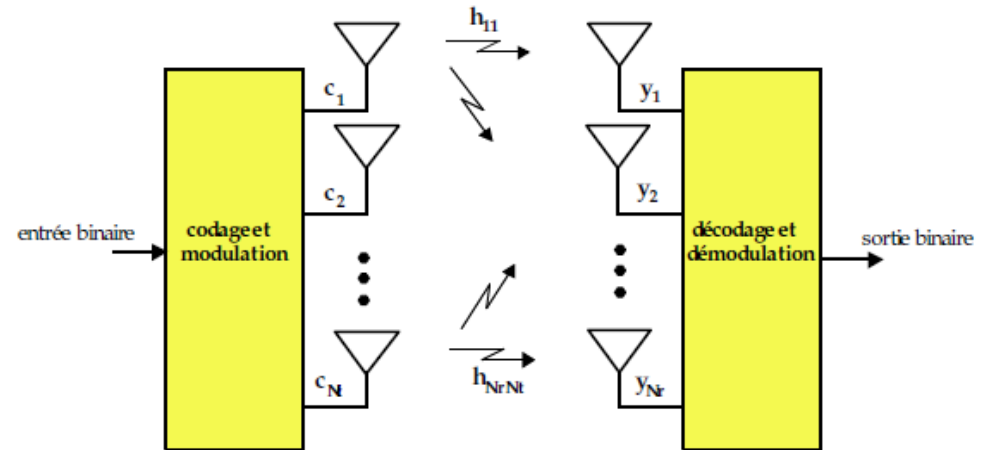


- Espacement des sous-porteuses variable : 15 kHz en 4G, variable 15, 30, 60 et 120 kHz en 5G
- Nombre max de sous-porteuses 1200 en 4G, 3300 en 5G

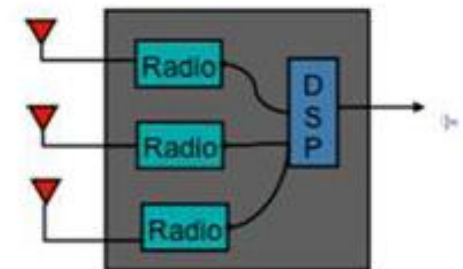
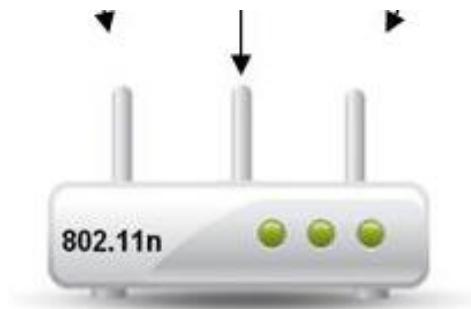
# Techniques MIMO

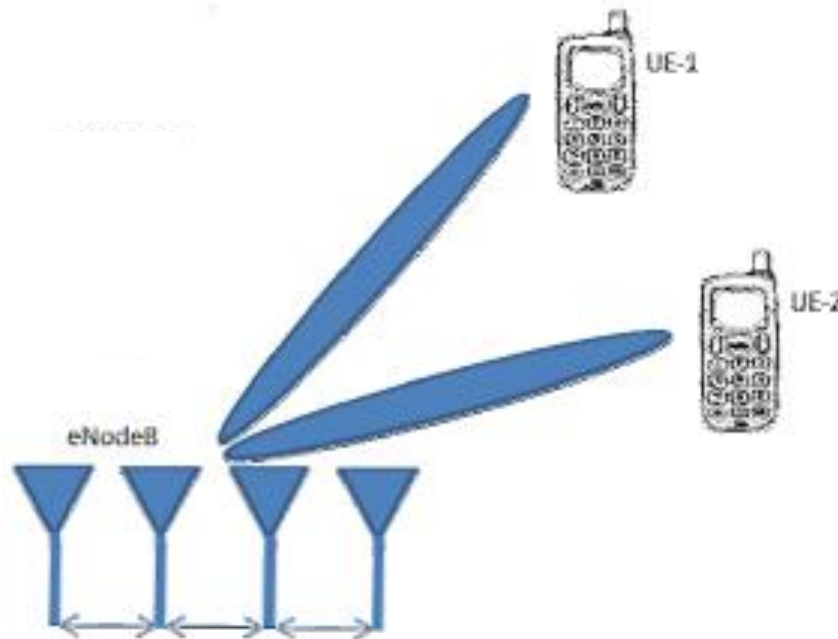
## 2) Défauts supplémentaires

= Multiple Input – Multiple Output



Ex : **Wi-Fi IEEE 802.11n** : 2,4 GHz ou 5GHz,  $D_{\text{bmax}} = 300 \text{ Mbit/s}$





Sur la liaison descendante :  
focalisation du 'faisceau' radio  
vers le mobile récepteur

Principe : réseaux d'antennes  
sur la station de base, avec  
contrôle du déphasage à  
l'entrée de chaque antenne  
=> balayage du diagramme  
de rayonnement

# Bilan final

- Connaître les contraintes des systèmes de transmission numérique réels
  - *Connaître les trajets multiples et leurs effets*
  - *Connaître le principe de quelques techniques de modulation avancées*
- Avoir bien compris la 'force' du numérique
  - *information contenue en des instants discrets, ensemble discret de valeurs possibles (décision à prendre en réception lors des instants d'échantillonnage)*
  - *pas de perte d'information si canal à bande limitée*
  - *traitement numérique pour minimiser l'influence du bruit, des trajets multiples*

...

=> révolution du numérique ,  
**Internet des Objets, IoT**

