

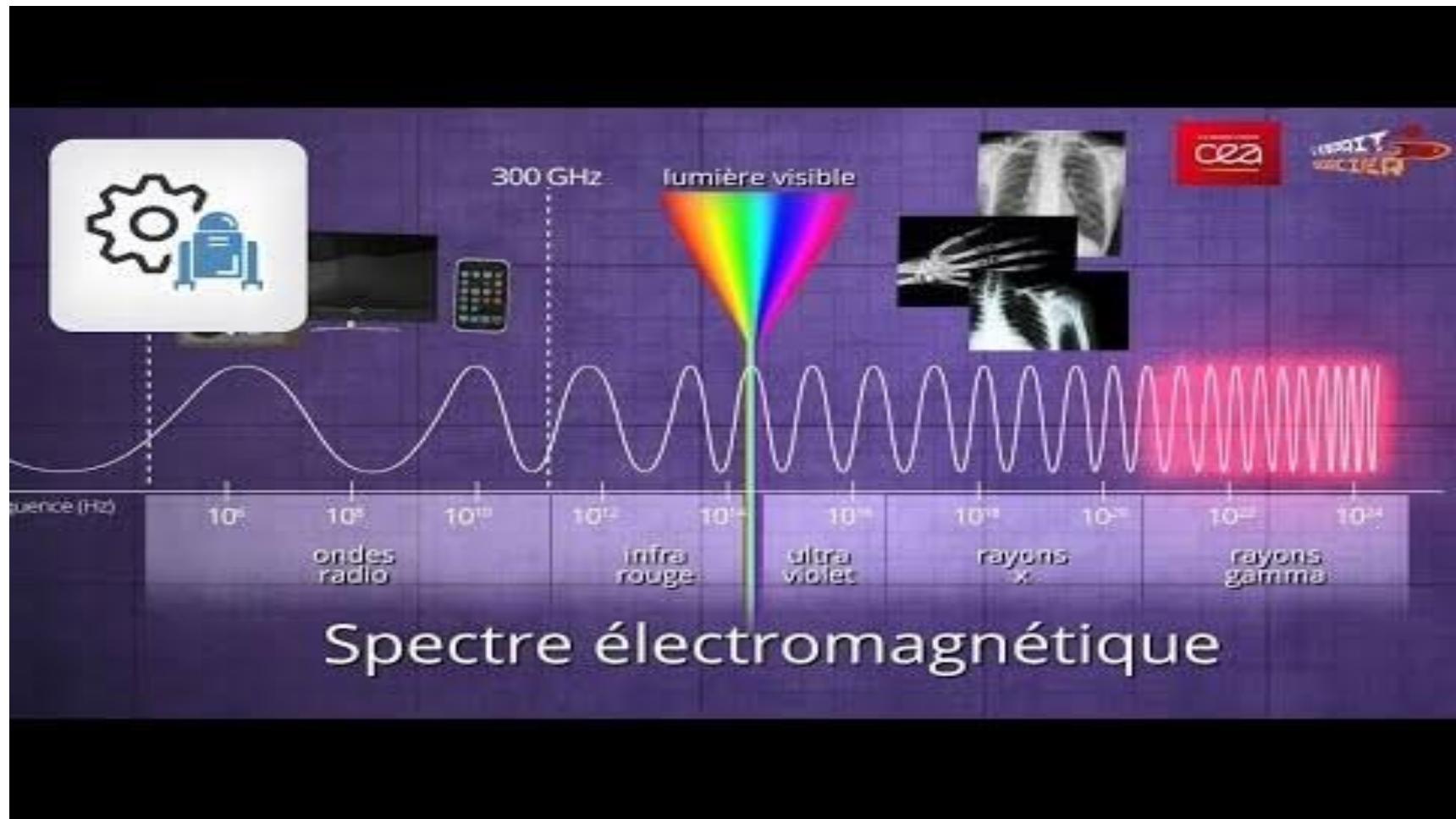
# M3106

## Transmission large bande

### CM

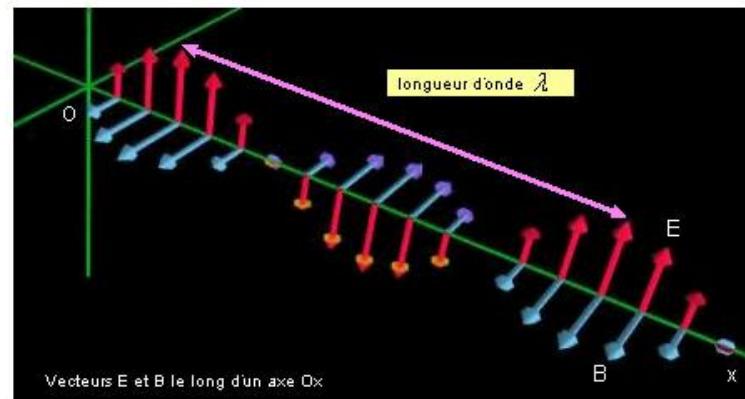
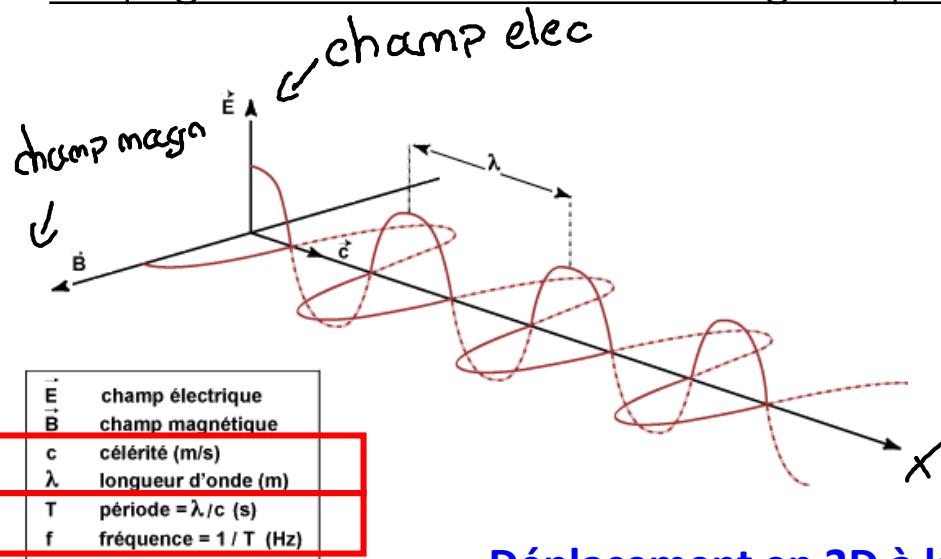
• Propagation	6h CM 11h TD	DS le 18 oct = 1 note = 50% de la note finale
• Propagation à trajets multiples		
• Canal de transmission		CR à la fin = 1 note = 50% de la note finale
• Modulations		
• OFDM	6x2h TP	CR à la fin = 1 note = 50% de la note finale
• WCDMA		

# Ondes électromagnétiques



<https://youtu.be/w7y-1eY0mcE>

# Propagation des ondes électromagnétiques

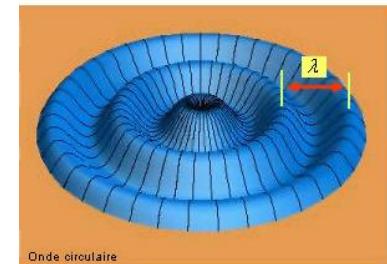


## Déplacement en 3D à la vitesse de la lumière

$E$  et  $B$  (ou  $H$ ) sont deux ondes progressives

A un instant donné, la répartition des champs le long d'un axe est sinusoïdale, et la distance entre deux maxima est la longueur d'onde

$$\lambda = \frac{c}{f}$$



Explorat des sphères

Coefficient de vitesse : L'onde ne se déplace pas à la vitesse  $c = 3 * 10^8$  m/s, mais à :

$$\text{une vitesse} = \text{coef. de vitesse} * c$$

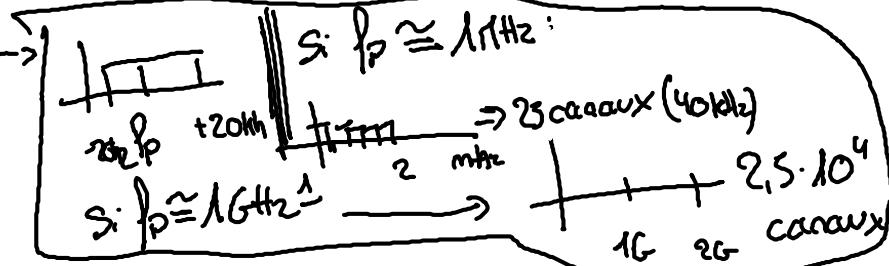
Câble coaxial plein : coef. de vitesse = 0.66 -> soit une vitesse d'env.  $2 * 10^8$  m/s

Câble coaxial aéré : coef. de vitesse = 0.82 -> soit une vitesse d'env.  $2.5 * 10^8$  m/s

Circuit imprimé : coef. de vitesse = 0.55 -> soit une vitesse d'env.  $1.6 * 10^8$  m/s

# Spectre des ondes électromagnétiques

Fréquence	Longueur d'onde
100kHz	3 km (GO)
100 Mhz	3 m (FM)
1 GHz	30 cm (portable)
10 GHz	3 cm (TV par satellite)



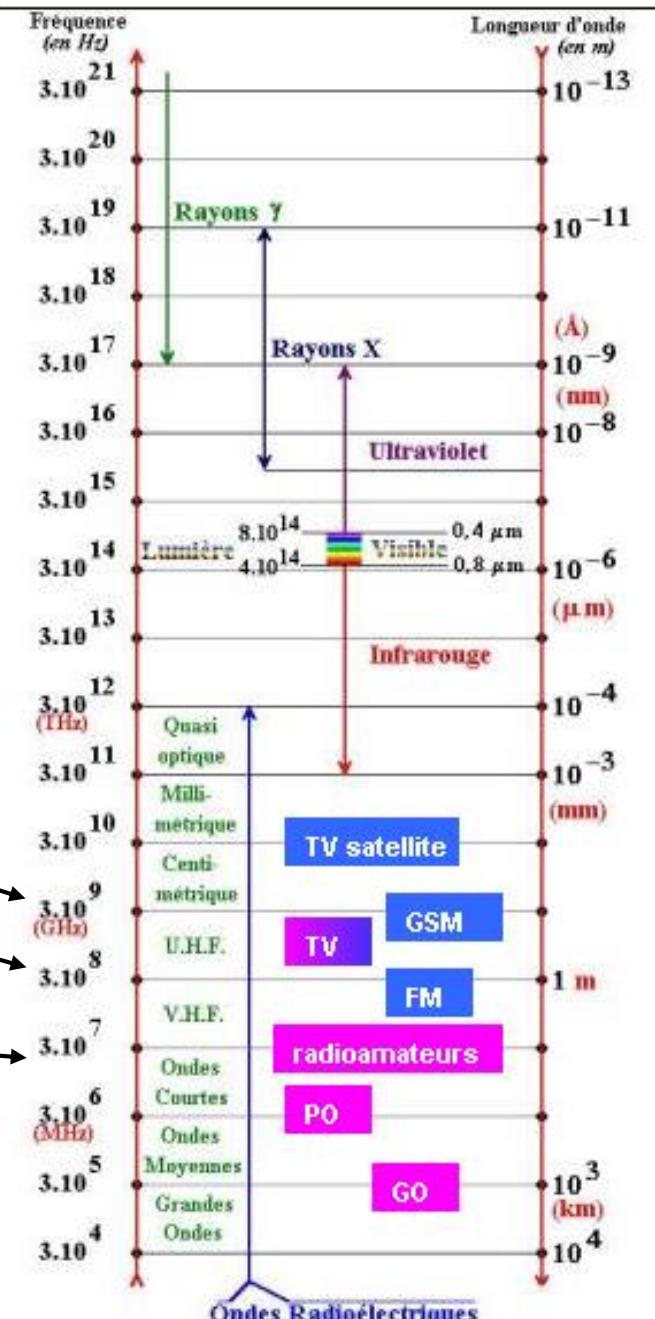
3 MHz < f < 1 GHz : Très recherchées

f < 10 MHz : Transmet peu d'info

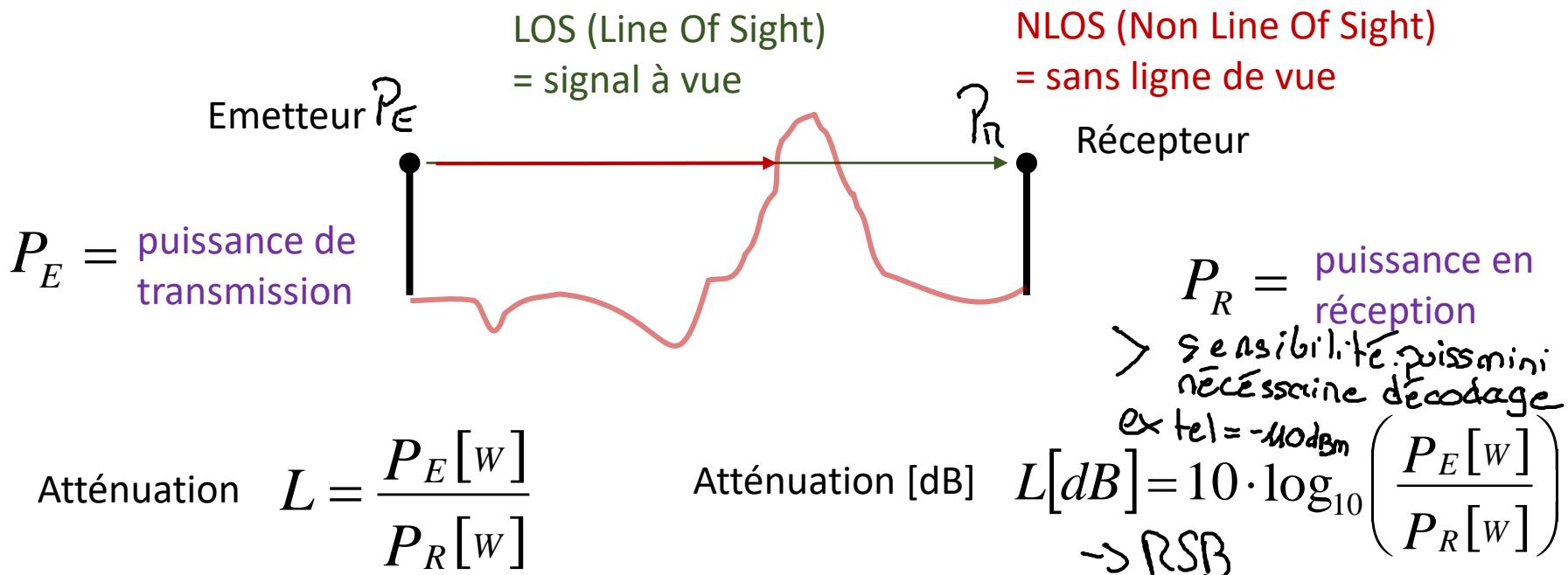
$\Rightarrow$  Musique et Voix

20 kHz

Modulation AM :  $= \rightarrow + \cos(2\pi f_p t)$



## Notions de base



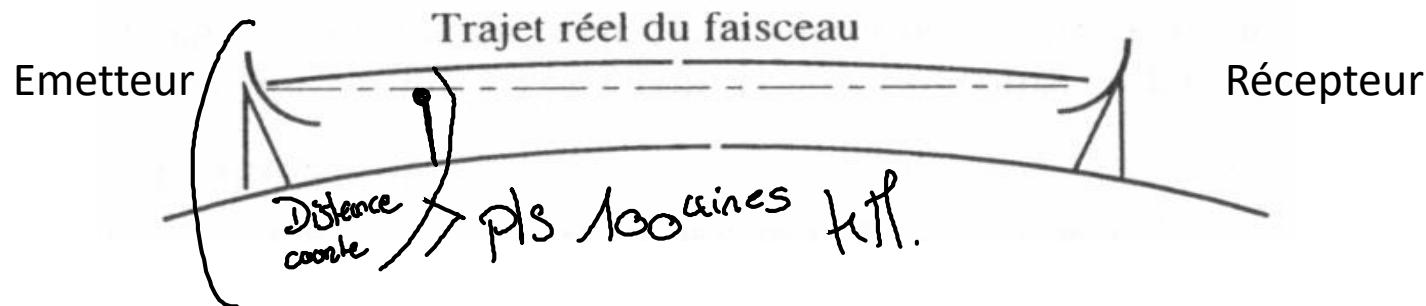
$$P[dBW] = 10 \cdot \log_{10}(P[W])$$

$$P[dBm] = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P[W]}{1mW} \right)$$

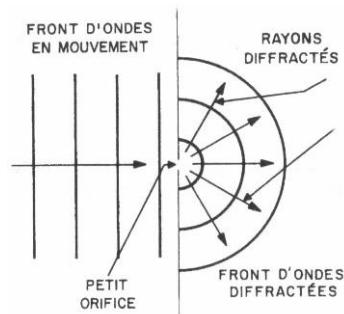
$$L[dB] = P_E[dBW] - P_R[dBW] = P_E[dBm] - P_R[dBm]$$

# Phénomènes physiques concernant les ondes électromagnétiques

## La réfraction par l'atmosphère

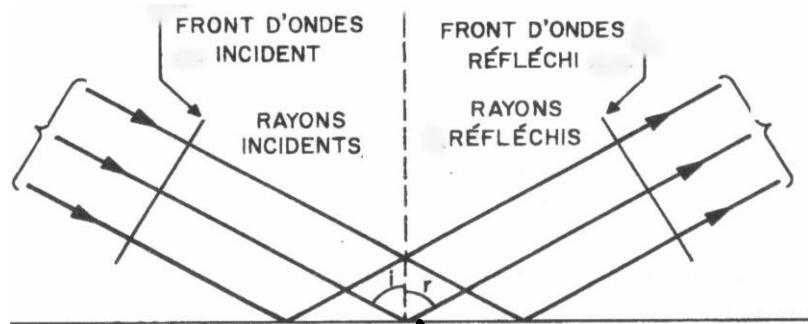


Diffraction



ex: Deux immeubles

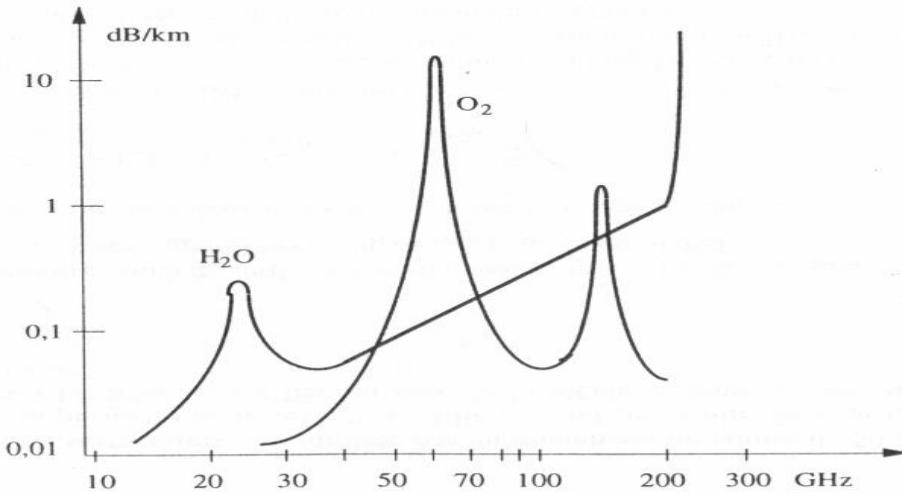
Réflexion



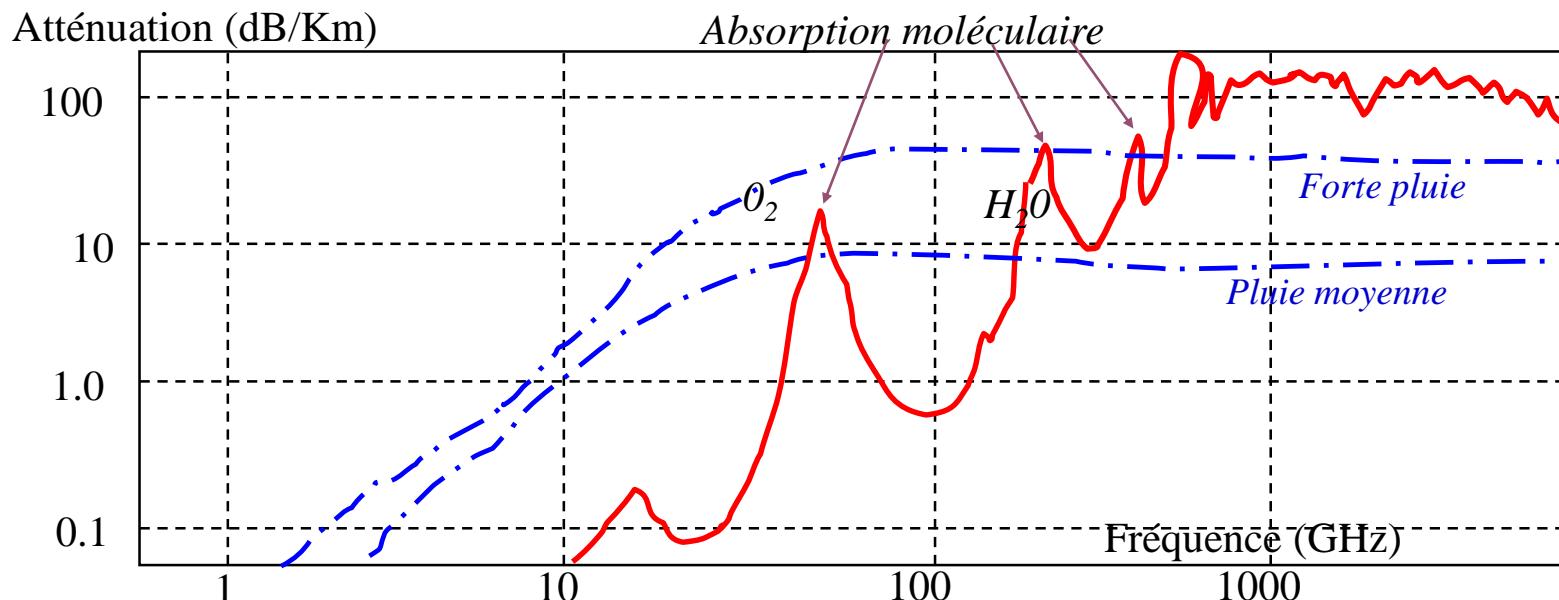
$i = \pi$  Si surface  
dépend du coef s'ichgt de  
milieu

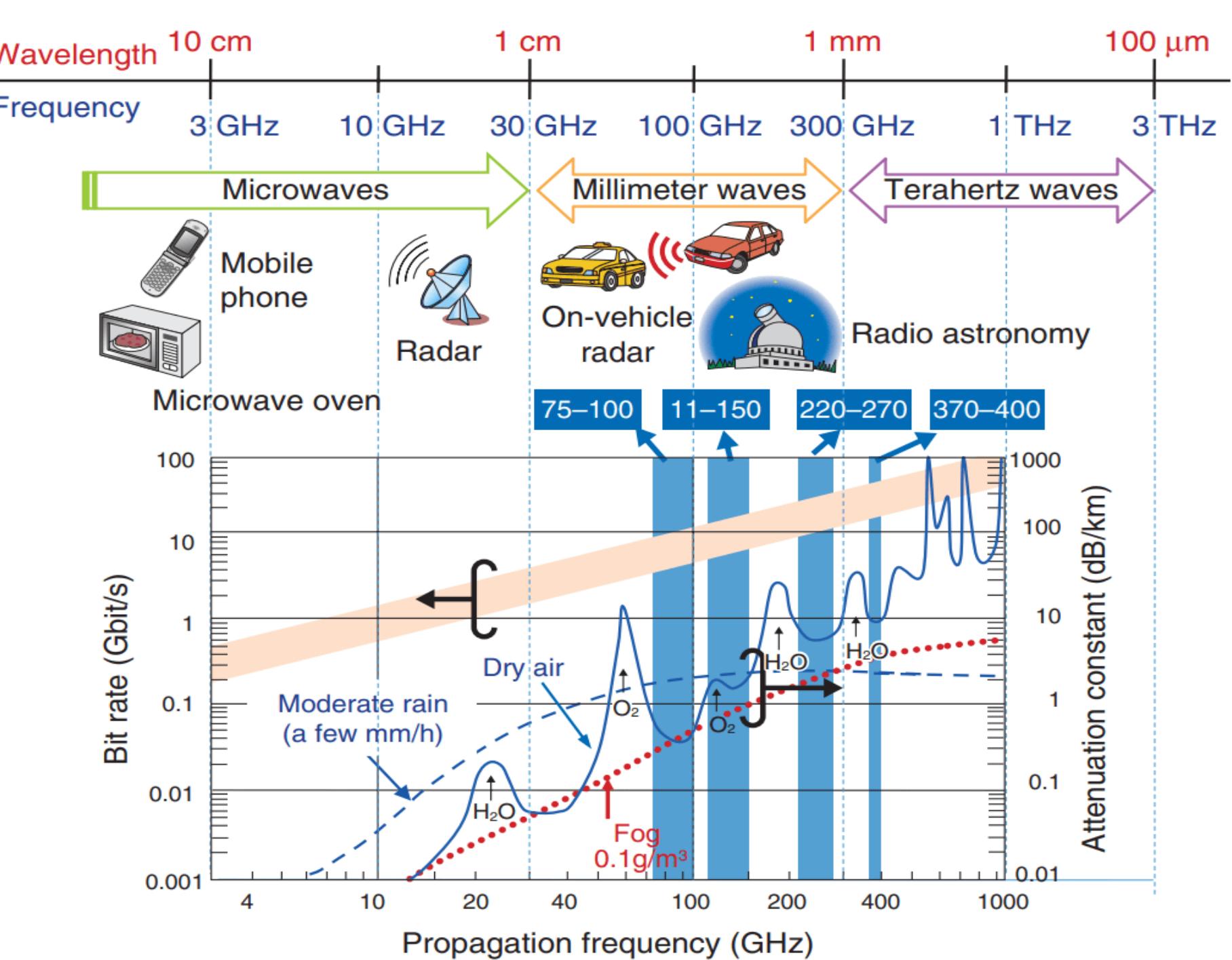
# Phénomènes physiques concernant les ondes électromagnétiques

## L'absorption atmosphérique



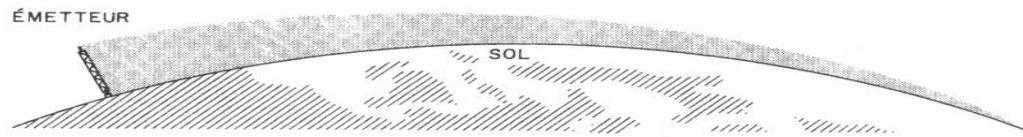
- Energie absorbée et transformée - seule l'amplitude du signal est modifiée.
  - L'absorption due aux différents gaz présents dans l'atmosphère.
  - L'atténuation varie avec la fréquence.
- 
- Influence des particules (pluie, grêle, neige ....)





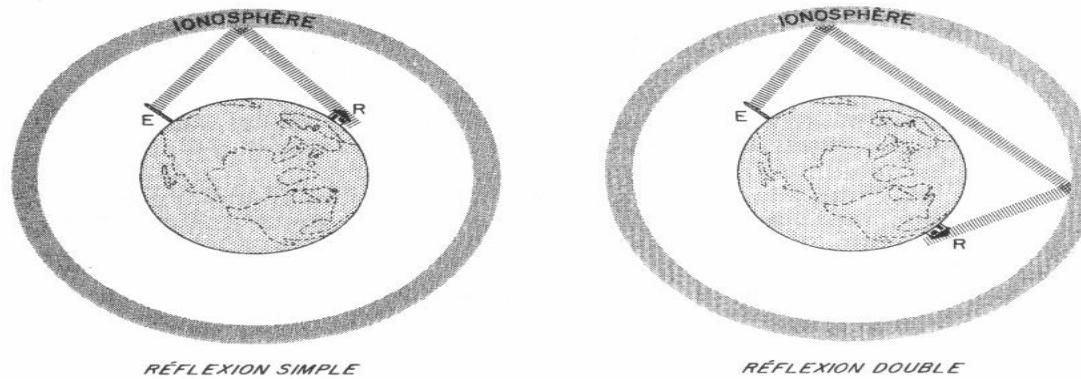
# Modes de propagation des ondes électromagnétiques

Ondes de surface ou de sol (ondes longues)



De 10kHz à 30kHz : distances de 10000km au dessus de la mer  
⇒ Poco de données

Transmission par réflexion ionosphérique (ondes courtes)



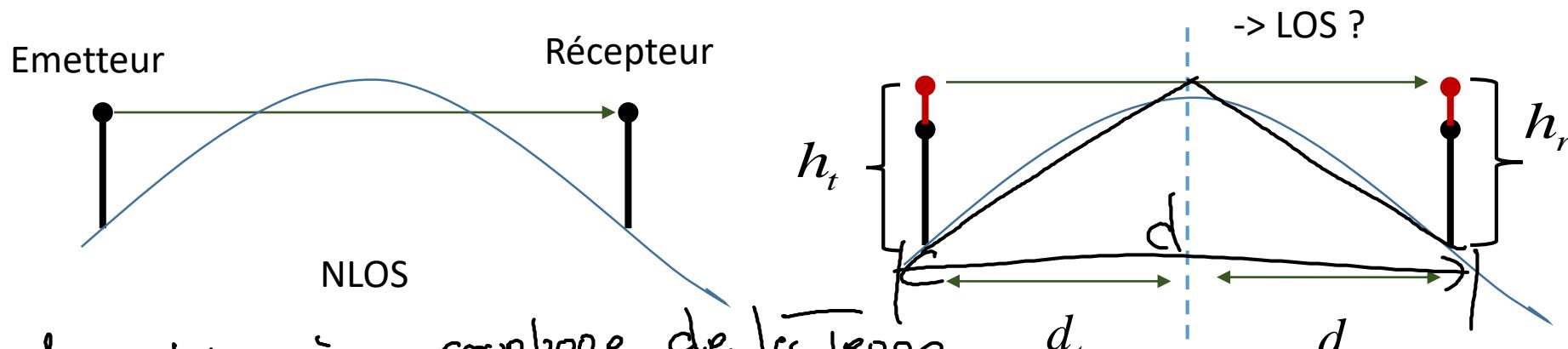
De 3kHz à 30MHz : Couche à 70-1000km

## Modes de propagation des ondes électromagnétiques

## Transmission par ondes directes

De 30MHz à 30GHz  $\Rightarrow$  Quasi tout.

Courbure de la terre (s'assurer d'avoir une ligne de vue)



1er phénomène : carbonne de la terre

$$R = 6400 \text{ km} = \underline{6,4 \cdot 10^6 \text{ m}}$$

$$d = d_t + d_r = \sqrt{2 \cdot h_t \cdot R} + \sqrt{2 \cdot h_r \cdot R}$$

~~2 cos: 1 Symetrie  $\Rightarrow$  ht = hr~~

2 cases:  $\text{!Symet}^q \Rightarrow h\tau = h\pi$

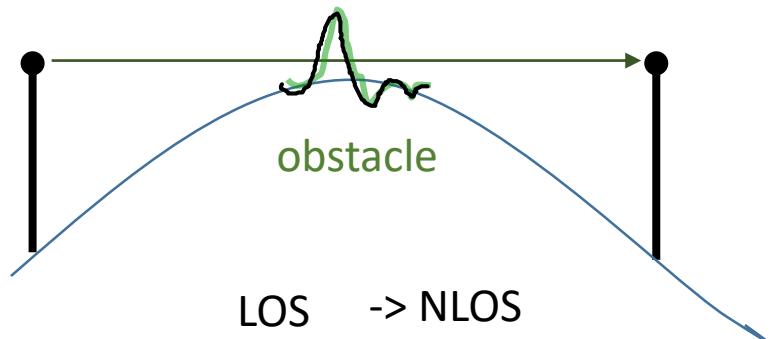
$\gamma$   $\in$   $Sym^9 \Rightarrow h + \neq h\bar{r}$



# Modes de propagation des ondes électromagnétiques

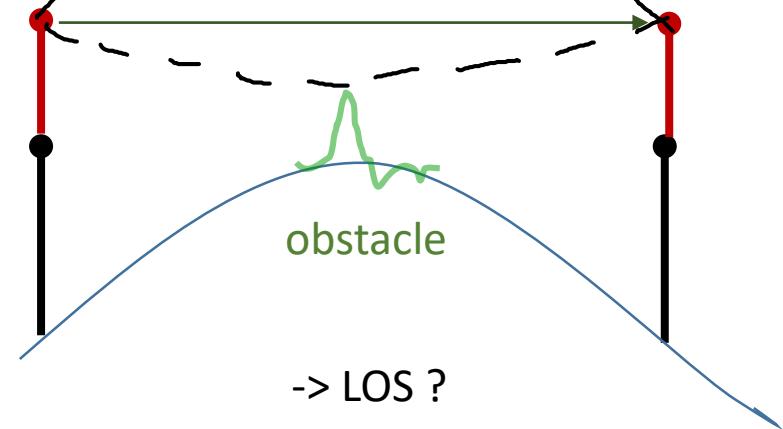
Transmission par ondes directes

Obstacles (éviter la diffraction sur les obstacles)

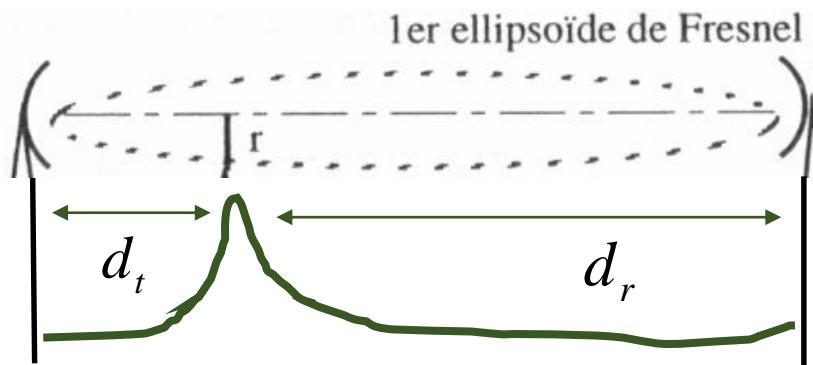


De 30MHz à 30GHz

Dépasser un obstacle



-> l'ellipsoïde de Fresnel ne doit pas être brouillé

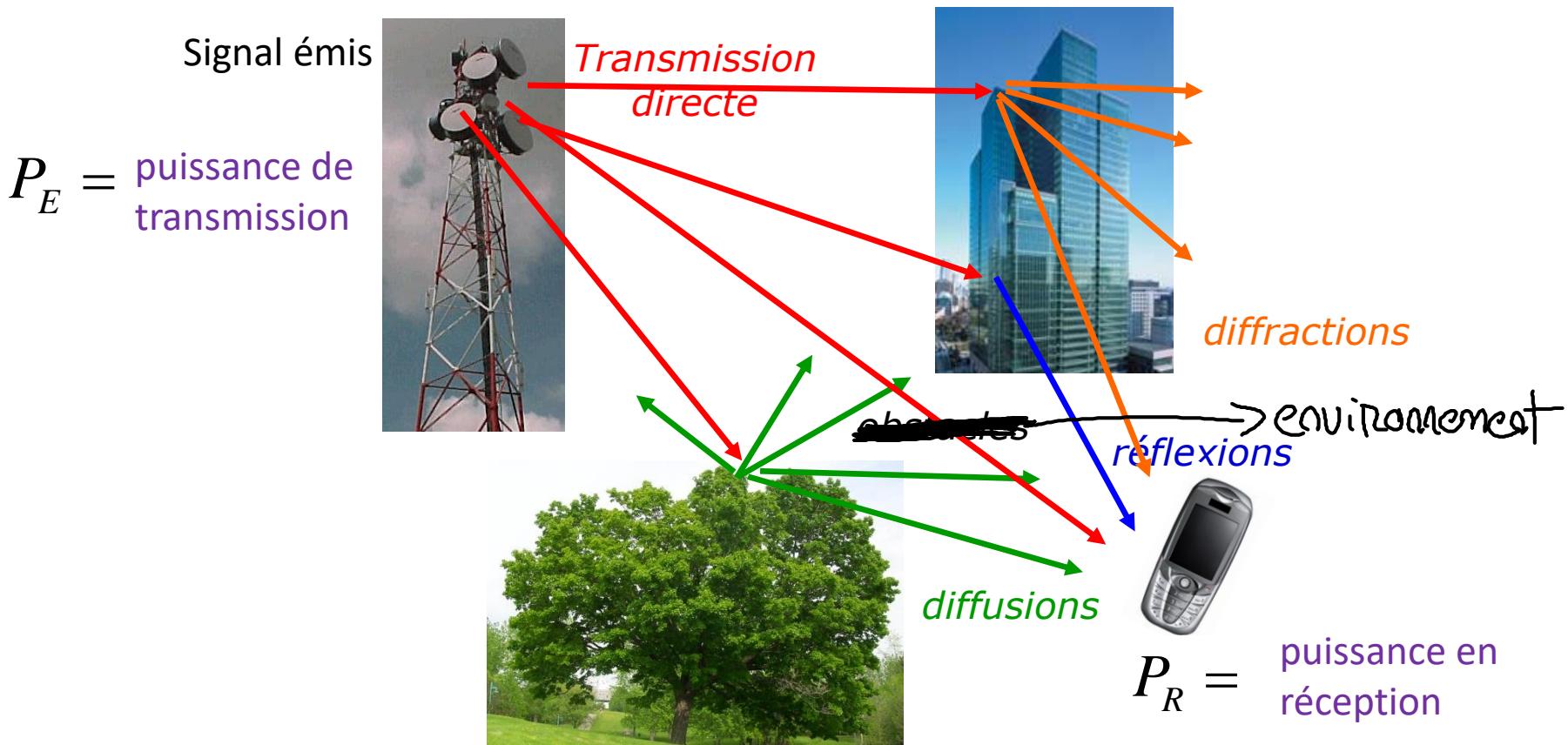


$$r = \sqrt{\frac{d_t \cdot d_r \cdot \lambda}{d_t + d_r}}$$

# Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques

## Modes de propagation dans un environnement terrestre

- Le signal reçu = combinaison de 4 modes de bases.
- Des nombreux trajets avant d'arriver au récepteur = phénomènes de propagation multi trajets ou multi-path



## Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques

A quoi sert un modèle de propagation ?

- Estimer la portée des émetteurs
- Estimer la puissance, donc la qualité, du signal reçu (distance, environnement, etc.)
- Calculer le niveau d'interférence (plusieurs émetteurs)
- Déterminer et configurer les équipements nécessaires.

Un modèle de propagation permet de **déterminer la perte de propagation (l'atténuation)  $L$**

$$P_R[dBm] = P_E[dBm] - L(f, d, \text{environnement})[dB]$$

qui relie la puissance reçue  $P_R$  et la puissance émise  $P_E$ , à partir de :

- la fréquence
- la distance
- des caractéristiques de l'environnement de propagation.

## Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques

Les études sur la physique des ondes montrent que les effets des ondes électromagnétiques varient en fonction de leur fréquence.

Plus la fréquence d'une onde est élevée, plus elle a d'effet.

Il apparaît donc légitime de fixer des limites de puissance de transmission pour les ondes qui sont au plus près des lieux de vie.

Exemples :

- 2 W (ou 3 dB ou 33 dBm) pour le réseau GSM 900 MHz
- 1 W (ou 0 dB ou 30 dBm) pour le réseau GSM 1800 MHz
- 0,125 W (ou -9,03 dB ou 20,97 dBm) pour le réseau UMTS 2100 MHz
- 0,1 W (ou -10 dB ou 20 dBm) pour le réseau WiFi.

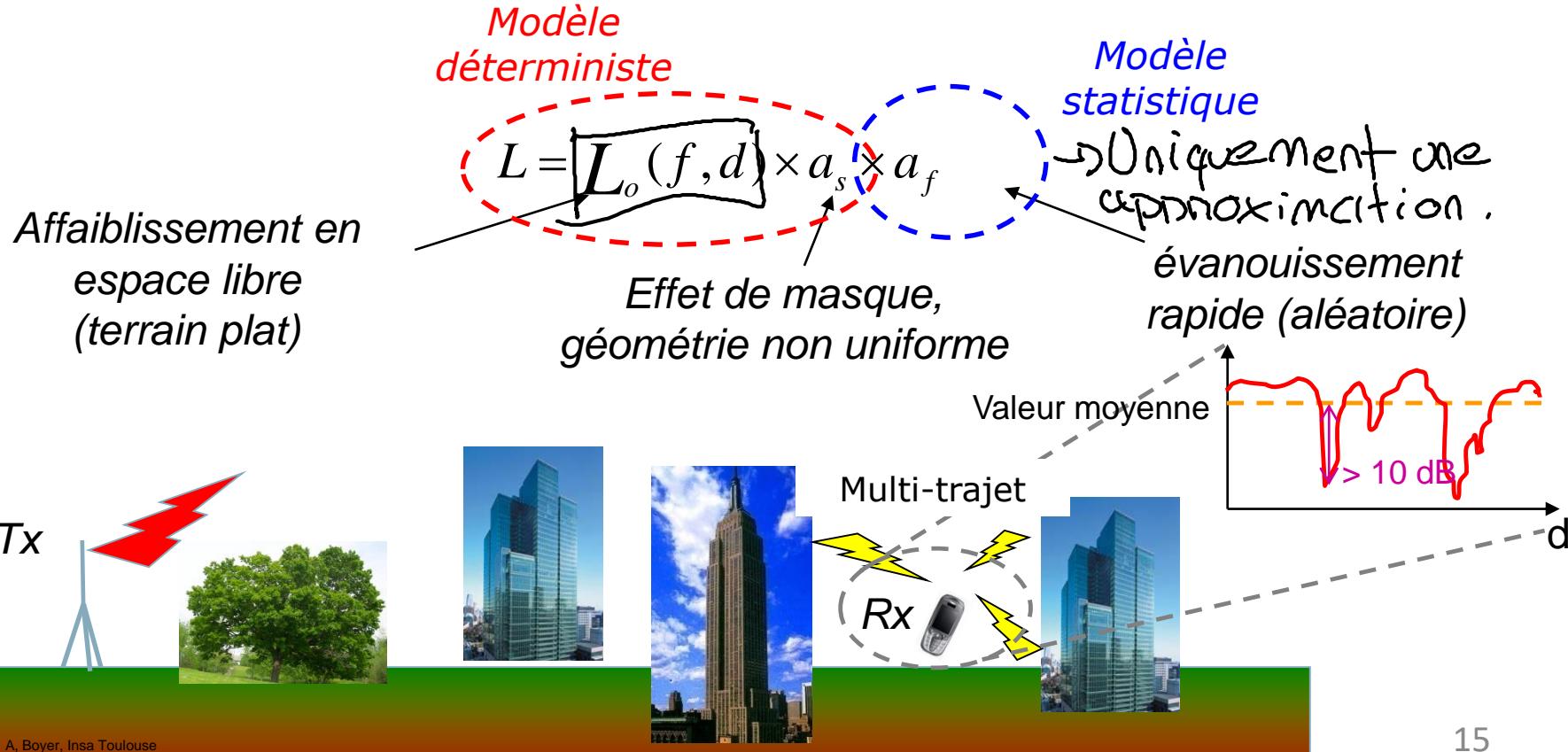
$$P[dB] = 10 \cdot \log_{10}(P[W]) \quad P[dBm] = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P[W]}{1mW}\right)$$

$$P[dBm] = P[dB] + 30$$

# Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques

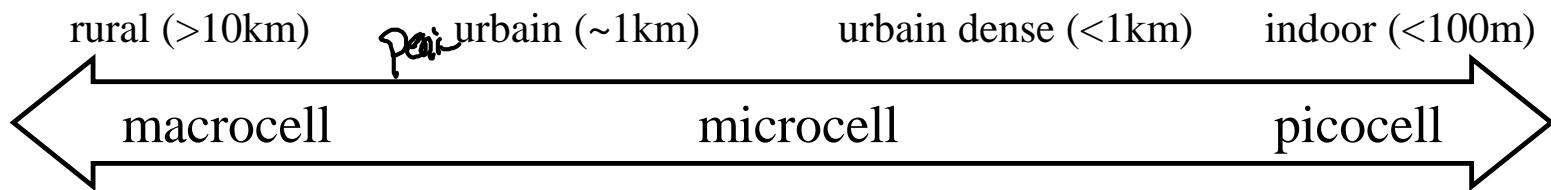
## Modèle général :

- La puissance d'une onde électromagnétique diminue avec le trajet.
  - Atténuation = perte de propagation L.
- Difficile à déterminer : complexité de l'environnement et des effets physiques.

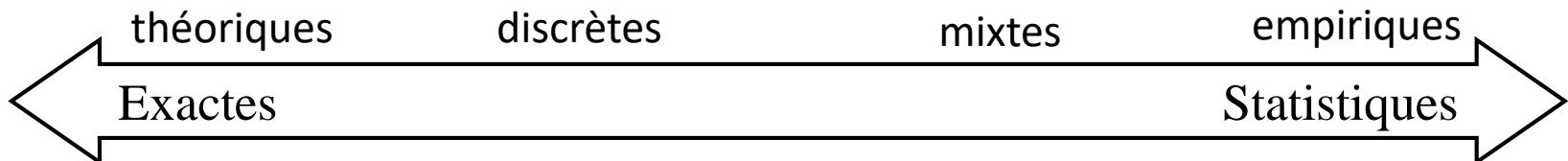


## Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques

- Milieu rural (>10 km) : zones quasi ouvertes, larges, réflexion sur le sol, géographie (montagnes, forêts, lacs, etc.)
- Milieu urbain (centaines de mètres à plusieurs kilomètres) : réflexions et diffractions multiples, géométries complexes et dimensions variables, multitrajets
- Milieu indoor (quelques dizaines de mètres) : même caractéristiques + pénétration murs.



### Méthodes



- \* ITU-R 370, ITU-R 525, ITU-R 525/526, ITU-R 1225, ITU-R 1546, ITU-R 368, etc.
- \* Okumura/Hata, Hata – cost 231, etc.)

## Propagation en espace libre (Modèle FRIIS = théorique adaptée au milieu rural)

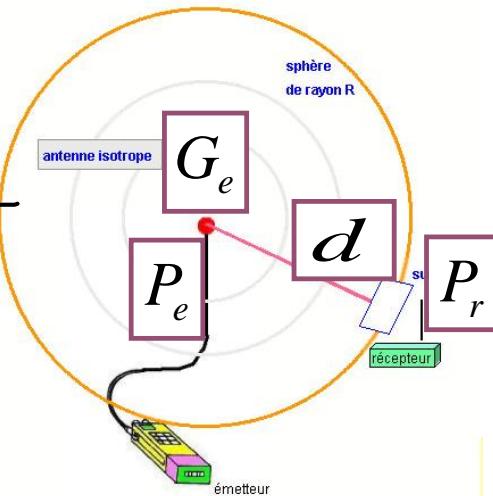
Affaiblissement = pertes de propagation en espace libre

Antenne de gain  $G_e$  excitée par une puissance électrique  $P_e$  -> onde sphérique dans un milieu homogène, isotrope, libre de tout obstacle

Puissance électrique reçue par une antenne de gain  $G_r$  (Friis)

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

Gain=1



→ L'atténuation  $L_0$  dépend uniquement de la fréquence  $f$  et de la distance  $d$

$$L_0(f, d) = \left( \frac{4\pi}{c} \times d \times f \right)^2$$

$$L_0[dB] = 32.4 + 20 \cdot \log(d(km)) + 20 \cdot \log(f(MHz))$$

$\log = \log_{10}$

Harald FRIIS (1946)

17

## Modèle Friis + absorption matériaux

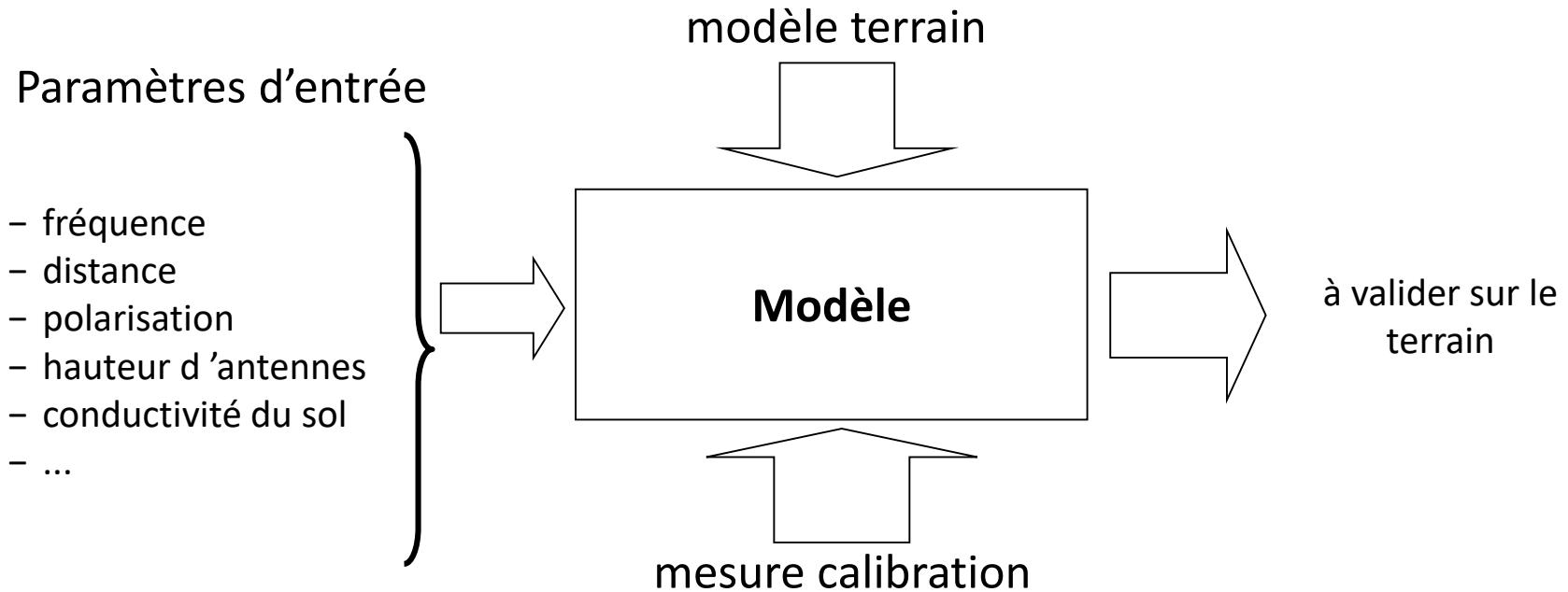
Dans un calcul simple (approximation), on peut ajouter l'absorption de matériaux

- Dépend de la nature de matériaux, de l'épaisseur et de la fréquence.
- Ordres de grandeur à 1.8 GHz :

Placoplatre	3 dB
Vitre	2 dB
Vitre renforcée	8 dB
Béton poreux	6.5 dB
Cloison de 10 cm de béton	9.5 dB
Mur béton épais (< 20 cm)	13 dB
Mur béton épais (> 20 cm)	15 dB
Mur métallique	30 dB

## Modélisation statistique de la propagation

### Modèle statistique



- + Prise en compte de tous les phénomènes de propagation, les calculs sont très rapides.
- Résultats liés aux environnements de mesure -> calibration par rapport à l'environnement étudié.

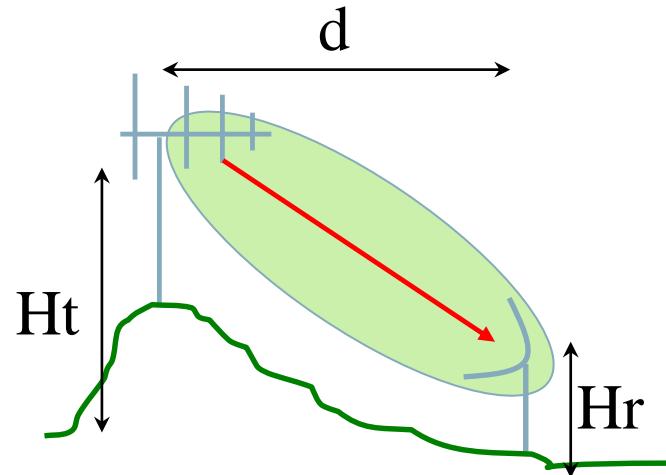
## Modèle Okumura-Hata

Téléphonie cat LTE 3G = 1800 MHz

- 2 antennes en visibilité directe.  $\angle \text{LOS}$
- Pas de phénomène de masquage ni de réflexion.
- Perte de propagation en espace libre corrigée par un facteur.

Paramètres d'entrée :

- fréquence (**f [MHz]**) de **150 à 1500 MHz**
- distance (**d [km]**) entre émetteur et récepteur, de 1 à 20 km
- hauteur (**Ht [m]**) de l'émetteur, de 30 à 300 m
- hauteur (**Fr [m]**) du récepteur, de 1 à 20m



$$\left\{ \begin{array}{l} + f \\ - L_u \end{array} \right\}$$

Atténuation [dB] : zones urbaines

$$\rightarrow [f \text{ Hz}] \rightarrow [m] \rightarrow \text{cat}$$

$$L_u [dB] = 69.55 + 26.16 \cdot \log(f) - 13.82 \cdot \log(H_t) - A + (44.9 - 6.55 \cdot \log(H_t)) \cdot \log(d)$$

+ 3dB de 1500 MHz à 2000 MHz que pour des grandes villes

(se documenter aussi sur le modèle cost231-Hata)

## Modèle Okumura-Hata

Facteur de correction :

[MHz]

$$\left\{ \begin{array}{l} A = (1.1 \cdot \log(f) - 0.7) \cdot H_r - (1.56 \cdot \log(f) - 0.8) \\ A = 8.29 \cdot \log(1.54 \cdot H_r) - 1.1 \\ A = 3.2 \cdot \log(11.75 \cdot H_r) - 4.97 \end{array} \right.$$

Atténuation [dB]  
zones suburbaines :

$$L_{su} [\text{dB}] = L_u - 2 \cdot \left( \log \left( \frac{f}{28} \right) \right)^2 - 5.4$$

Atténuation [dB]  
zones rurales :

$$L_r [\text{dB}] = L_u - 4.78 \cdot (\log(f))^2 + 18.33 \cdot \log(f) - 40.94$$

→ Châlons / Reims  
(ville de petite et moyenne taille)  
ville de grande taille,  $f < 200 \text{ MHz}$   
ville de grande taille,  $f \geq 200 \text{ MHz}$

Zone périphérique,  $A =$

## Modèle SUI (Stanford University Interim - IEEE 802.16)

Antenne émission Ht < 30m ; Antenne réception 2m < Hr < 10m

Friis :  $L_0$   
 Okumura  $L_o, L_{so}$  ou  $L_{ru}$   
 SUI :  $L_{min}$  et  $L_{max}$

Atténuation [dB]

$$L[dB] = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d_0}{\lambda}\right) + 10 \cdot \gamma \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + S$$

d : distance (m)  
 d<sub>0</sub> distance de référence = 100m en extérieur

$$X_f = 6 \cdot \log\left(\frac{f[MHz]}{2000}\right) \quad \text{facteur de correction en fréquence}$$

$$X_h = -10.8 \cdot \log\left(\frac{Hr[m]}{2}\right) \quad \text{facteur de correction de la station de base}$$

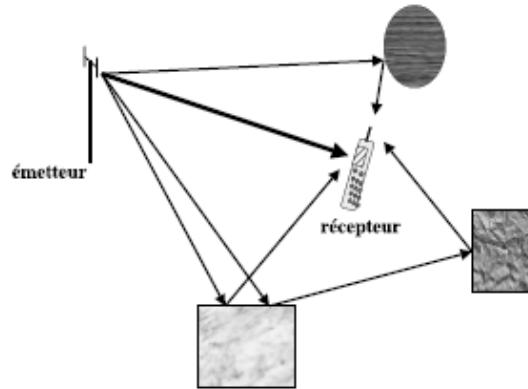
$$S = 0.65 \cdot (\log(f[MHz]))^2 - 1.3 \cdot \log(f[MHz]) + 5.2 \quad \text{pertes de masquage}$$

coefficient  $\gamma = \begin{cases} 2 & \text{en espace libre} \\ 2 - 2.7 & \text{pour zones rurales et sub-urbaines } [2; 2.35] \text{ rur } [2.35; 2.7] \text{ su} \\ 2.7 - 3.5 & \text{pour une zone urbaine - on pourrait décomposer en 3 intervalles : ville petite, moyenne et grande,} \end{cases}$

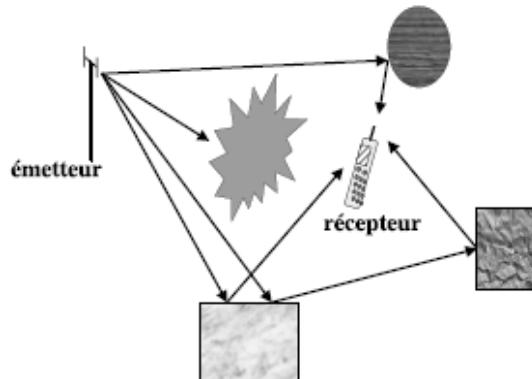
$[2.7; 3.1]$  Ville pet et moy  $[3.1; 3.5]$  gde ville (dense)

## Modèle Walfish-Ikegami

- existence d'une ligne de vue (propagation LOS) : canal de Rice



- pas de ligne de vue (propagation NLOS) : canal de Rayleigh



## Modèle Walfish-Ikegami : ligne de vue (LOS)

Modèle Walfish-Ikegami

- existence d'une ligne de vue -

- Milieu urbain + antenne émission située sous le niveau des toits + puissances d'émission faibles.

Si mobile en visibilité directe, le trajet direct est prépondérant devant les diffractions et les réflexions :

$$L_{LOS} [dB] = 42.64 + 26 \cdot \log(d[km]) + 20 \cdot \log(f[MHz])$$

$d > 0.02 \text{ km}$

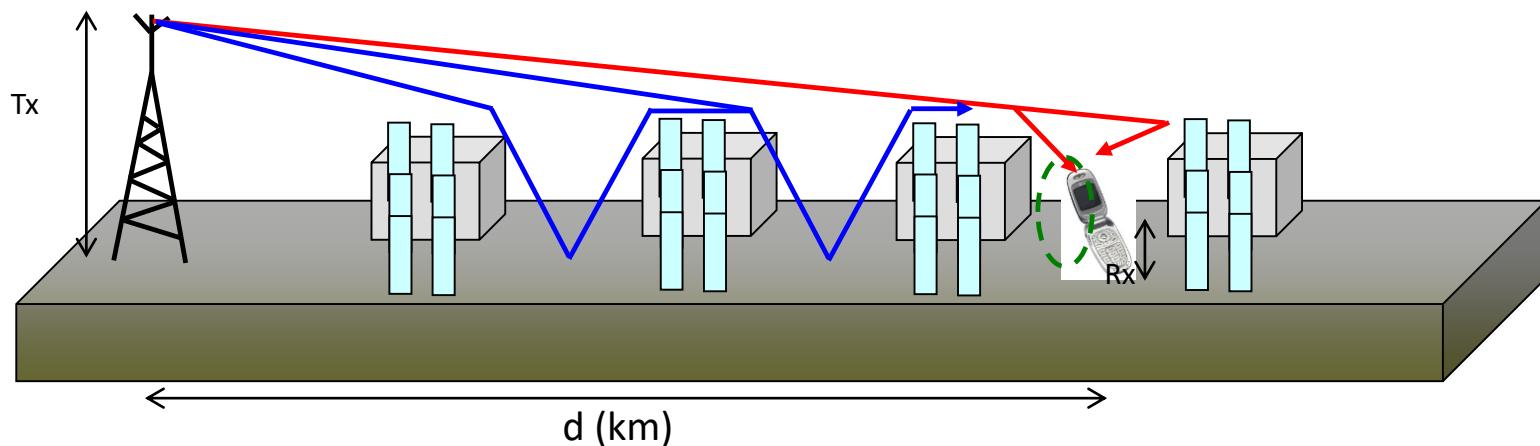
$800 \text{ MHz} < f < 2 \text{ GHz}$

Lien entre  $L_{LOS}$  et  $L_0$  ?

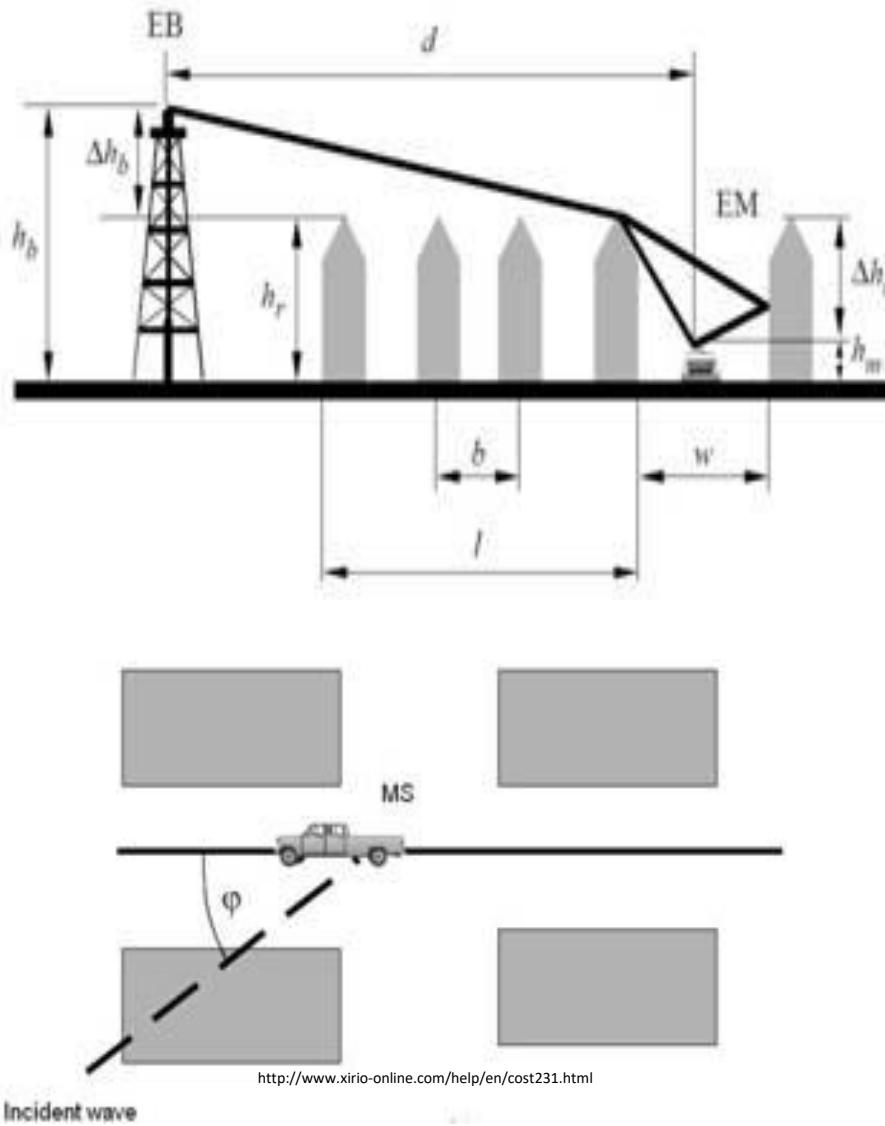
$L_0$  = milieu rural  
 $L_{LOS}$  = milieu dense  $\Rightarrow$  approx<sup>o</sup>  $P_L$  attenuation

## Modèle Walfish-Ikegami : pas de ligne de vue (NLOS)

- Un milieu urbain homogène
- Antenne Rx entre 2 bâtiments
- Pas de visibilité directe de Tx - Rx
- Chaque immeuble = écran absorbant/diffractant



## Modèle Walfish-Ikegami : pas de ligne de vue (NLOS)



- $h_r$  : hauteur immeubles [m]
- $w$  : largeur rue [m]
- $b$  : distance entre immeubles [m]
- $\varphi$  : angle d'orientation angle entre direction de propagation et axe rue [ $^{\circ}$ ]
- $h_b$  : hauteur antenne émission [m]
- $h_m$  : hauteur antenne réception [m]
- $\Delta h_m = h_r - h_m$  [m]
- $\Delta h_b = h_b - h_r$  [m]
- $l$  : distance totale entre premier et dernier immeuble [m]
- $d$  : distance entre émetteur et récepteur [km]
- $f$ : fréquence [MHz]

## Modèle Walfish-Ikegami : pas de ligne de vue (NLOS)

Affaiblissement (dB) - pas de ligne de vue .

$$L_{NLOS} = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd} & \text{pour } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0 & \text{pour } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases}$$

Lrts: pertes dues à la diffraction toits-rue (roof-to-street diffraction and scatter loss)

Lmsd : diffractions multiples (multiscreen diffraction lost)

$$L_{rts} = -8.2 - 10 \log(w) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta h_m) + L_{ori}$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & \text{pour } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & \text{pour } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55) & \text{pour } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases}$$

## Modèle Walfish-Ikegami : pas de ligne de vue (NLOS)

Lmsd : diffractions multiples (multiscreen diffraction lost)

$$L_{msd} = L_{bsb} + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f) - 9 \log(b)$$

$$L_{bsb} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{pour } h_b > h_r \\ 0 & \text{pour } h_b \leq h_r \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{pour } h_b > h_r \\ 54 - 0.8 \Delta h_b & \text{pour } h_b \leq h_r \text{ et } d \geq 0.5 \text{ km} \\ 54 - 0.8 \Delta h_b / 0.5 & \text{pour } h_b \leq h_r \text{ et } d < 0.5 \text{ km} \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{pour } h_b > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_r} & \text{pour } h_b \leq h_r \end{cases}$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7(f/925 - 1) & \text{ville de petite et moyenne taille et zones sub urbaines} \\ & \text{(densité moyenne)} \\ -4 + 1.5(f/925 - 1) & \text{ville de grande taille} \end{cases}$$

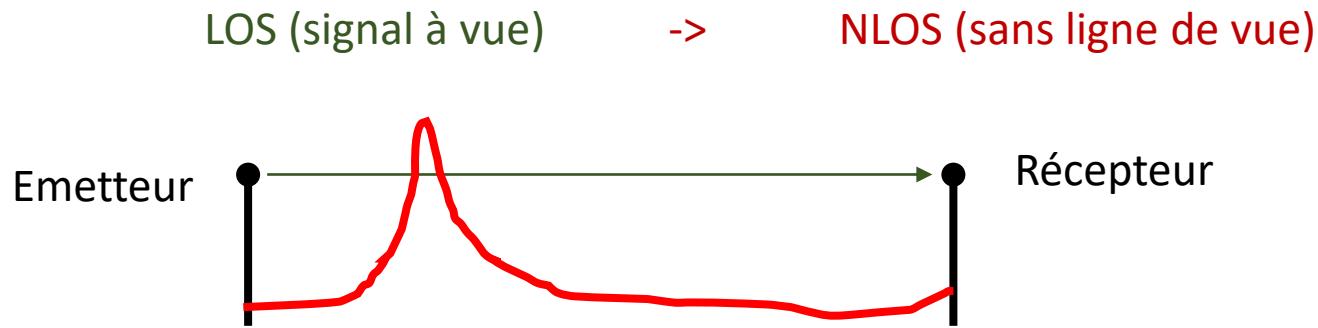
## Autres modèles

<b>UIT-R P.</b>	<b>Applicabilité</b>
<b>1546</b>	Corrections liées à la hauteur des antennes
<b>452</b>	Affaiblissements dus à des groupes d'obstacles
<b>833</b>	Affaiblissement dû à la végétation (notamment aux arbres)
<b>1058</b>	Bases de données topographiques
<b>1146</b>	Corrections liées à la hauteur des antennes
<b>1812</b>	Affaiblissements dus à la végétation et à des groupes d'obstacles
<b>1238</b>	Planification des système de radiocommunication en intérieur
<b>1406</b>	Effets de la propagation relatifs au service mobile terrestre de Terre et au service de radiodiffusion dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques
<b>2040</b>	Effets des matériaux de construction et des structures

- Cost231-Hata
- Lee
- Ibrahim-Parsons
- etc.

## NLOS : prise en compte de la diffraction

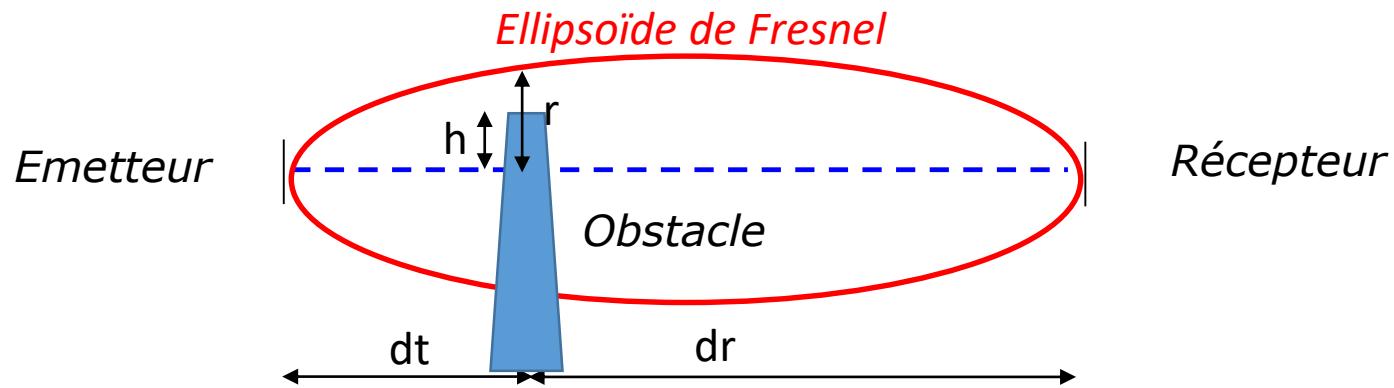
- Non-visibilité **directe** (pas possible de remonter les antennes)



- Le sommet des obstacles se comporte comme un arête d'épaisseur faible
  - L'effet des obstacles = une diffraction par chacune des arêtes d'un bâtiment.
  - On peut estimer des pertes de diffraction
- Les pertes de diffraction [dB] vont se rajouter à l'atténuation de propagation qu'on peut calculer avec un des modèles précédents (selon le cas)

## NLOS : prise en compte de la diffraction

1 seul obstacle



Pertes de diffraction [dB]

$$L_d [dB] = 6.9 + 20 \cdot \log \left( \left( v \oplus 1 \right) + \sqrt{1 + \left( v \oplus 1 \right)^2} \right)$$

$$v = \sqrt{2} \cdot \frac{h}{r}$$

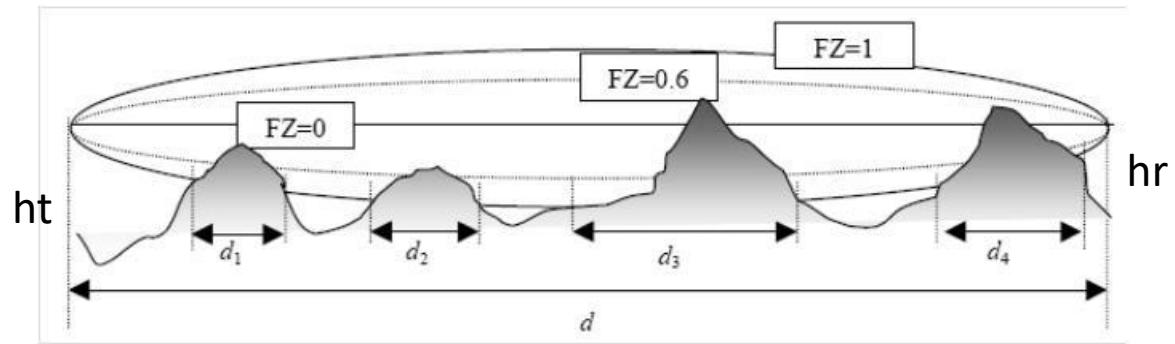
$$r = \sqrt{\frac{d_t \cdot d_r \cdot \lambda}{(d_t + d_r)}}$$

## NLOS : prise en compte de la diffraction

Plusieurs obstacles

Modèle de diffraction → Ajout d'un terme correcteur lié aux trajets multiples

$$L = L_{GR} \cdot \rho \cdot FZ$$



ICS Telecom – “Propagation Radio dans ICS Telecom”, 2010

- reflection terre : 
$$L_{GR} = 20\log(75000d) - 20\log(\pi h_t h_r f)$$
- Proportion du trajet total au dessus du premier ellipsoïde de Fresnel:  
$$\rho = \frac{\sum_i d_i}{d}$$
- Coefficient de réduction de l'ellipsoïde de Fresnel FZ (0 = il ne reste que la ligne de visée directe, 1 = ellipsoïde non obstruée)

## NLOS : prise en compte de la diffraction

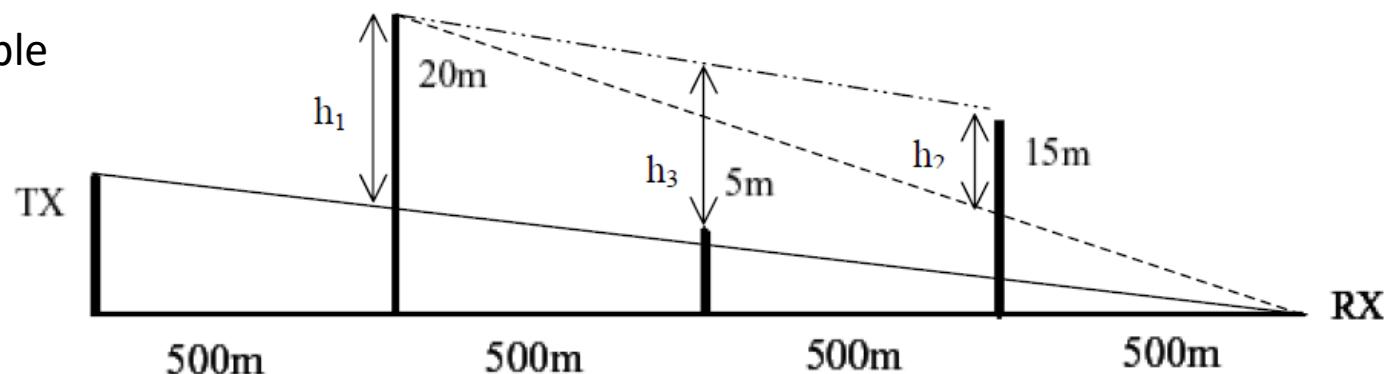
Formule de Lee

$$L(v) = \begin{cases} 0 & v < -0.8 \\ -20 \log(0.5 - 0.62v) & -0.8 < v < 0 \\ -20 \log[0.5 \exp(-0.95v)] & 0 < v < 1 \\ -20 \log\left[0.4 - \left\{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2\right\}^{1/2}\right] & 1 < v < 2.4 \\ -20 \log\left[\frac{0.225}{v}\right] & v > 2.4 \end{cases}$$

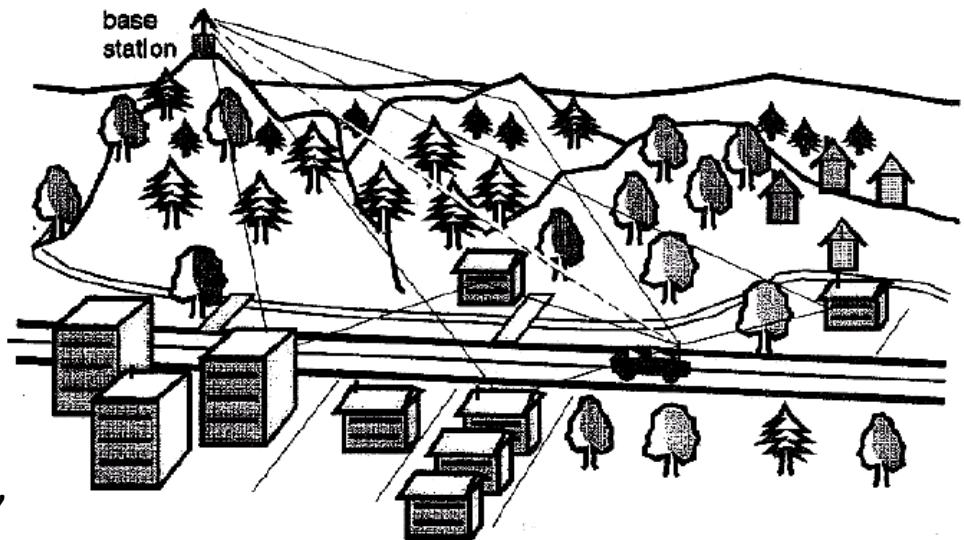
$$L_{\text{total}} = \sum L$$

$$v = \Delta h \cdot \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}}$$

Exemple



## Canal : modélisation



Pour un canal constitué de N trajets,  
le signal reçu est :

$$r(t) = \sum_{k=1}^N \rho_k(t) e^{j\theta_k(t)} s(t - \tau_k(t)) + n(t)$$

→ Dépendant de la dist

$\rho_k(t)$  = atténuation du trajet k

$\tau_k(t)$  = retard du trajet k

$\theta_k(t) = 2\pi f_k t + \theta'_k(t)$  avec

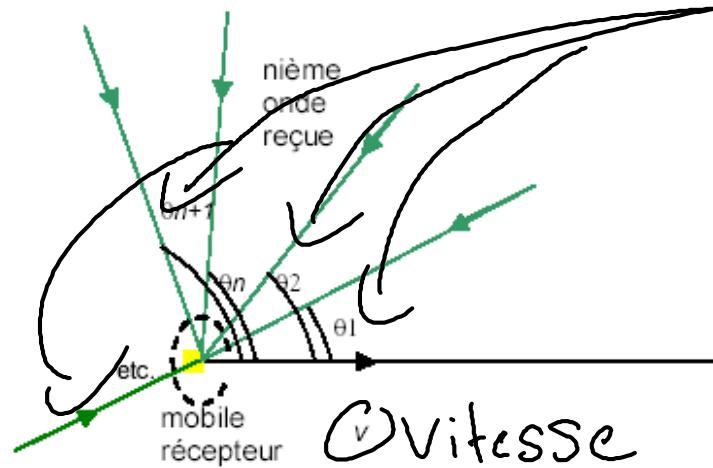
$\theta'_k(t)$  = déphasage du trajet k (retard)

$f_k$  = fréquence Doppler du trajet k

## Canal: Paramètres et classification

### I. L'étalement fréquentiel dû à l'effet Doppler :

si l'émetteur et le récepteur sont en mouvement (vitesse constante) relatif,  
le signal reçu est décalé en fréquentiel



*Vit depl récepteur*

$$f_k = f_c \cos \theta_k$$

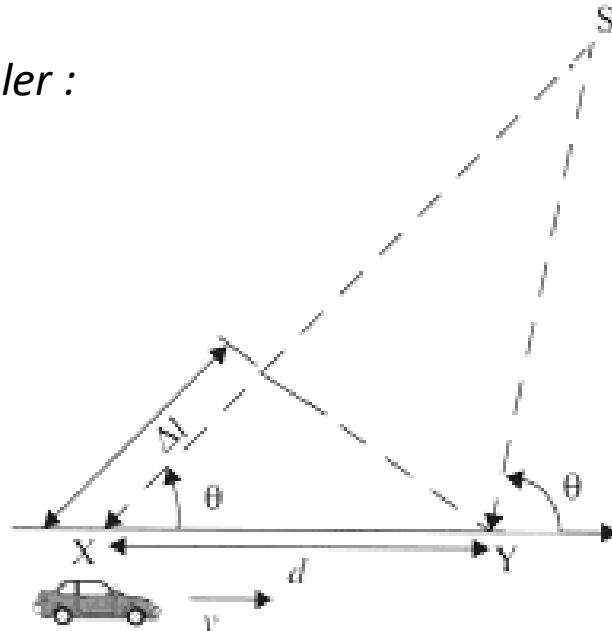
*Porteuse*

$f_c$  = fréquence de la porteuse,  
 $v$  = vitesse du véhicule,  
 $c$  célérité de la lumière =  $3 \cdot 10^8$  m/sec.

L'étalement Doppler  $f_d$  = le décalage maximal en fréquence parmi tous les trajets.

## Canal: Paramètres et classification

### I. L'étalement fréquentiel dû à l'effet Doppler :



Emission dans la bande de 1850MHz. Véhicule roulant à 100km/h

3 cas:

- Le véhicule roule vers l'émetteur
- Le véhicule s'éloigne de l'émetteur
- Le véhicule roule perpendiculairement à l'axe de l'émetteur

## Canal: Techniques de diversité



<https://youtu.be/g3aETI-9dfw>

## Canal: Techniques de diversité

Fournir plusieurs versions du même signal sur des canaux indépendants

- Diversité temporelle : plusieurs time slots séparés par un  $\Delta t >$  le temps de cohérence du canal (codage + entrelacement).
- Diversité fréquentielle : plusieurs porteuses séparées par  $\Delta f >$  la bande de cohérence du canal
- Diversité spatiale : plusieurs antennes séparées par plusieurs multiples de la longueur d'onde à transmettre.

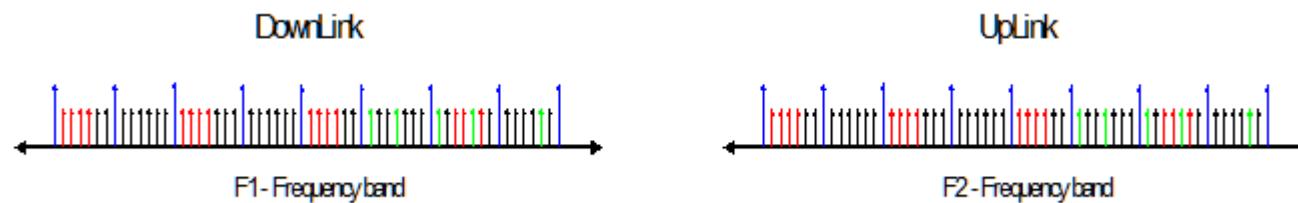
# MEDIA 1

## Canal: Techniques de diversité: FDD et TDD

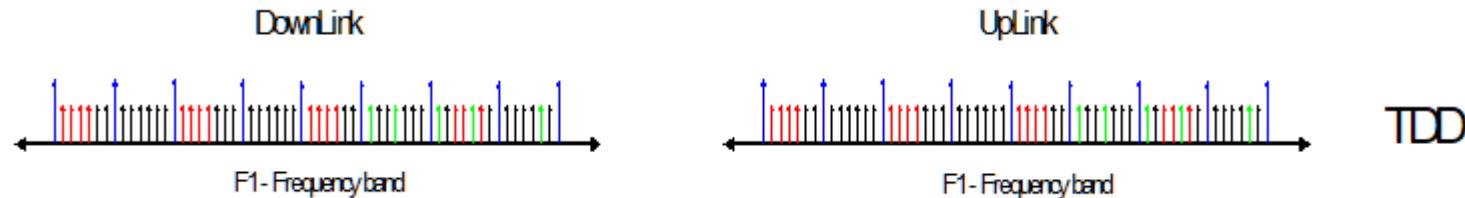
Fournir plusieurs versions du même signal sur des canaux indépendants

- Diversité temporelle : plusieurs time slots séparés par un  $\Delta t >$  le temps de cohérence du canal (codage + entrelacement).
- Diversité fréquentielle : plusieurs porteuses séparées par  $\Delta f >$  la bande de cohérence du canal
- Diversité spatiale : plusieurs antennes séparées par plusieurs multiples de la longueur d'onde à transmettre.

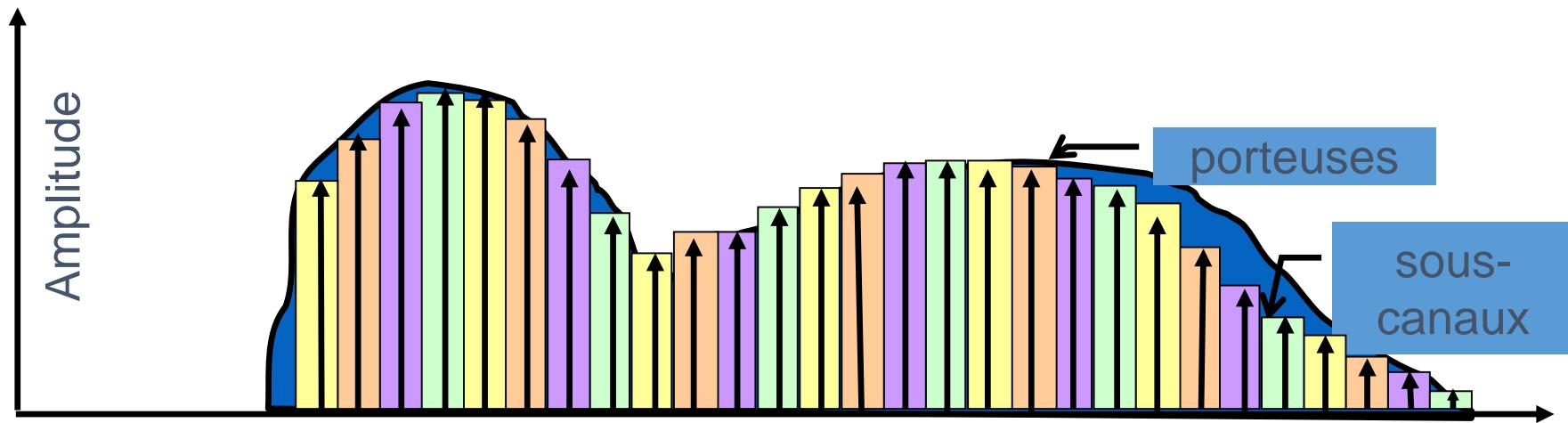
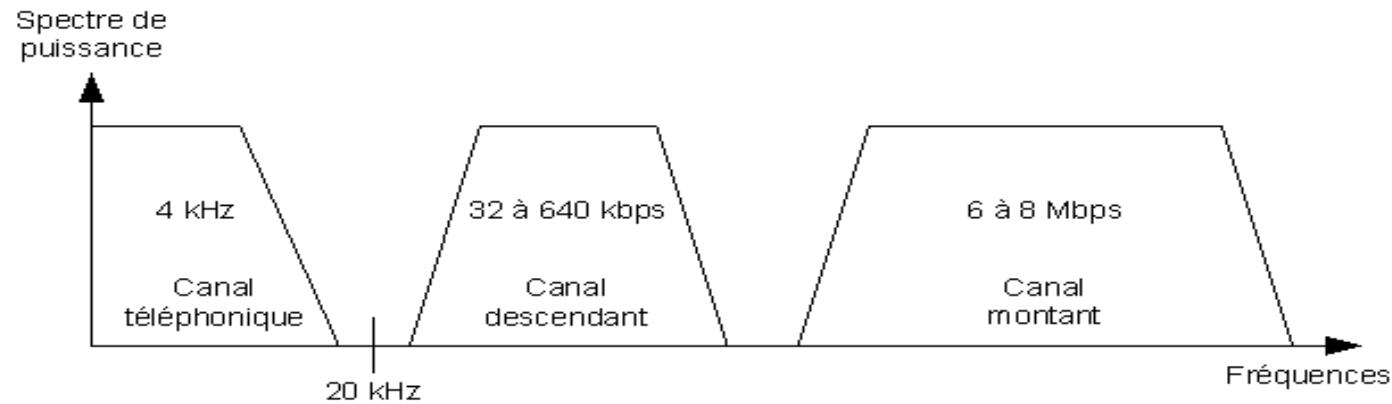
**FDD** (Frequency Division Duplexing) : une fréquence flux descendant et une flux montant



**TDD** (time Division Duplexing) : même fréquence flux descendant et montant



## Techniques de diversité : FDD: exemple de l'ADSL

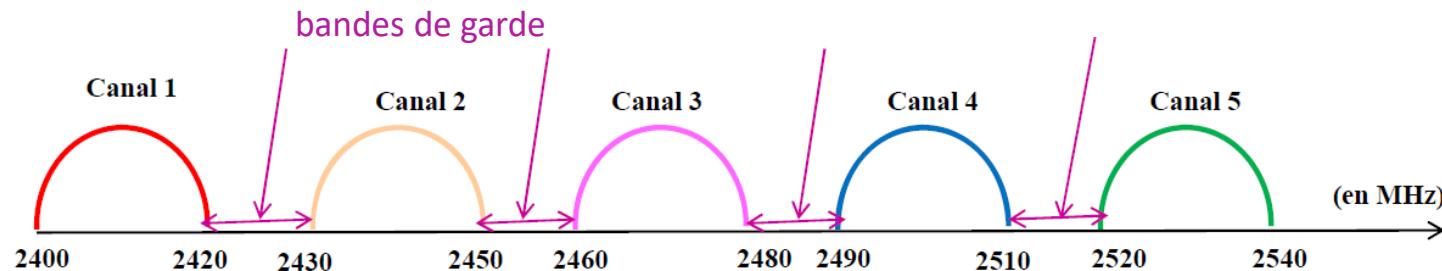


MEDIA 2

MEDIA 3

## Techniques de diversité : multiplexage en fréquence FDMA

FDMA (Frequency Division Multiple Access) : Le spectre de fréquences est subdivisé en canaux (sous-canaux). Chaque émetteur utilise la bande de fréquences qui lui allouée



### Avantages :

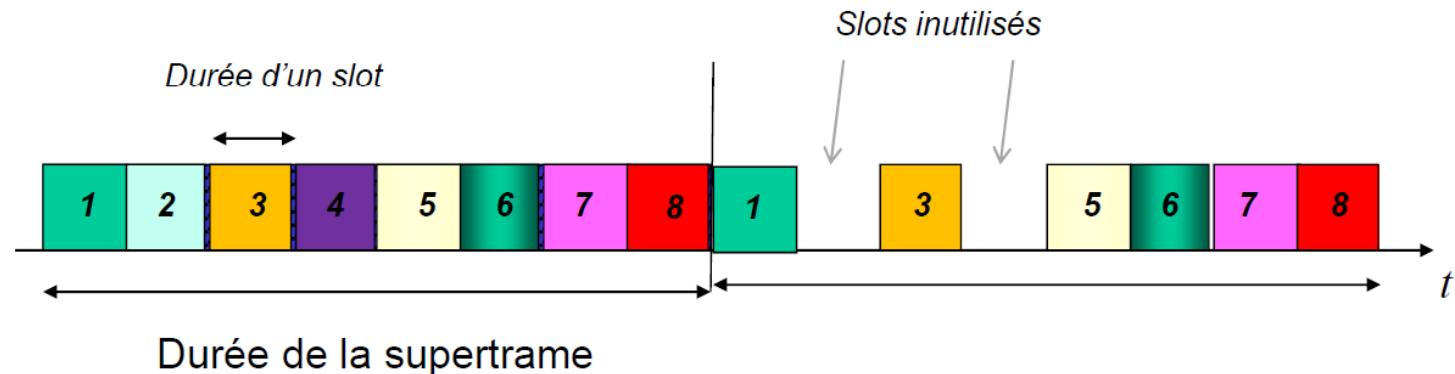
- Algorithme simple qui ne nécessite pas de synchroniser les horloges
- Réutilisation de fréquences dans les systèmes cellulaires
- Equitable quand le trafic est uniforme/constant (par ex. en téléphonie)
- Adaptée à n'importe quel type de modulation

### Inconvénients :

- Sous-bandes perdues pour séparer les canaux (bandes de garde)
- Le débit max dépend de la largeur des canaux
- Nécessite de capacités de filtrage pour s'adapter à différents canaux
- Une bande allouée ne peut plus être utilisée même si la station à laquelle elle a été allouée est silencieuse

## Techniques de diversité : multiplexage en temps TDMA

TDMA (Time Division Multiple Access) : Le temps est découpé en supertrames de même taille. Chaque supertrame est découpée en slots de taille fixe. Dans chaque supertrame, chaque station  $i$  a le droit d'utiliser  $N_i$  slots.



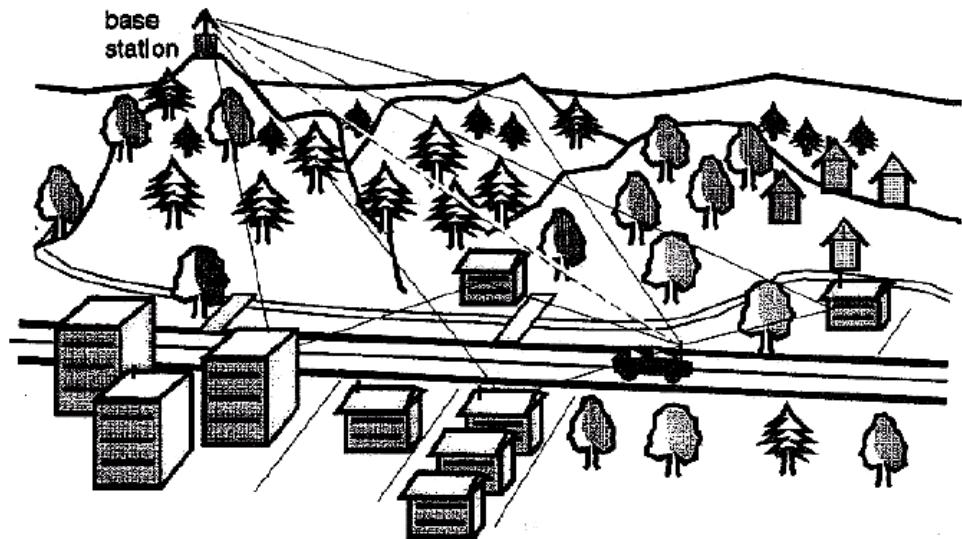
### Avantages :

- Débit flexible avec TDMA statistique
- Pas de fréquences de garde perdues
- Filtre de fréquence simple (pas besoin de s'adapter à différentes bandes)
- Consommation énergétique des équipements réduite

### Inconvénients :

- Nécessité d'horloges synchronisées tout le temps
- Distorsion quand les signaux se propagent sur plusieurs chemins
- Non adaptée aux réseaux de grande taille

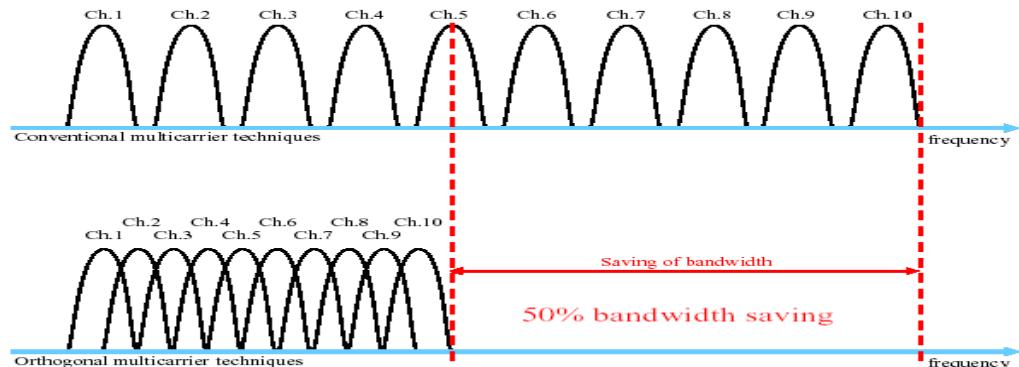
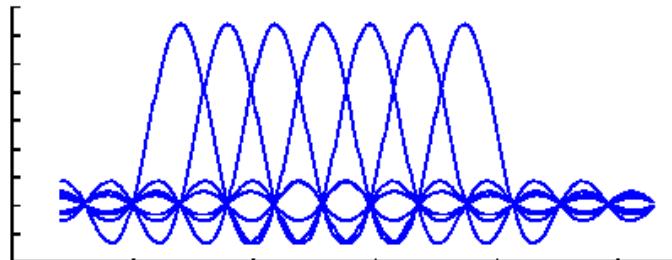
## Techniques de diversité : multiplexage en fréquences orthogonales OFDMA



# MEDIA 6

## Techniques de diversité : multiplexage en fréquences orthogonales OFDMA

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) : Le spectre de fréquences est subdivisé en canaux en utilisant des signaux orthogonaux les uns aux autres pour les sous-porteuses contiguës.



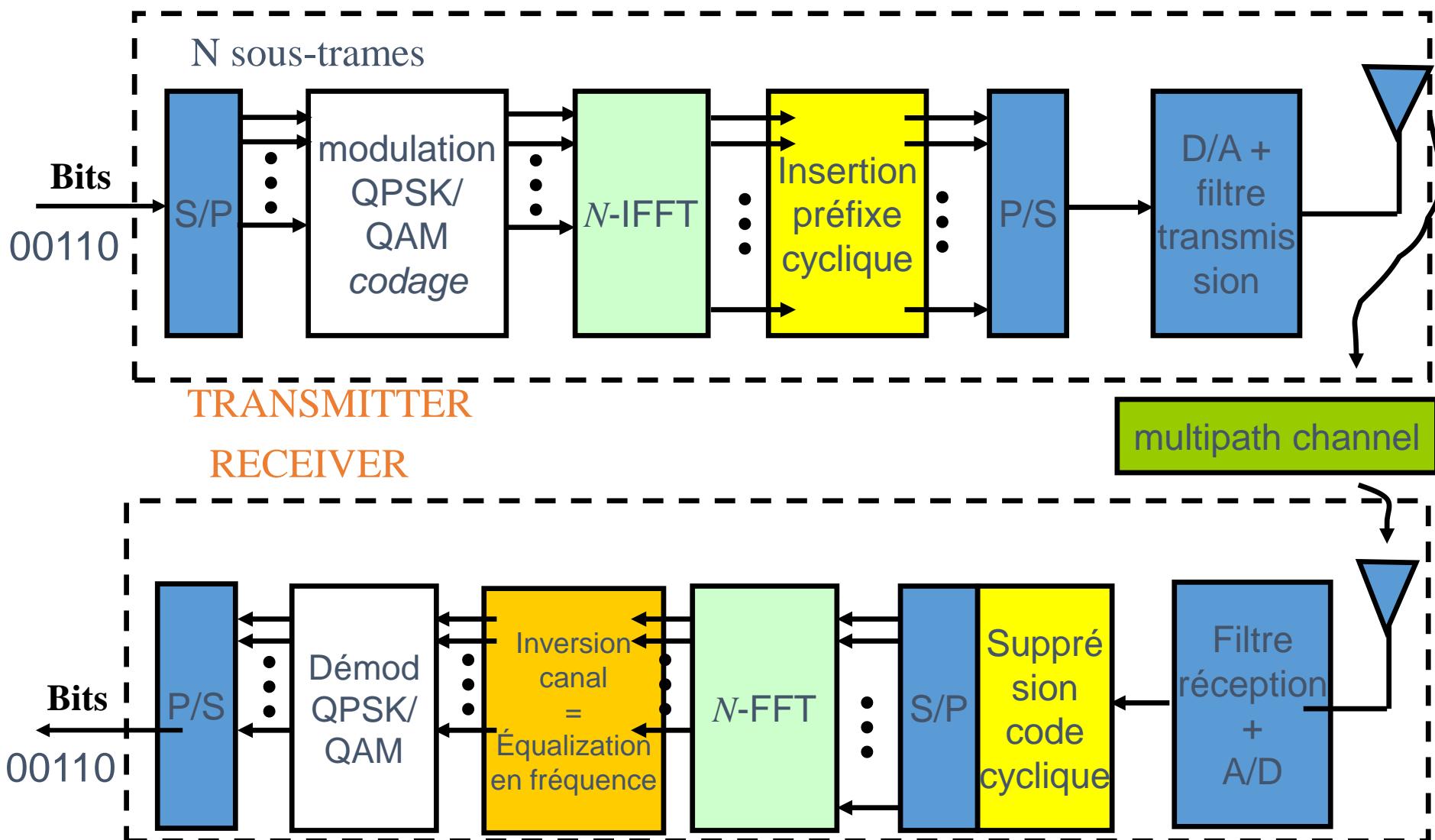
### **Avantages :**

- Permet de s'affranchir des multi-trajets en liant les éléments indépendants
- Meilleure efficacité spectrale : utilisation optimale de la bande de fréquence
- Implémenter facile par FFT, ne nécessite pas d'égalisation
- Adaptation facile de la puissance d'émission sur chaque canal au niveau min suffisant
- Codage et entrelacement adapté qui permet d'améliorer le taux d'erreur

### **Inconvénients :**

- Synchronisation très précise des fréquences hertziennes et des horloges
- Nécessité d'avoir des composants linéaires (ex. amplificateurs) - éviter distorsions
- Apparition des interférences inter-porteuses

## Techniques de diversité : multiplexage en fréquences orthogonales OFDMA

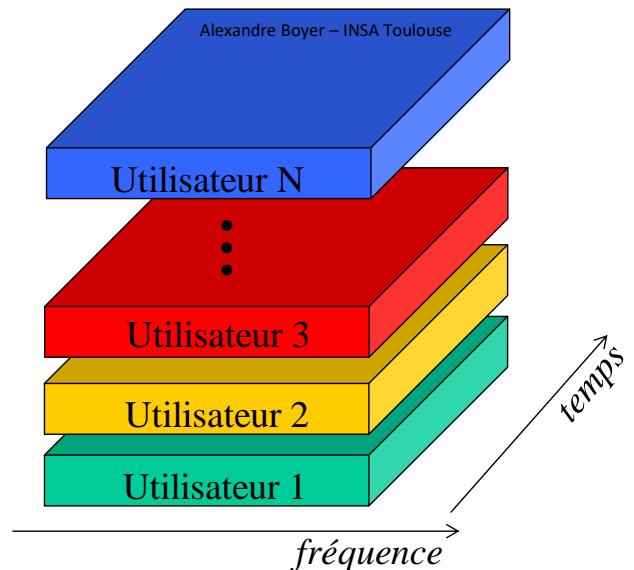


MEDIA 8

## Techniques de diversité : multiplexage en fréquences orthogonales (W)CDMA

W-CDMA = Wide band CDMA (5 MHz).

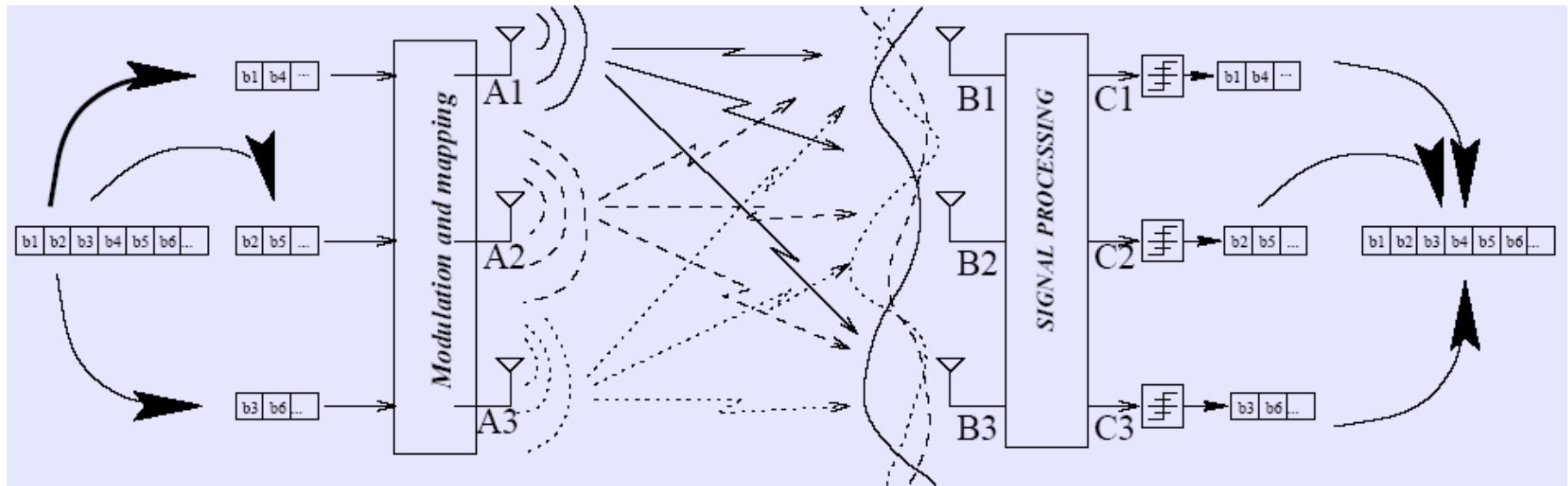
- Accès multiple par répartition de code (CDMA).
- Les utilisateurs émettent simultanément sur la même bande de fréquence.
- Modulation à séquence directe (DS-SS) :
  - l'utilisation de codes uniques, pseudo-aléatoires et orthogonaux permet de séparer les utilisateurs.
- Utilisation plus efficace du spectre
- Partage de la puissance et de l'interférence !



MEDIA 9  
MEDIA 10

## Techniques de diversité : multiplexage spatial MIMO

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) : utilisation des réseaux d'antennes à l'émission et/ou à la réception afin d'améliorer la qualité du rapport signal sur bruit (SNR) et / ou le débit de transmission

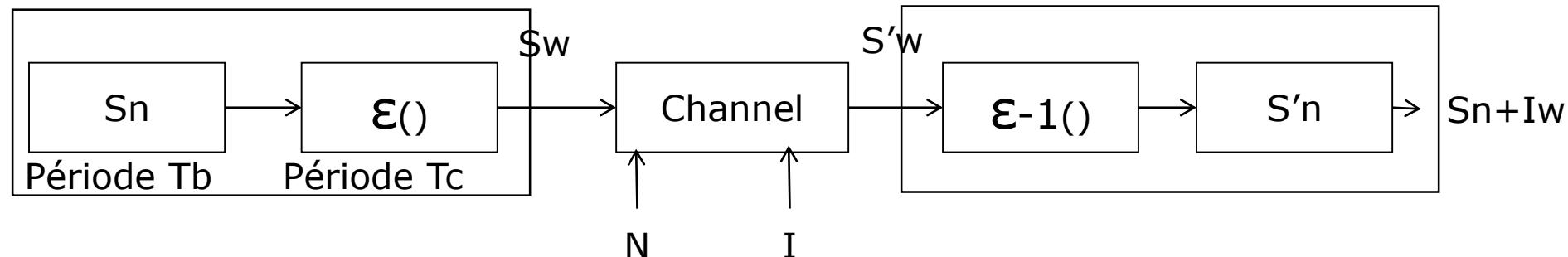


Chaque antenne en émission devient une source d'information différente pour les antennes de réception

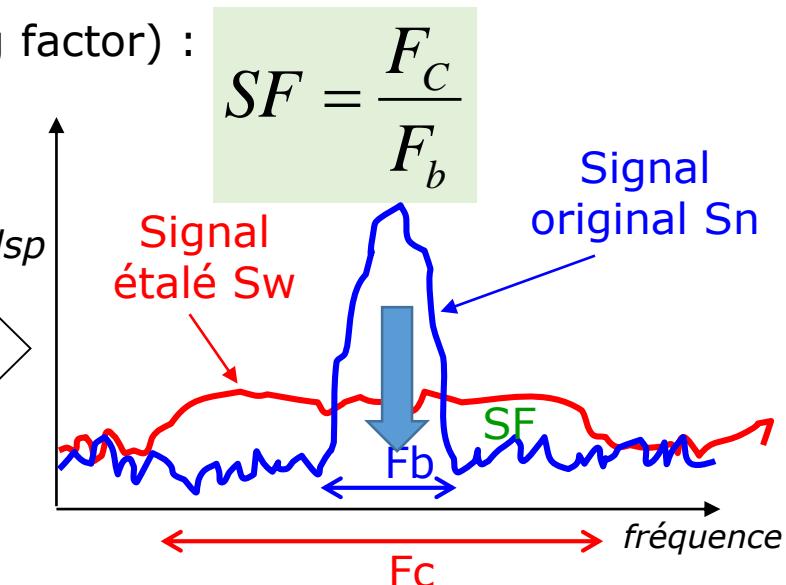
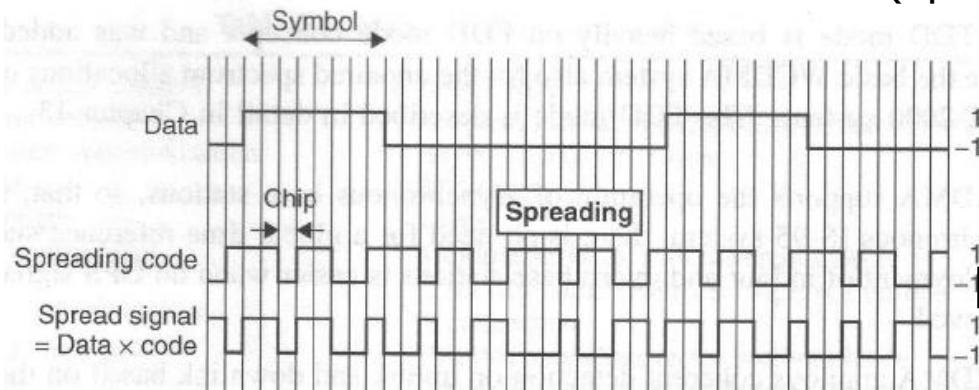
L'information est divisée en autant de flux que d'antennes d'émission -> augmentation du débit proportionnelle au nombre d'antennes d'émission

## Modulation à étalement de spectre - principe

- Chaque bit du signal à transmettre est multiplié (xor) par un code pseudo-aléatoire.
- La séquence du code est unique, elle constitue aussi la clé de codage et est constitué de N éléments appelés CHIP.

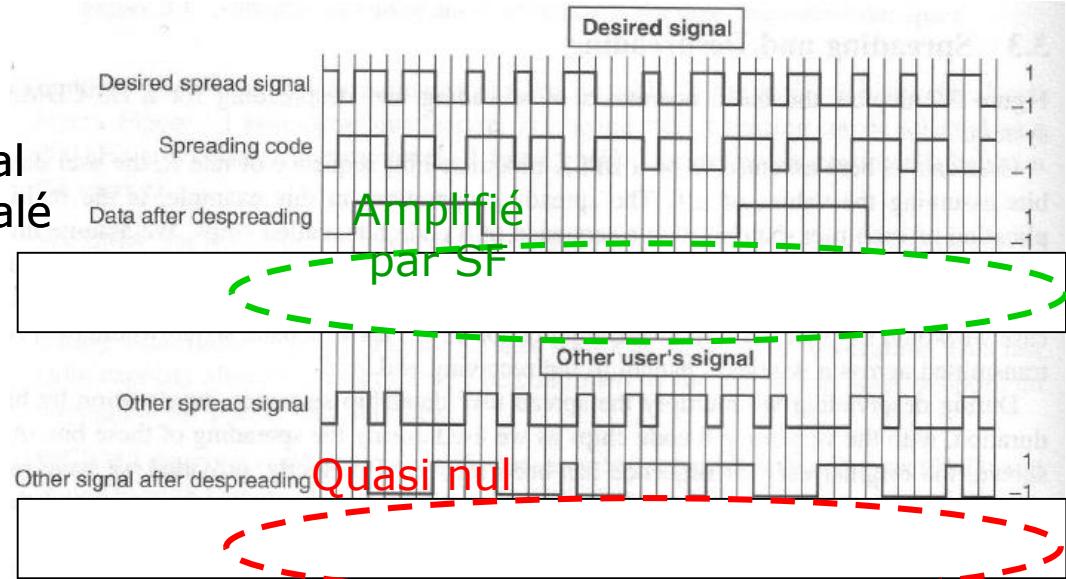
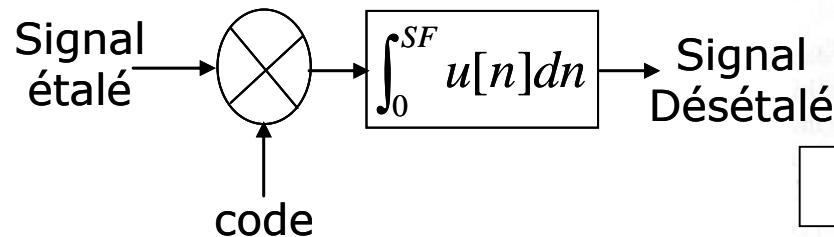


Facteur d'étalement (spreading factor) :



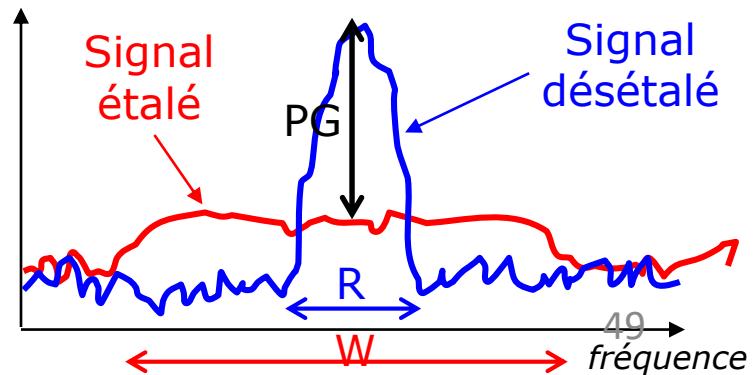
## Modulation à étalement de spectre – tolérance aux interférences bande étroite

Utilisation d'un récepteur à corrélation, parfaitement synchronisé avec le signal étalé :

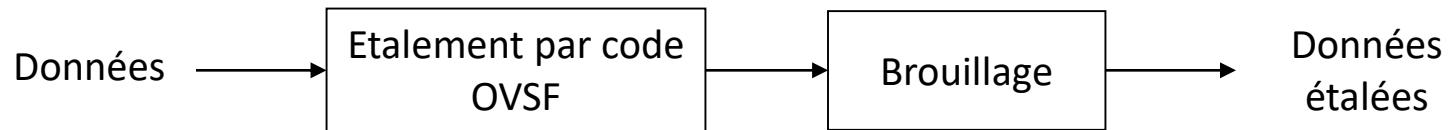


Gain de traitement :

$$PG = 10 \log(SF) = 10 \log\left(\frac{W}{R}\right)$$



- En UMTS : utilisation de codes Orthogonal Variable Spreading Factor (OVSF) pour étaler puis codes de brouillage (scrambling code) pour le caractère pseudo-aléatoire.
- Chaque cellule et mobile sont caractérisés par un code de brouillage unique.



- L'utilisation des codes OVSF suppose une parfaite synchronisation des codes émis, possibles uniquement en liaison descendante !
  - En liaison descendante : discrimination par les codes OVSF.
  - En liaison montante : discrimination par les codes de brouillage.
- Dans la pratique, les codes ne sont pas parfaitement orthogonaux et la propagation multi-trajet conduit à dégrader l'orthogonalité entre les séquences de codage.
- Caractérisation par un facteur d'orthogonalité  $\alpha$  compris en 0 et 1. Les valeurs typiques sont comprises entre 0.4 et 0.9.

$$\text{dégradation SIR} = (1 - \alpha)$$