



La radio : support de la mobilité

Jean-Marie Gorce
CITI, INSA Lyon

Introduction

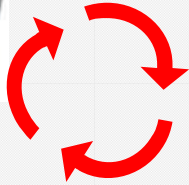
- Les radiocommunications :
 - elles exploitent le spectre électromagnétique
 - types de liaisons radio
 - simplex / duplex
 - liaisons point à point / diffusion /cellulaire
 - terrestres / spatiales
 - système privé / public / militaire

Systemes



GSM 900 MHz
DCS 1800 MHz
UMTS 2 GHz

Analogique 800 MHz
DECT ~1900 MHz



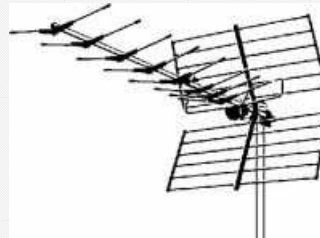
Radar anticollision ~80 GHz
Télépéage ~6 GHz
Ouverture à distance 433 MHz



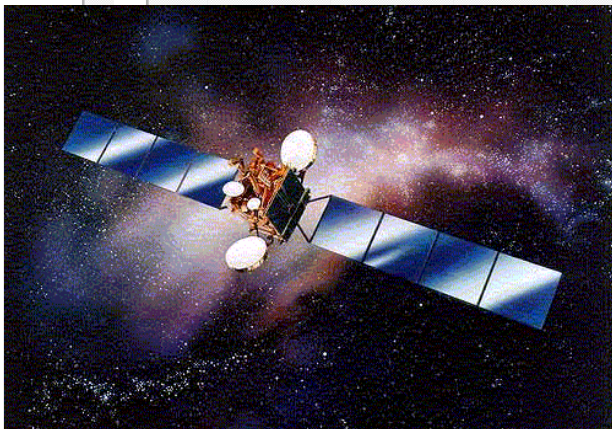
Wifi / Bluetooth / UWB
2.4 à 6 GHz



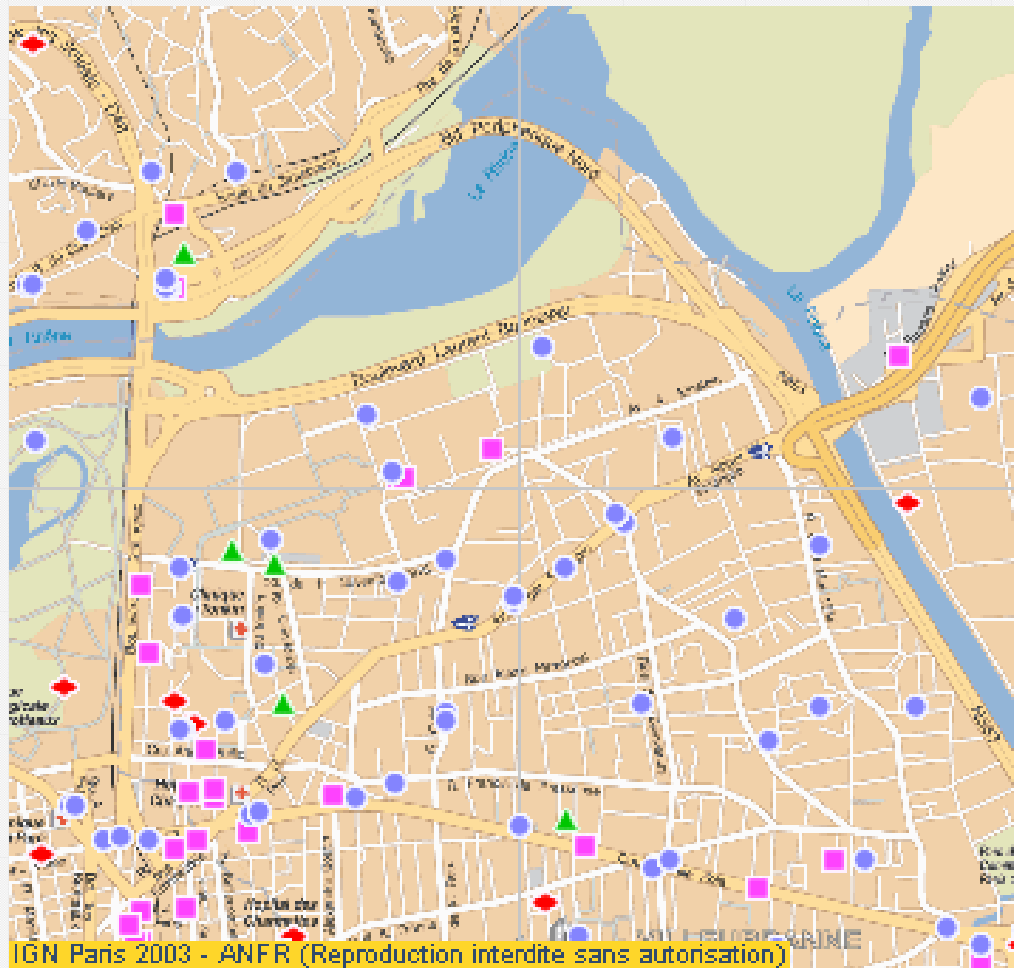
TV terrestre
500 MHz



Systemes satellites 1 à 45 GHz
(Ex : Télévision 12 GHz, GPS 1.5 GHz)



Systemes



● Radiotéléphonie

▲ Radiodiffusion

■ Autres stations

✠ Mesures de champs

© ANRF :

<http://www.cartoradio.fr>

Les systèmes

- La diffusion
- La liaison point à point
- L'accès fixe
- Les radio-mobiles
- Les réseaux cellulaires
- Les réseaux ad hoc ou réseaux maillés

Systemes

- Diffusion d'information sur 1 zone géographique.

- Caractéristiques

- 1 liaison simplex descendant)
- 1 émetteur fixe omnidirectionnel
- des récepteurs dir

- Applications

- TV, radiophonie, signalisation...



Systemes

- Faisceau hertzien : liaison inter-sites
- Caracteristiques :
 - 1 liaison simplex ou duplex
 - 2 E/R fortement directionnels et bien orientés
 - points relais (terrestres, satellites)
- Applications
 - ponts radios, liaisons satellites



<http://www.sfe-france.com>

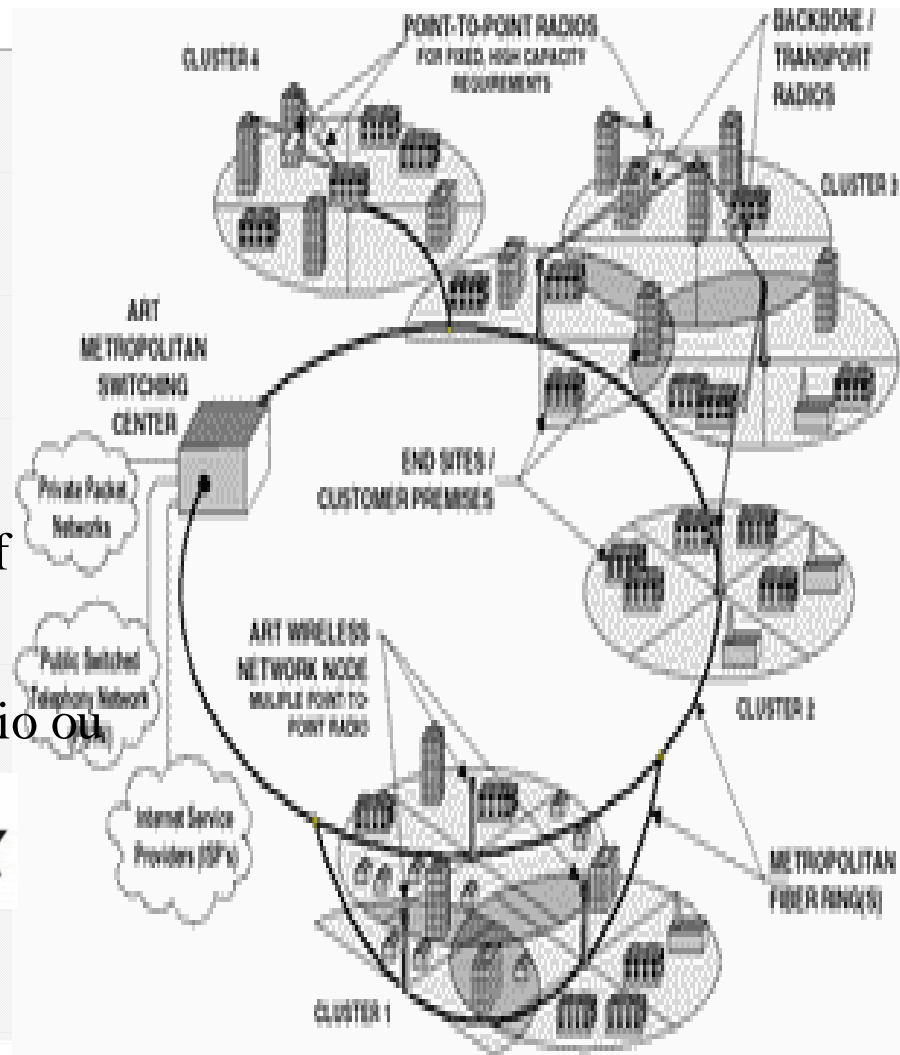


CITI - Dept Télécoms

<http://panneauxcols.free.fr/Relais/relais.htm>

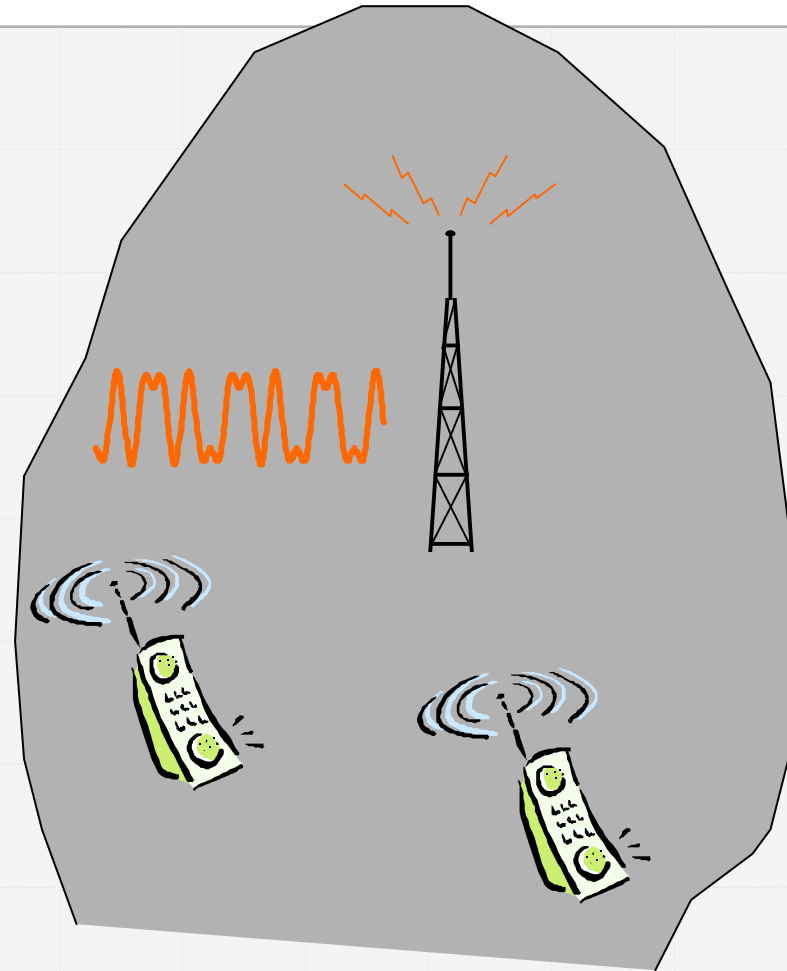
Systemes

- L'accès fixe
- Relais Multi-points
- Caracteristiques :
 - 1 liaison duplex
 - 1E/R omnidirectionnel
 - 1 E/R fortement directif
- Applications
 - La Boucle Locale (Radio ou satellite)



Systemes

- Radio-mobiles:
transmission entre 1 point
d'accès fixe et 1
utilisateur mobile
- Caracteristiques :
 - 1 liaison duplex
 - 2 E/R omnidirectionnel
- Applications
 - radio-taxis, medecins ...



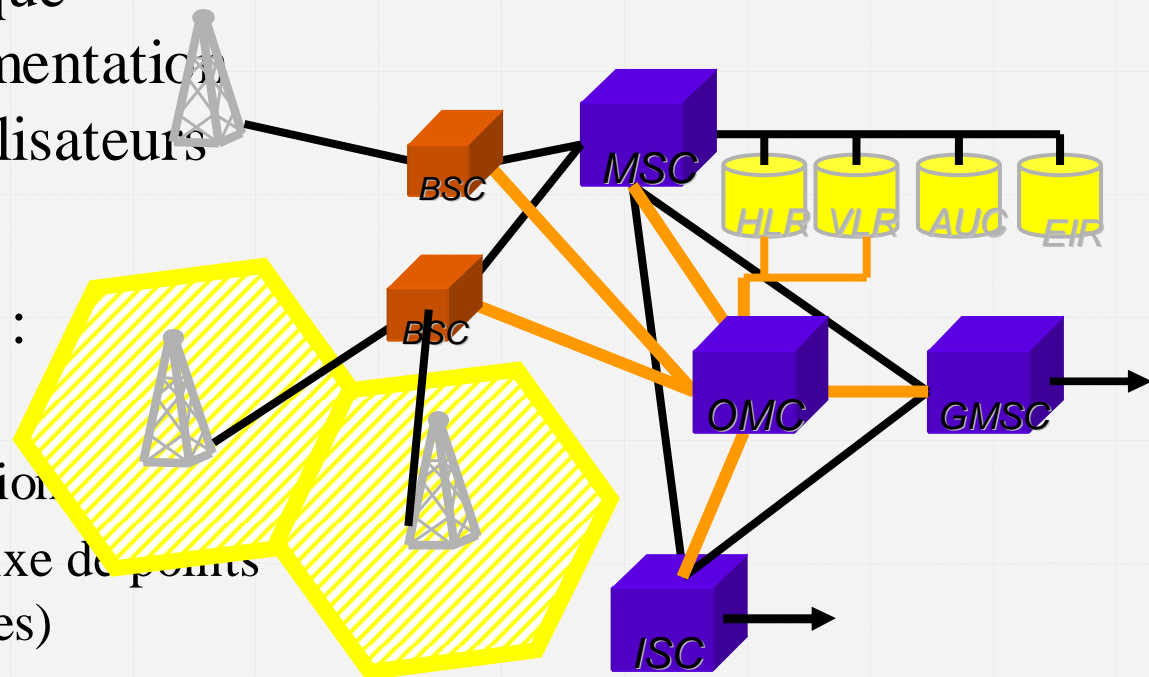
Systemes

- Cellulaire : extension de la zone géographique couverte et augmentation du nombre d'utilisateurs

- Caractéristiques :
 - liaisons duplex
 - E/R omnidirectionnel
 - 1 sous-réseau fixe de points d'accès (cellules)

- Applications

- la téléphonie mobile, les réseaux radio



Systemes

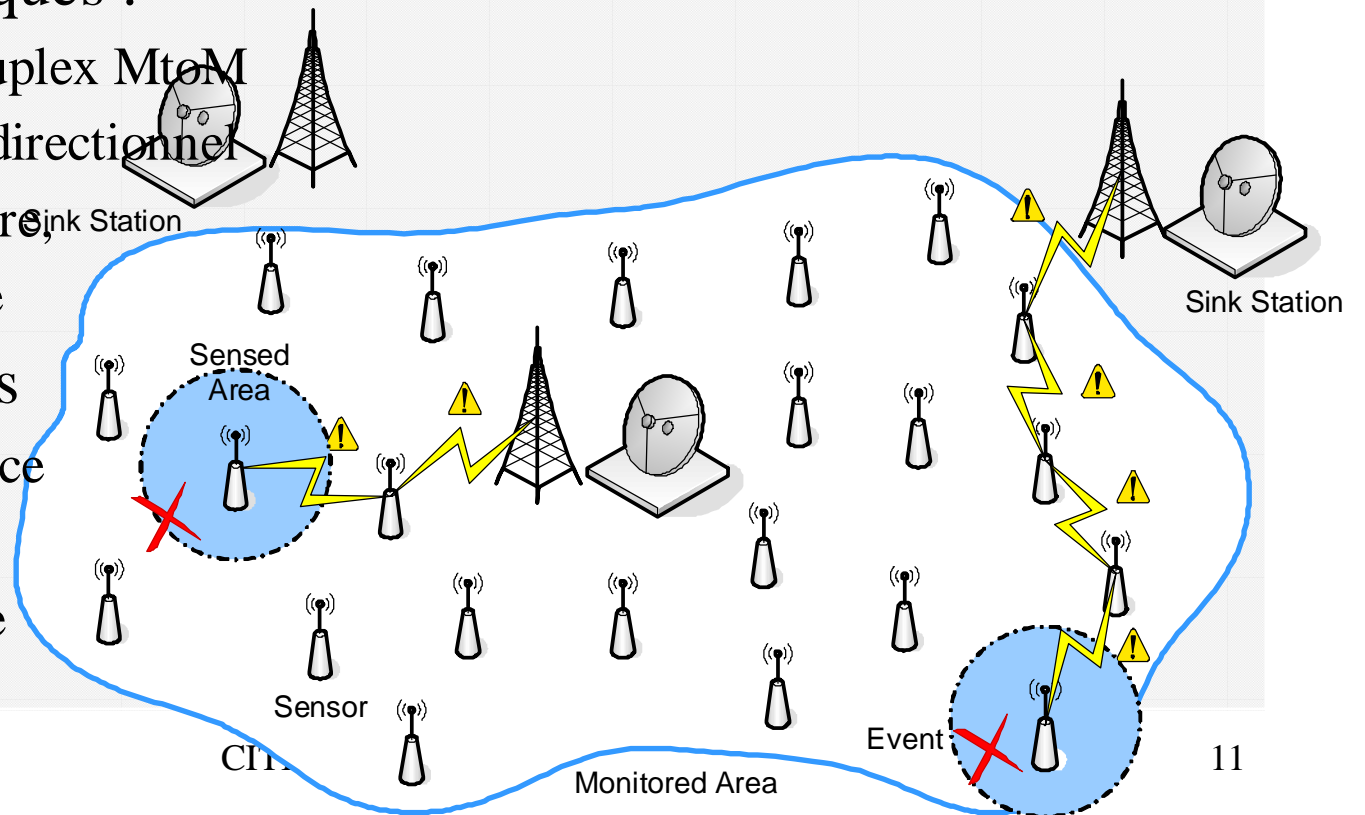
■ Capteurs et *ad hoc*

■ Caracteristiques :

- liaisons duplex MtoM
- E/R omnidirectionnel
- Énergie rare
- coût faible

■ Applications

- Surveillance
- Détection
- domotique



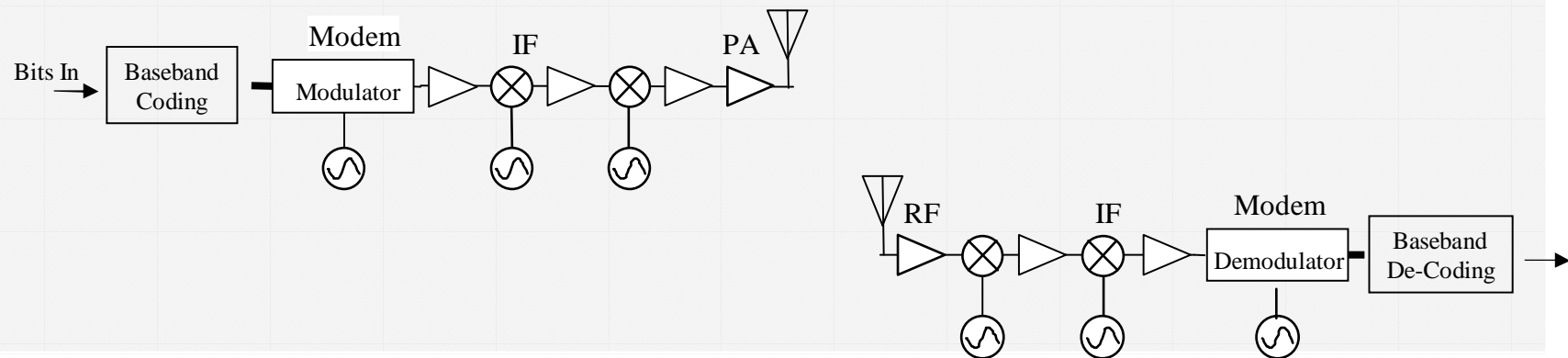
Plan général

I. Caractéristiques des ressources radio

II. Propagation et bilan de liaison

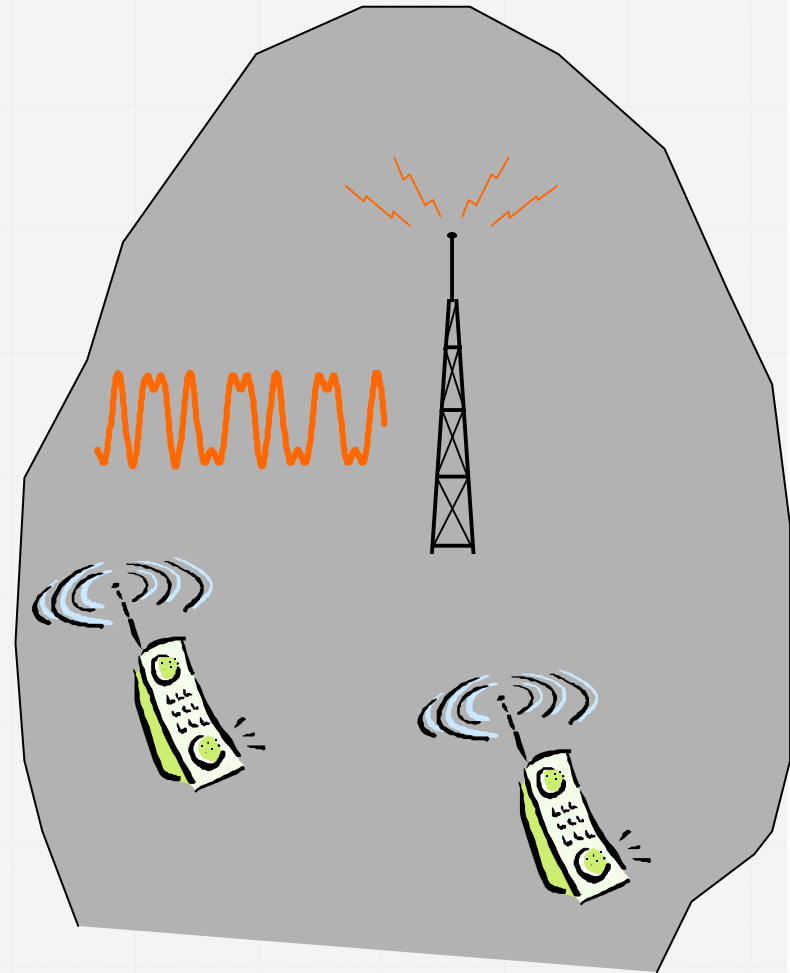
III. Partage des ressources

IV. Cellulaire

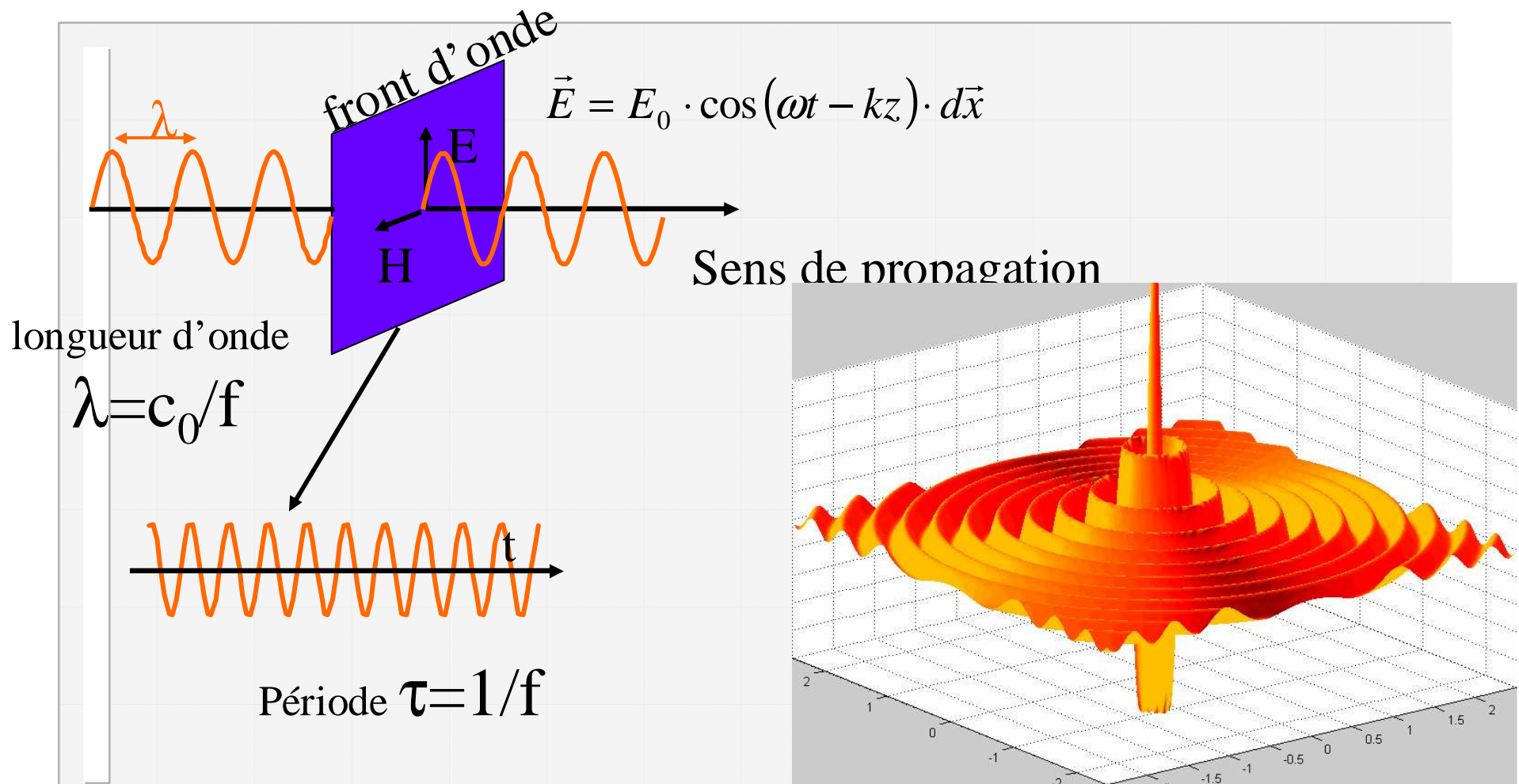


I- Caractéristiques des ressources radio

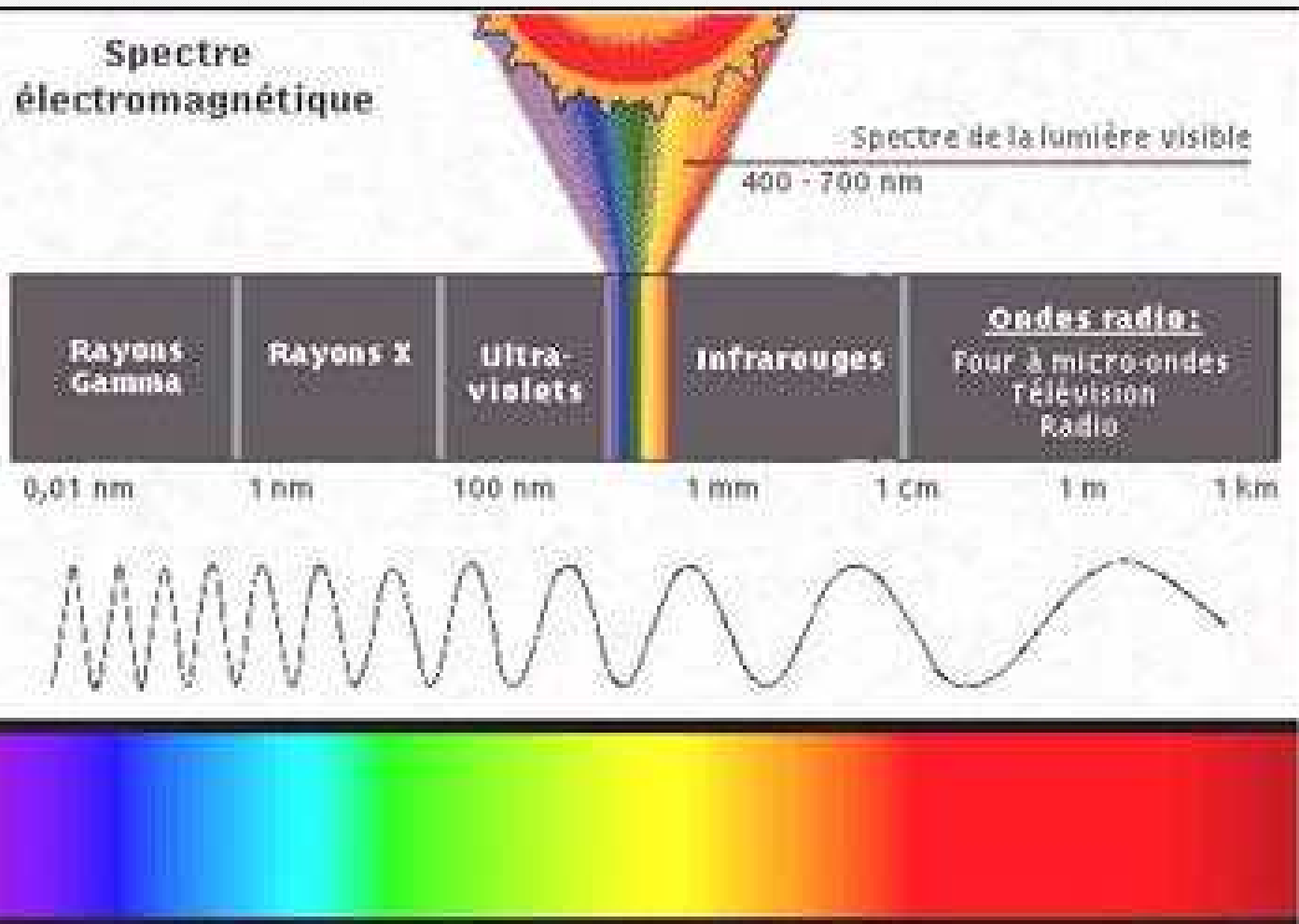
- **1. Le spectre radio**
- **2. La modulation**
- **3. La capacité de canal**
- **4. Synthèse**



I-1. Le spectre radio



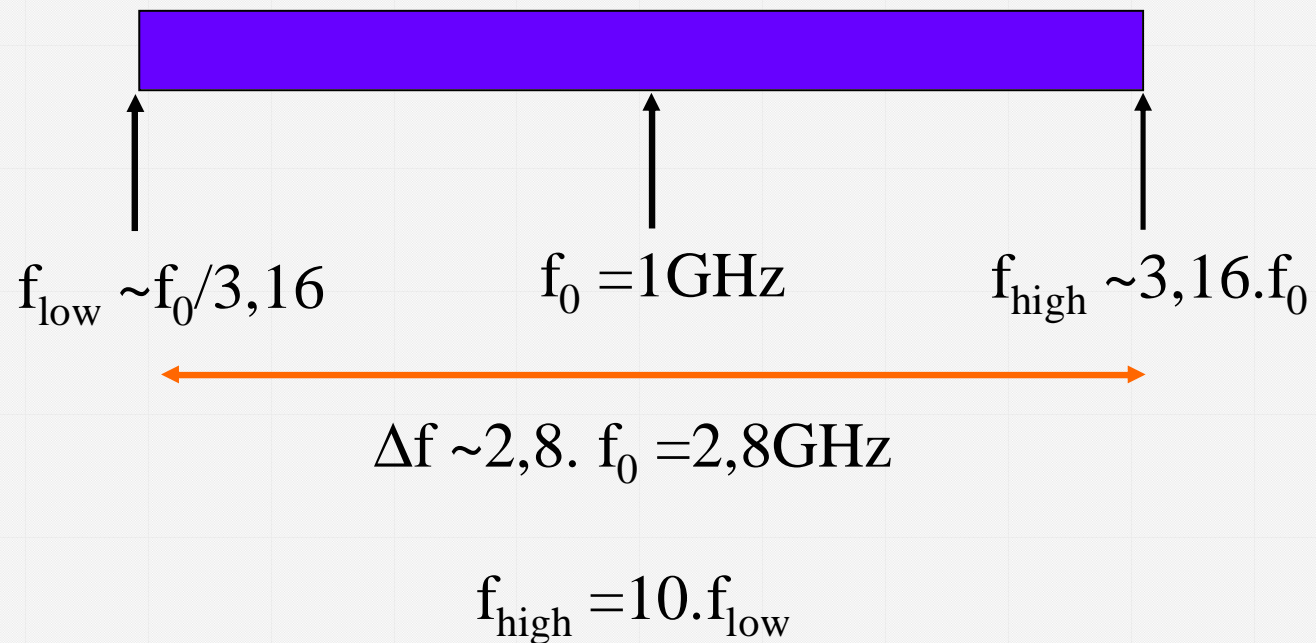
<http://www.ilemaths.net> → onde électromagnétique
<http://www.cndp.fr/revueTDC/699-40703.htm>

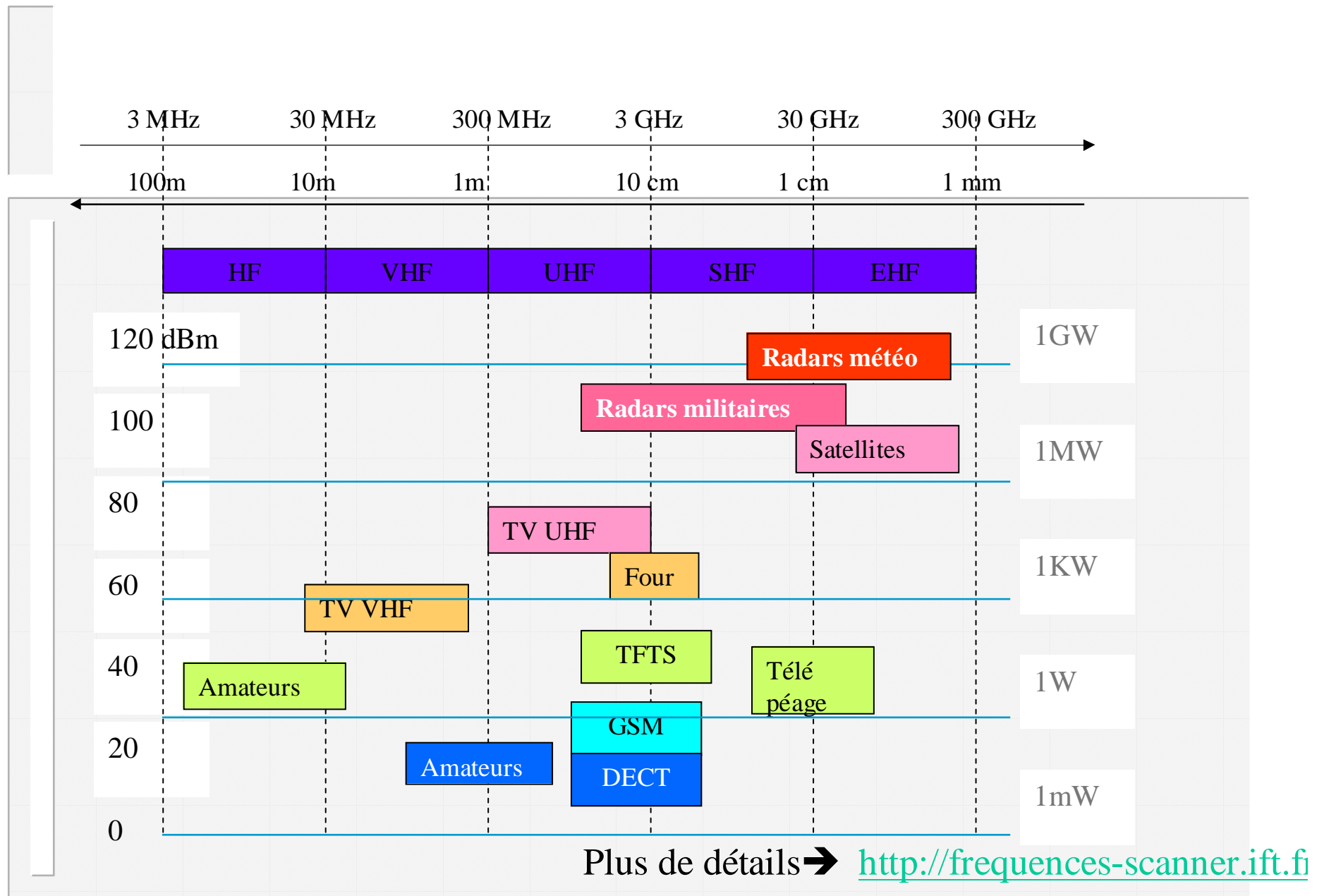


■ Définition de bandes (ex: UHF)

■ *normalisation*

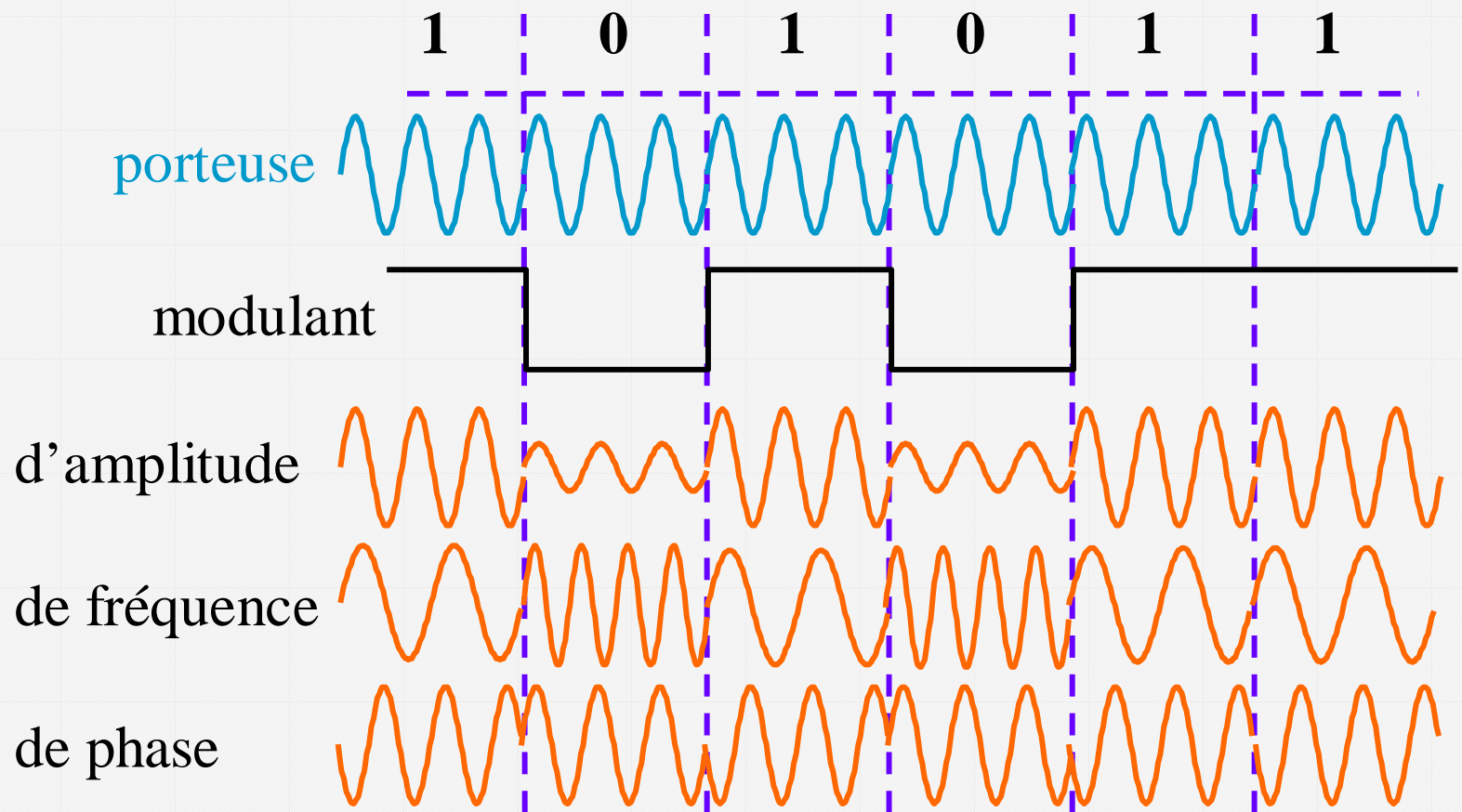
(régulier sur une échelle logarithmique*)





I-2. La modulation

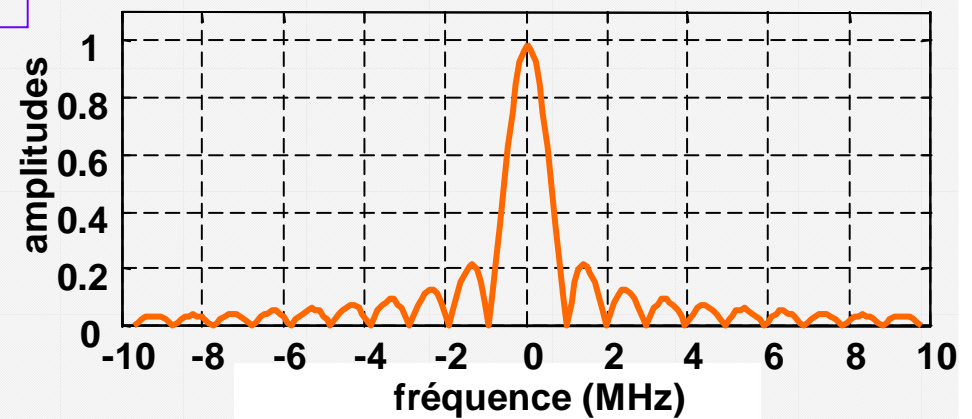
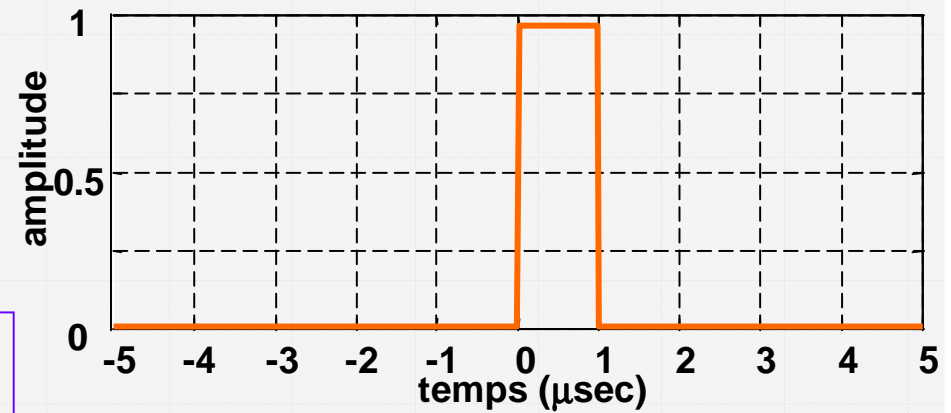
A) principes



I-2. La modulation

■ spectre d'un symbole

$\Delta f = 2/T$ (lobe principal)
 $\Delta f = 1/T$ (lobes secondaires)

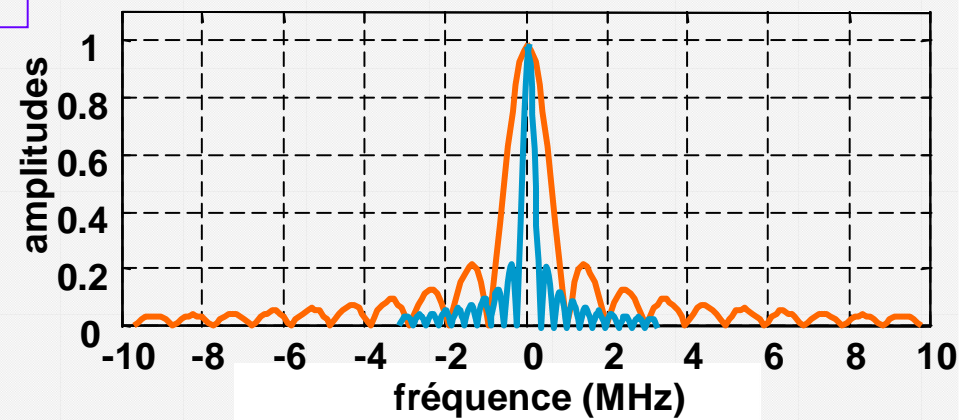
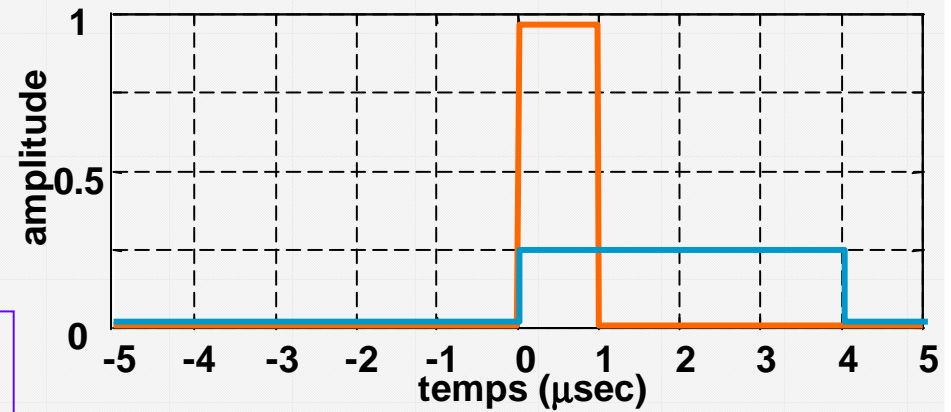


I-2. La modulation

■ spectre d'un symbole

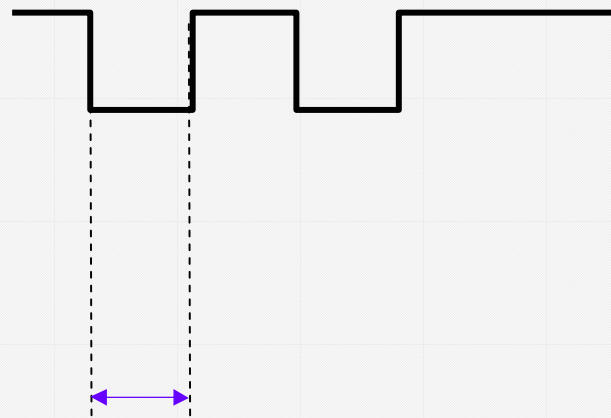
$\Delta f = 2/T$ (lobe principal)

$\Delta f = 1/T$ (lobes secondaires)



I-2. La modulation

■ Occupation spectrale

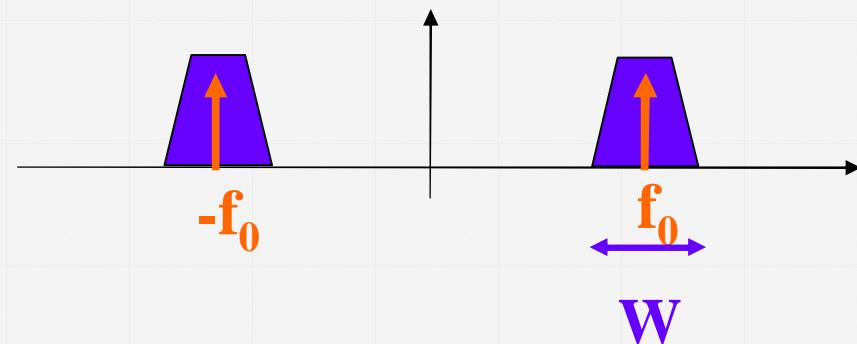


T_s

temps symbole

$$R_s = 1/T_s$$

débit symbole



$$W = k/T_s$$

$k \sim 1,6$

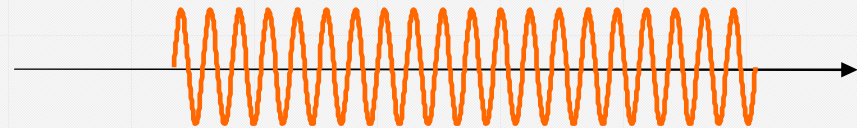
■ B) Vision unifiée des modulations

La porteuse $p(t) = A_0 \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0)$

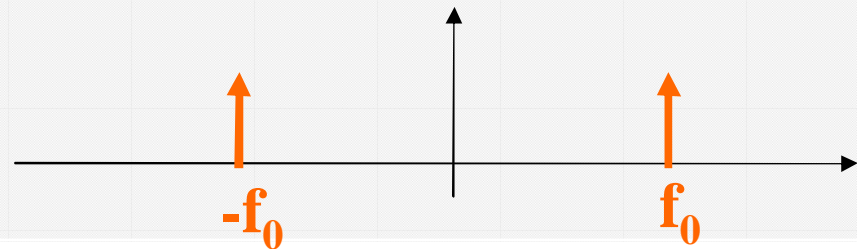
(rem : en général $A_0=1, \varphi_0=0$)

Représentation :

en temps



en fréquence



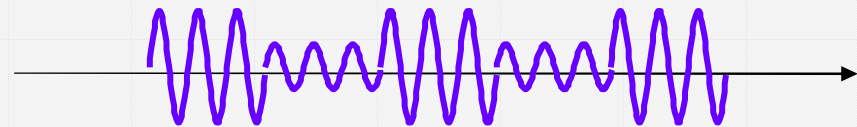
I-2. La modulation

- Moduler = faire varier légèrement la porteuse tel que la largeur de bande $W \ll f_0$.

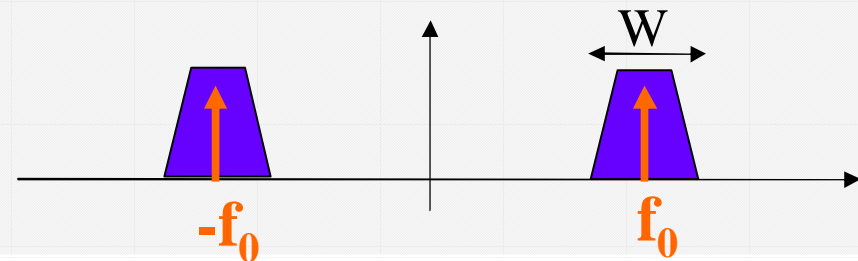
Le signal RF $s_{RF}(t) = A(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t))$

Représentation :

en temps



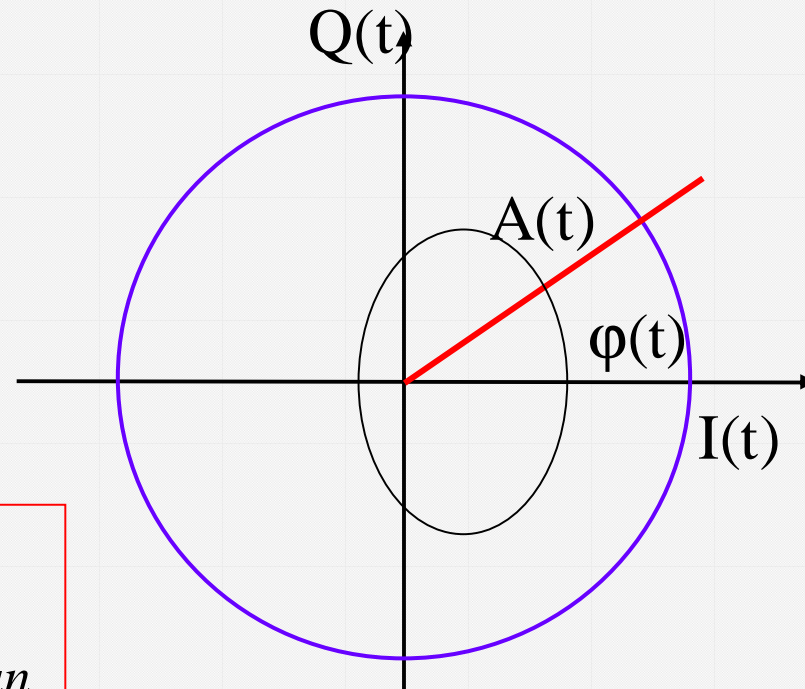
en fréquence



I-2. La modulation

■ Constellation

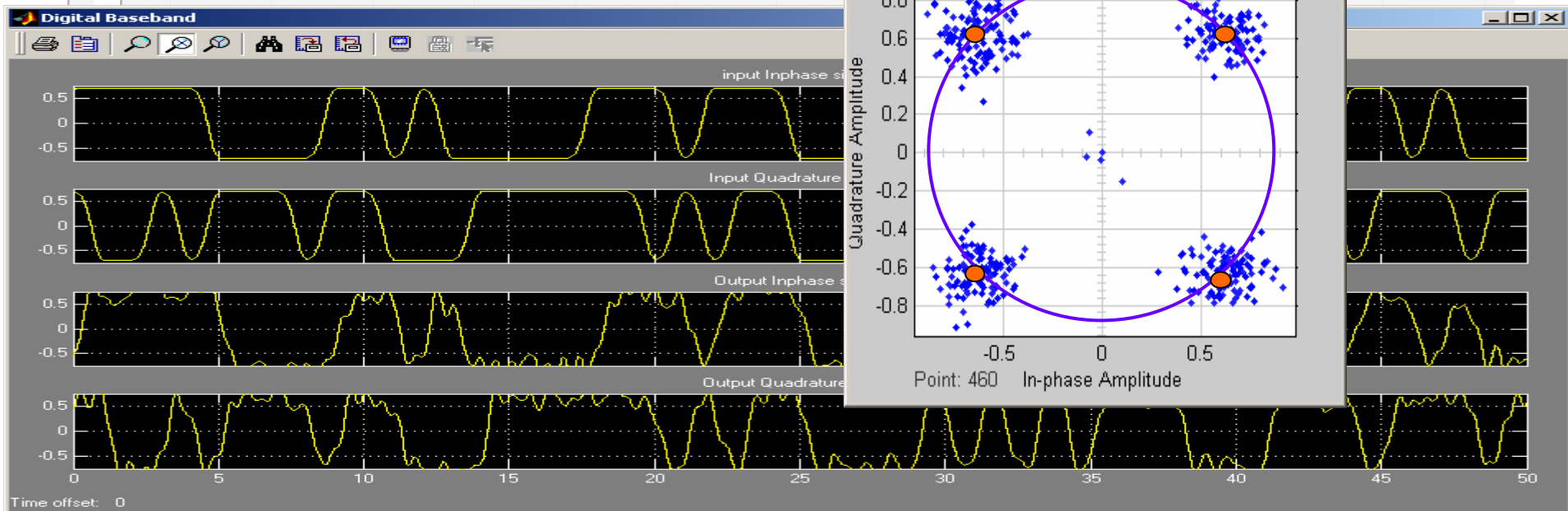
*Représente les trajectoires
d'une modulation d'amplitude,
de phase et/ou de fréquence sur un
plan de phase*



I-2. La modulation

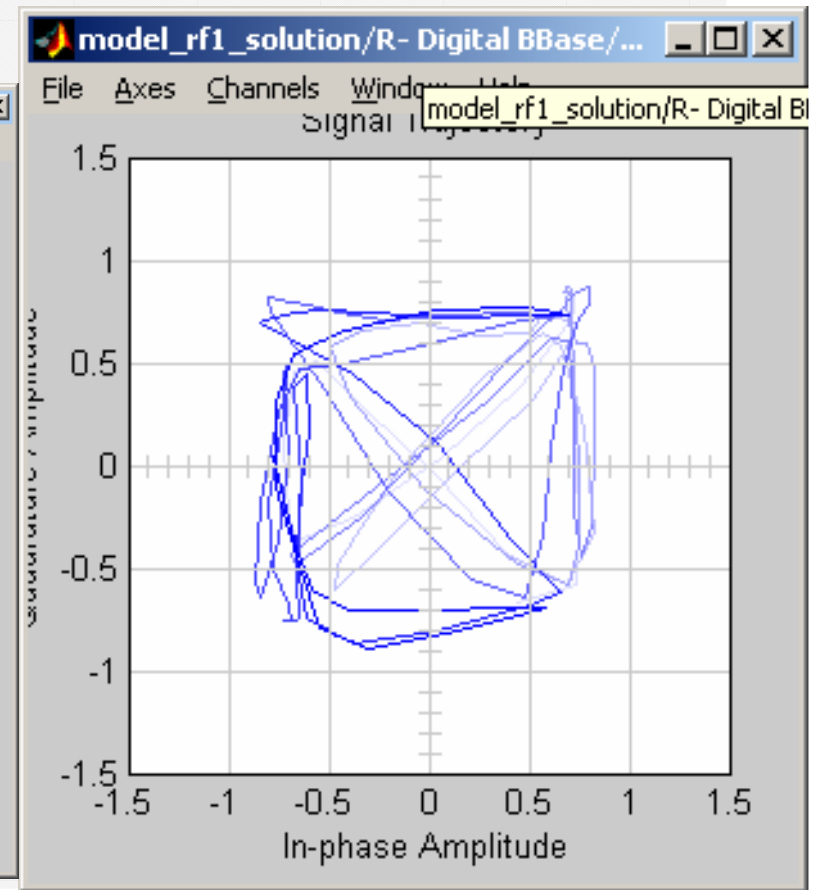
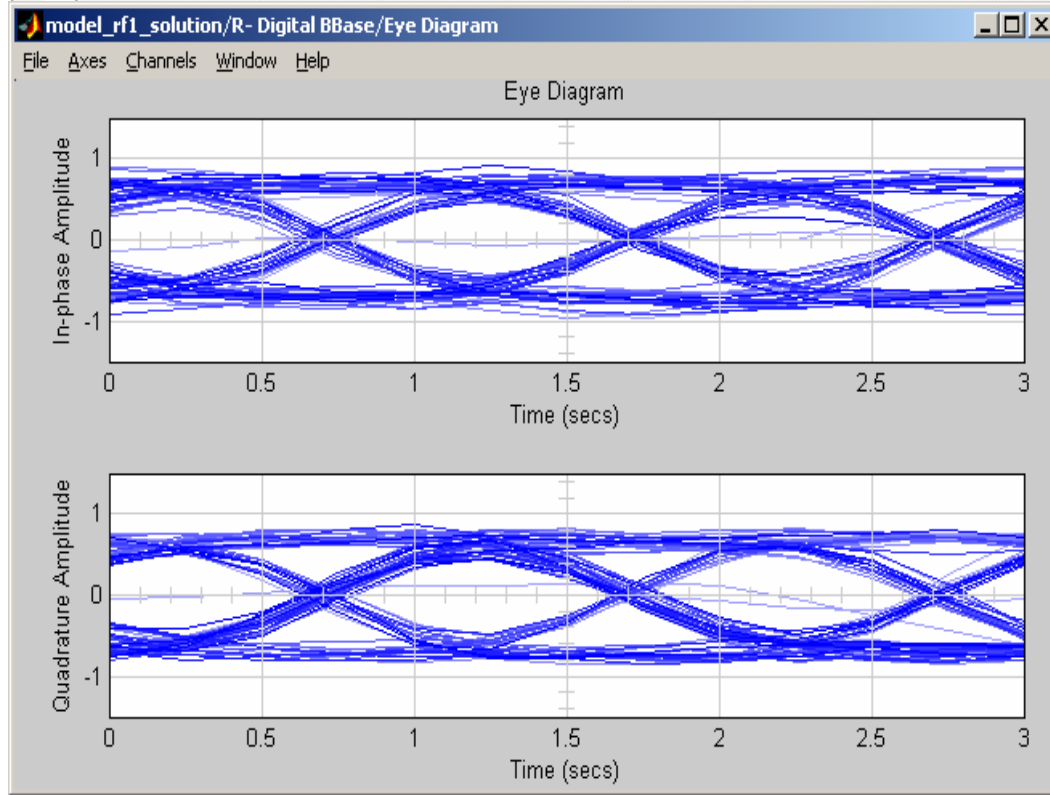
– C) Représentation : Constellation

$$s_{RF}(t) = m_I(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) + m_Q(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t)$$



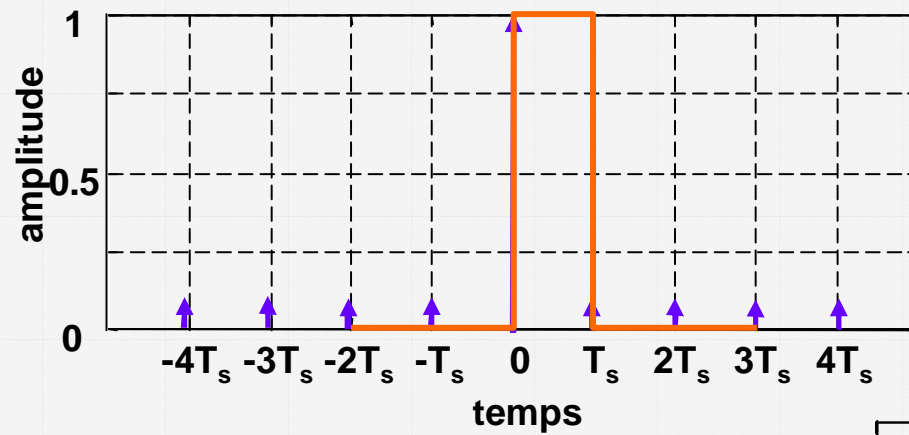
I-2. La modulation

– Autres représentations



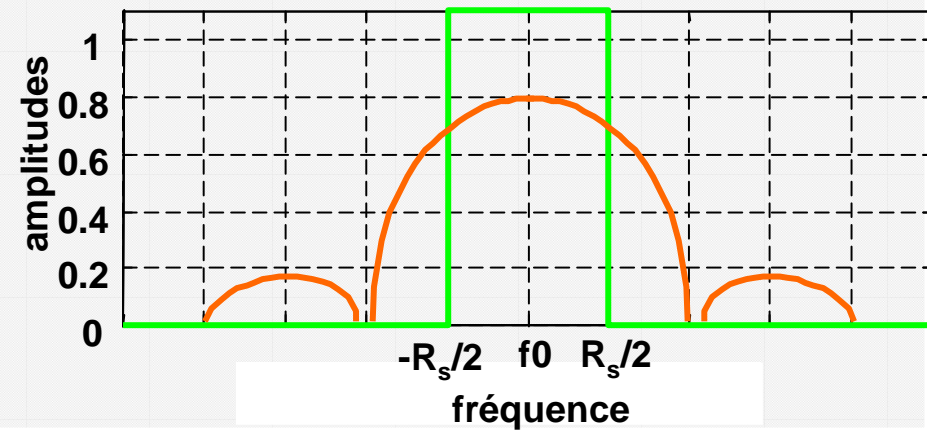
I-2. La modulation

- D) Maîtriser l'occupation spectrale



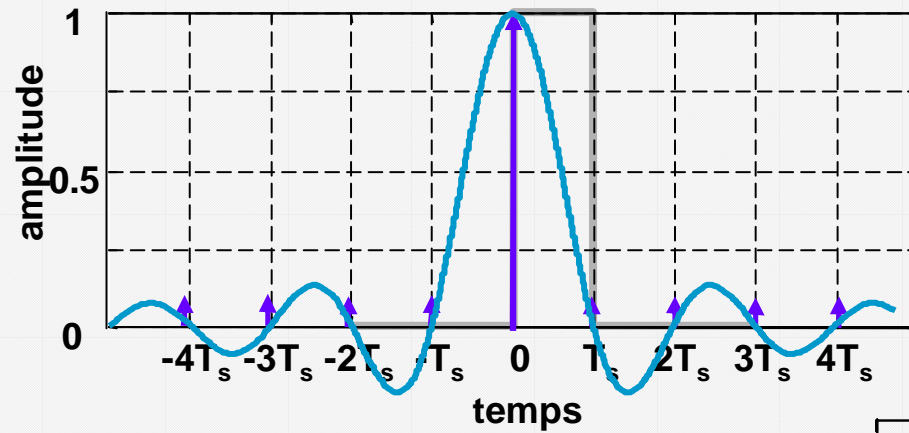
Durée symbole : T_s

Largeur spectrale : infinie



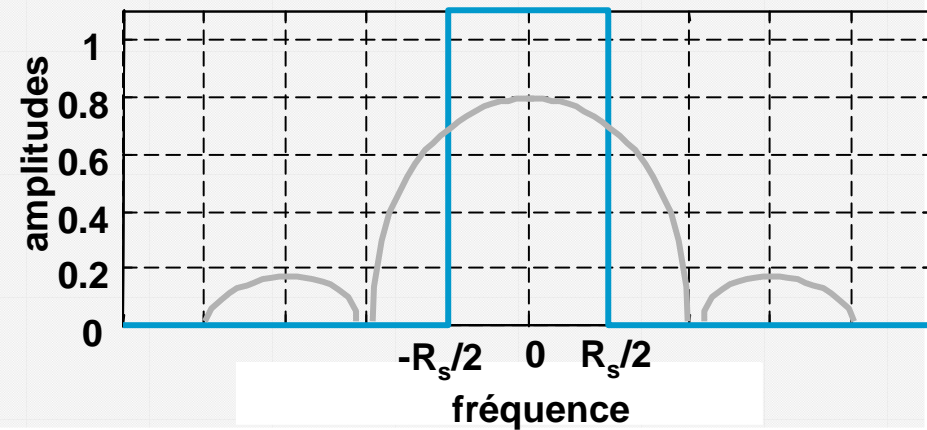
I-2. La modulation

- D) Maîtriser l'occupation spectrale



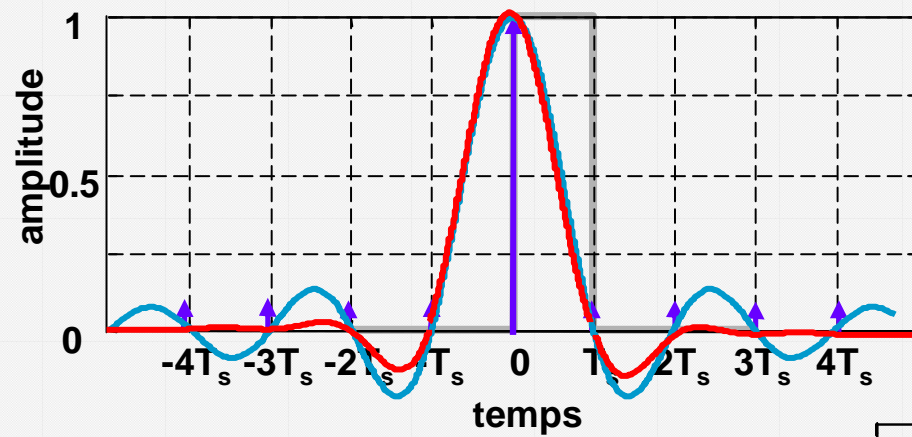
Durée symbole :
infinie

Largeur spectrale : R_s .



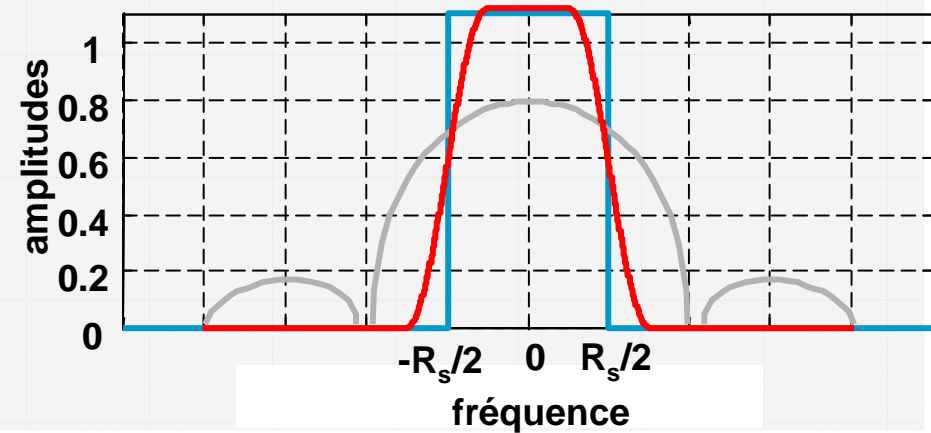
I-2. La modulation

- D) Maîtriser l'occupation spectrale



Durée symbole :
infinie

Largeur spectrale : $1,6R_s$.



I-3. Capacité de canal

- A) Capacité de canal : définition
 - la capacité d'un canal est le débit maximal admissible soit :
 - sans erreur (théorique)
 - pour un taux d'erreur donnée (pratique)
 - la capacité est égale au produit du débit symbole maximal par le nombre de bits/symbole.

$$C = \max(R_s) \cdot \max(Nb)$$

I-3. Capacité de canal

– B) Valeur théorique

■ La capacité de Canal (Shannon-Hartley) :

- le débit symbole max : $R_s = W$ (symbole=sinus cardinal)
- le nombre de bits par symbole : $N_b = \log_2(1+SNR)$
- dans un canal à bruit additif gaussien, il est possible de trouver une méthode de codage, telle que pour tout $R_b \Leftrightarrow C$, la transmission soit sans erreur

$$C = W \cdot \log_2(1 + SNR)$$

SNR : rapport des puissances entre signal et bruit

I-3. Capacité de canal

– C) Capacité sur canal AWGN

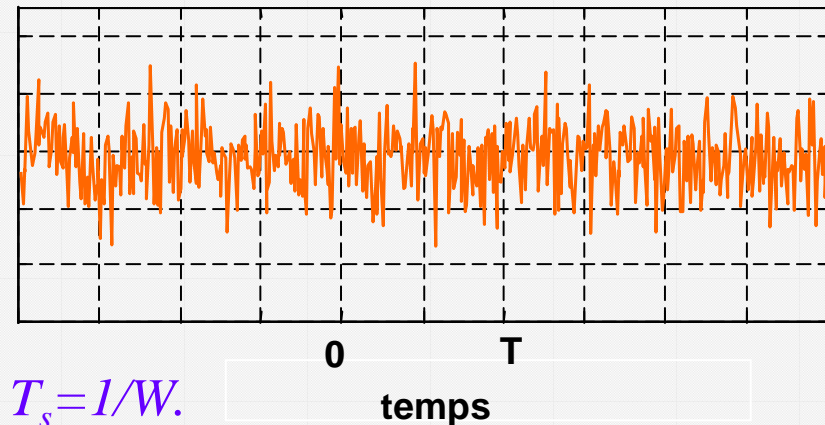
- bruit lié aux systèmes électroniques de réception

Puissance du bruit : $N = \kappa \cdot T^\circ \cdot W = N_0 \cdot W$

Energie sur une période : $E_N = N_0 \cdot W \cdot T_s$

$\kappa = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K

$T_k = 290$ K (en réf. , T° en Kelvin)



*Remarque : si modulation idéale : $T_s = 1/W$.
alors, $E_N = N_0$.*

On exprime souvent la qualité d'un système en fonction de E_b/N_0 .

I-3. Capacité de canal

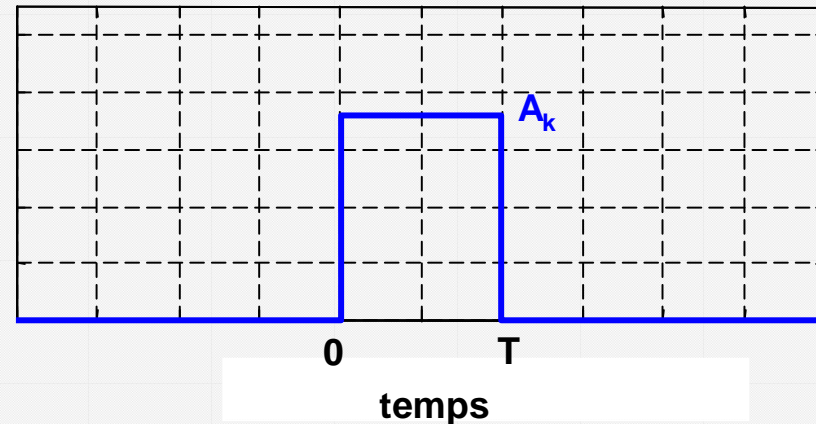
- Pour connaître la capacité de canal, il faut estimer le rapport signal à bruit : SNR.
 - Propriétés du signal en émission :

Puissance d'un symbole émis :

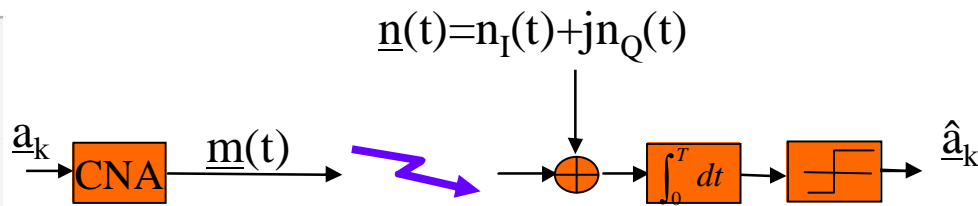
$$S_k = A_k^2 / 2$$

Energie 'bit' reçue :

$$E_b = A_k^2 \cdot T_b / 2$$



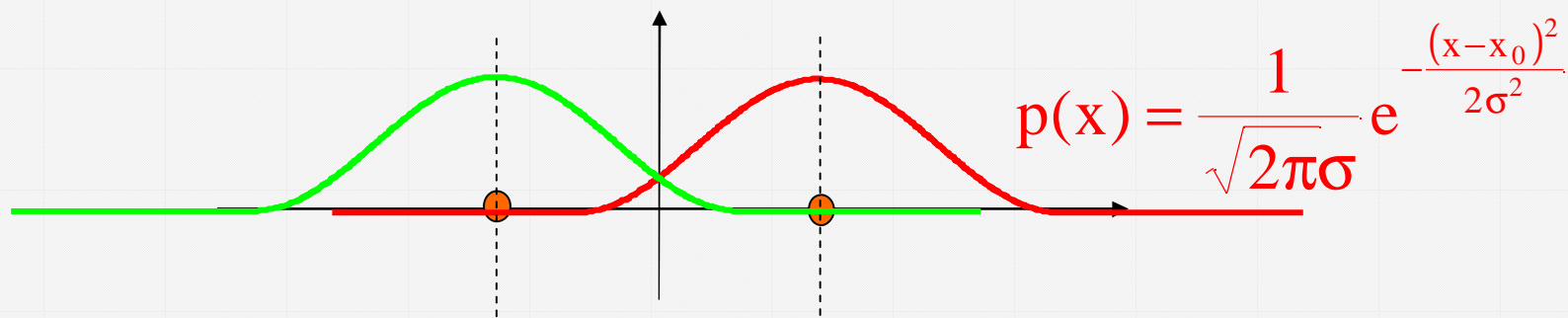
Rem : tenir compte de l'affaiblissement de propagation



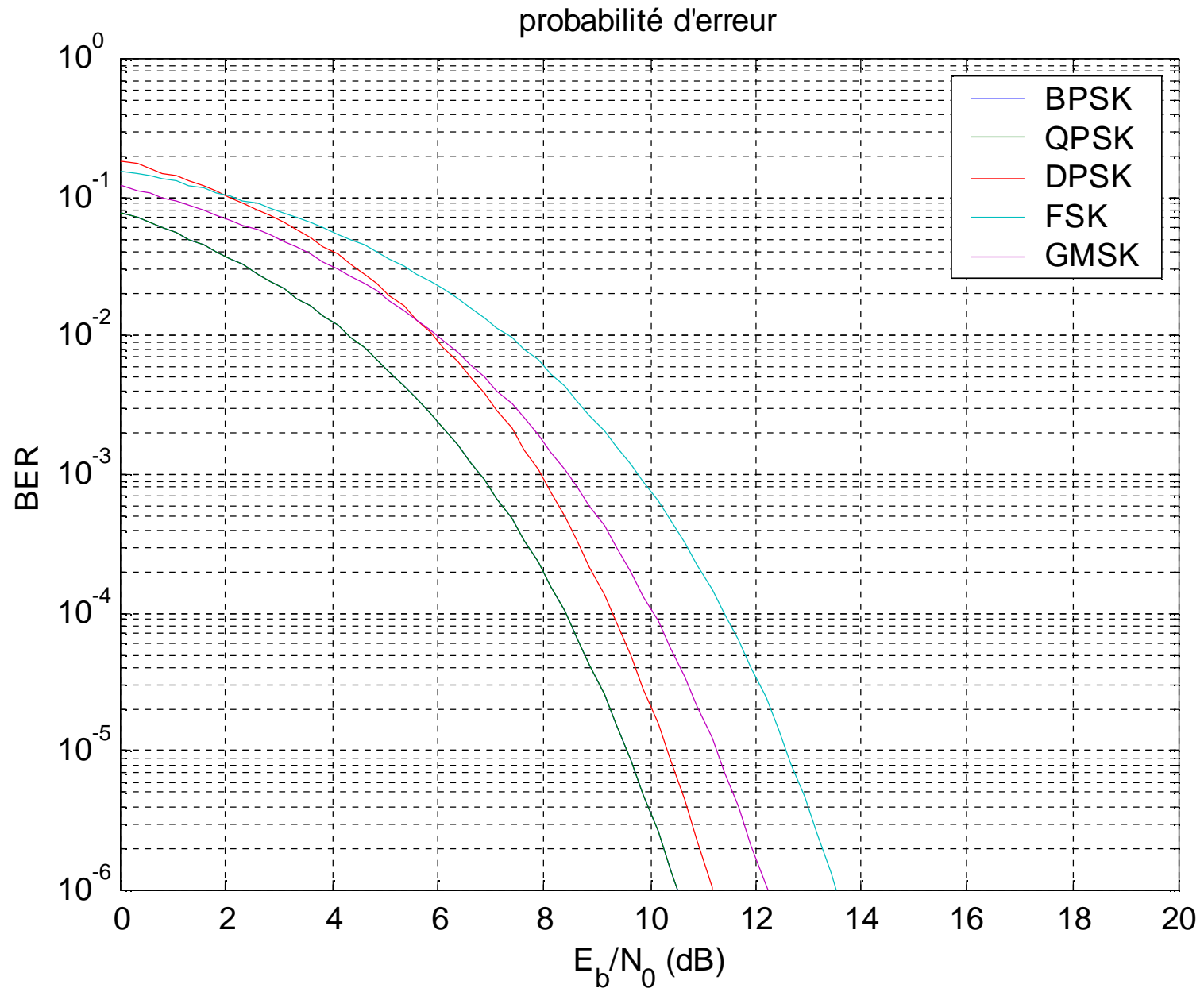
I-3. Capacité de canal

- Taux d'erreur théorique d'une BPSK sur un canal AWGN avec le démodulateur optimal :

$$P(\text{err}(k)) = P(\hat{a}_k = -1 / a_k = 1) \cdot P(a_k = 1) + P(\hat{a}_k = 1 / a_k = -1) \cdot P(a_k = -1)$$



$$p(x < 0) = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{x_0}{\sqrt{2} \cdot \sigma}\right) \quad ; \quad \text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2} \cdot du$$



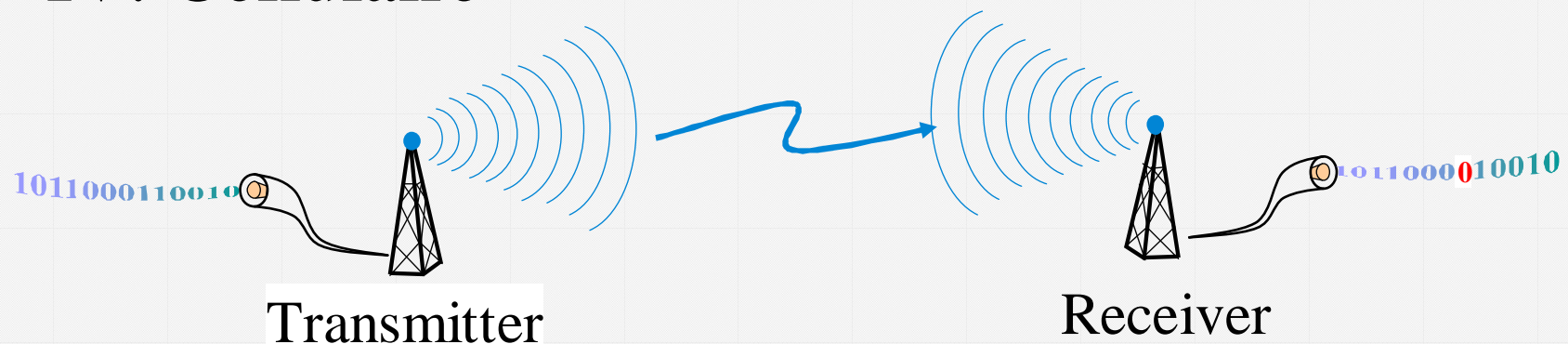
Plan général

I. Caractéristiques des ressources radio

II. Propagation et bilan de liaison

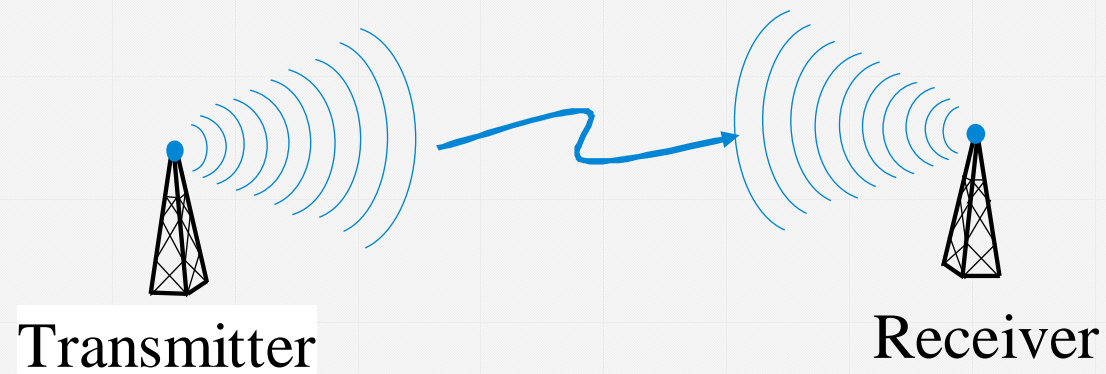
III. Partage des ressources

IV. Cellulaire



Propagation et bilan de liaison

- **1. Bilan de puissance en espace libre**
- **2. Environnement réel**
- **3. Canal radio**



II-1. Bilan en espace libre

A. Bilan de liaison (Friis)



$$P_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot \eta_{Pol} \cdot \eta_A \cdot G_A(\theta, \psi) \cdot \eta_B \cdot G_B(\theta, \psi) \cdot P_T$$

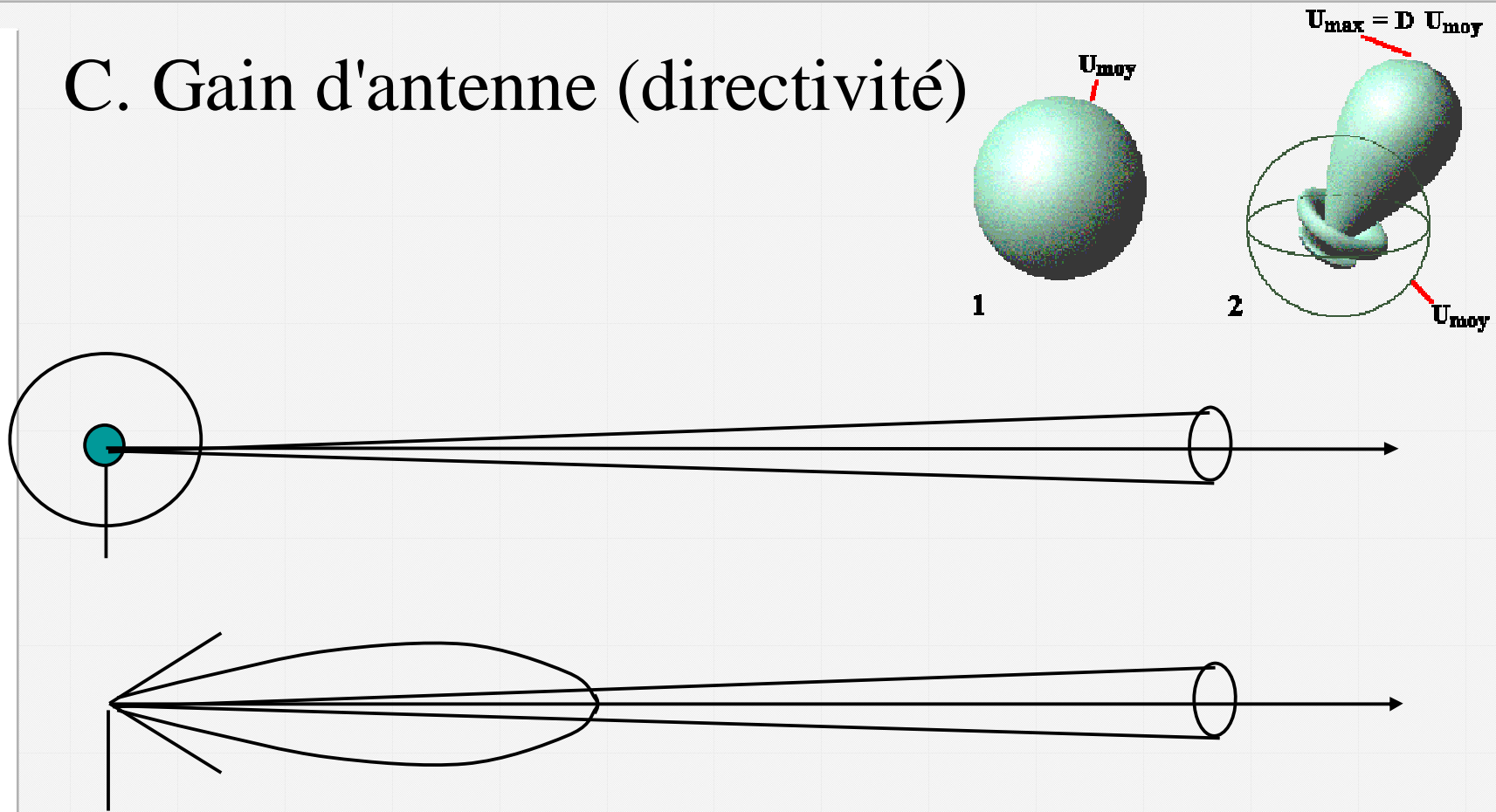
$$P_R = P_T + G_T + G_R - PL(f, \dots)$$

B. Conventions : puissance, gain

- les décibels : dB, dBi, dBW, dBm
 - attention $10\log_{10}$ car il s'agit de puissance

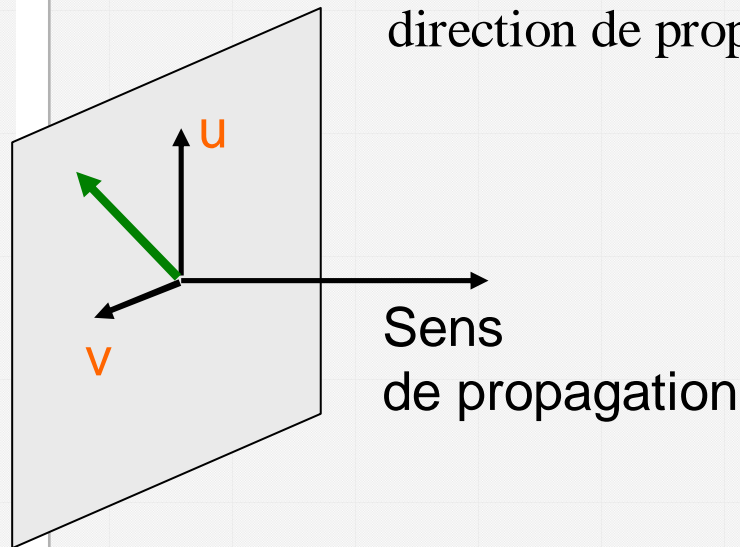
- La PIRE (EIRP) : une référence.

C. Gain d'antenne (directivité)

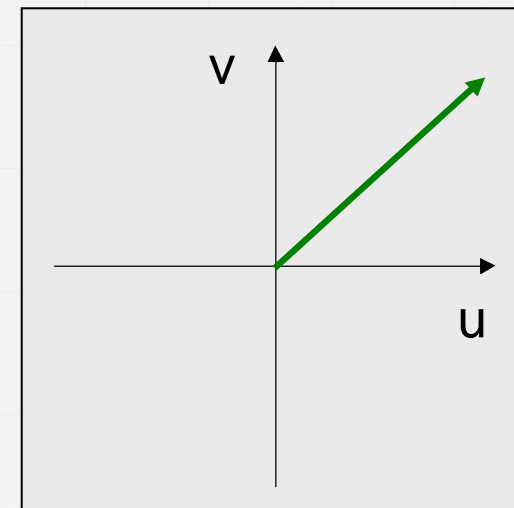


D) Polarisation

- La polarisation donne l'orientation du champ E dans un certain repère (cartésien, sphérique, ...), relatif à la direction de propagation.



Plan de polarisation



$$\underline{\vec{E}}(z, t) = \underline{\vec{E}}(z) \cdot e^{j\omega t}$$

vecteur de polarisation

$$\underline{\vec{E}}(z, t) = \underline{E}_u(z, t) \cdot \vec{u} + \underline{E}_v(z, t) \cdot \vec{v}$$

– 3 modes de polarisation

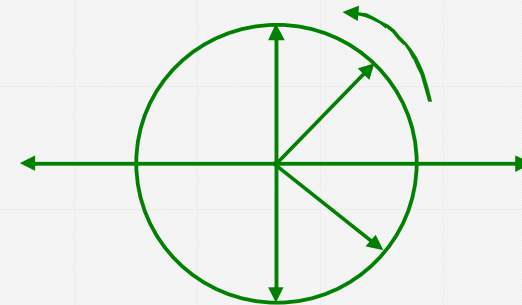
■ polarisation rectiligne

- verticale, horizontale (plan H ou E)



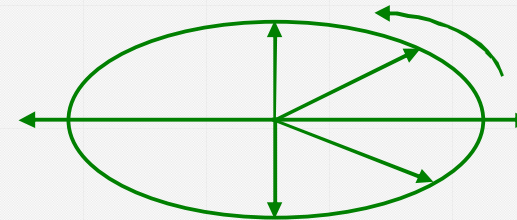
■ polarisation circulaire

- droite ou gauche



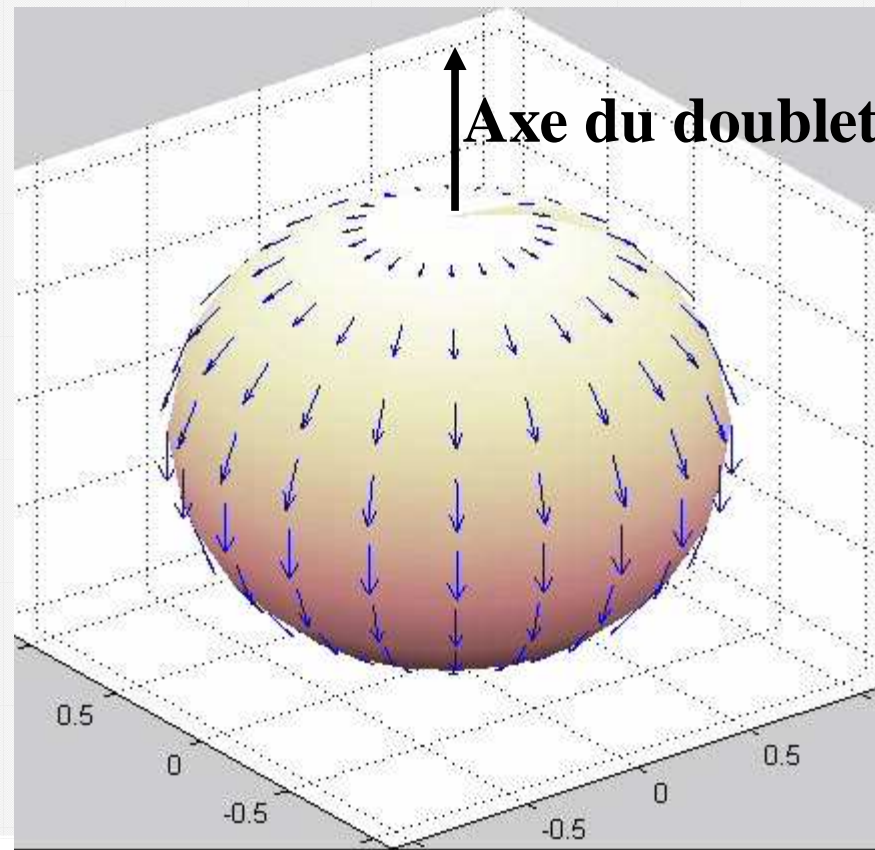
■ polarisation elliptique

- droite ou gauche



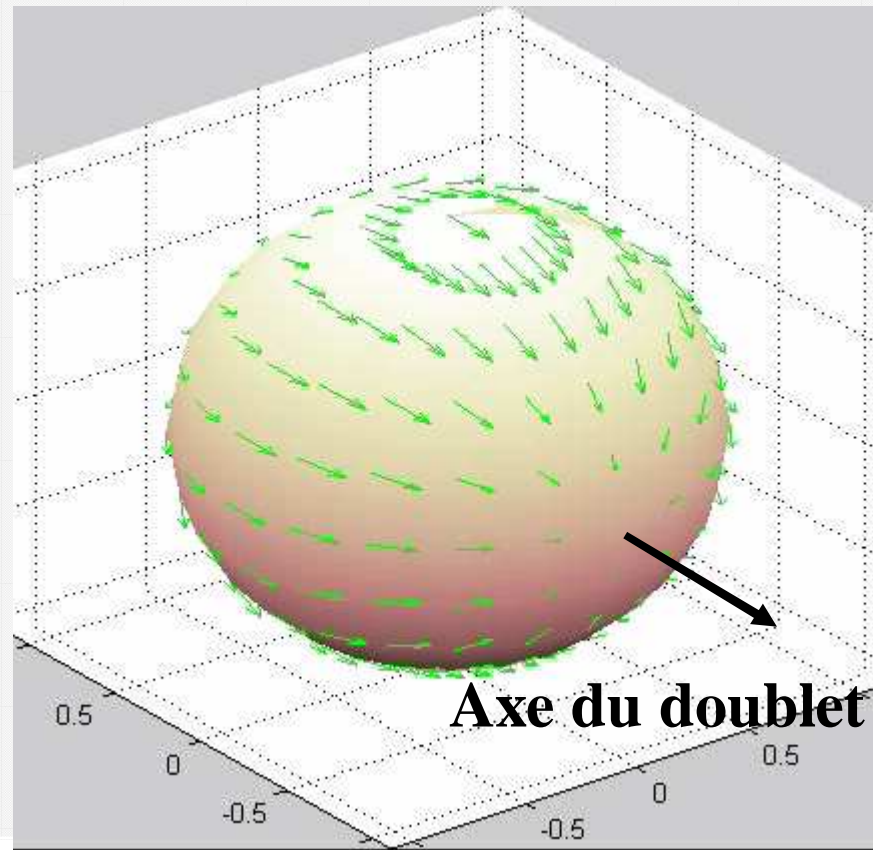
- Ex1 : Polarisation rectiligne verticale

$$\vec{p}_E = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$



- Ex2 : Polarisation rectiligne horizontale

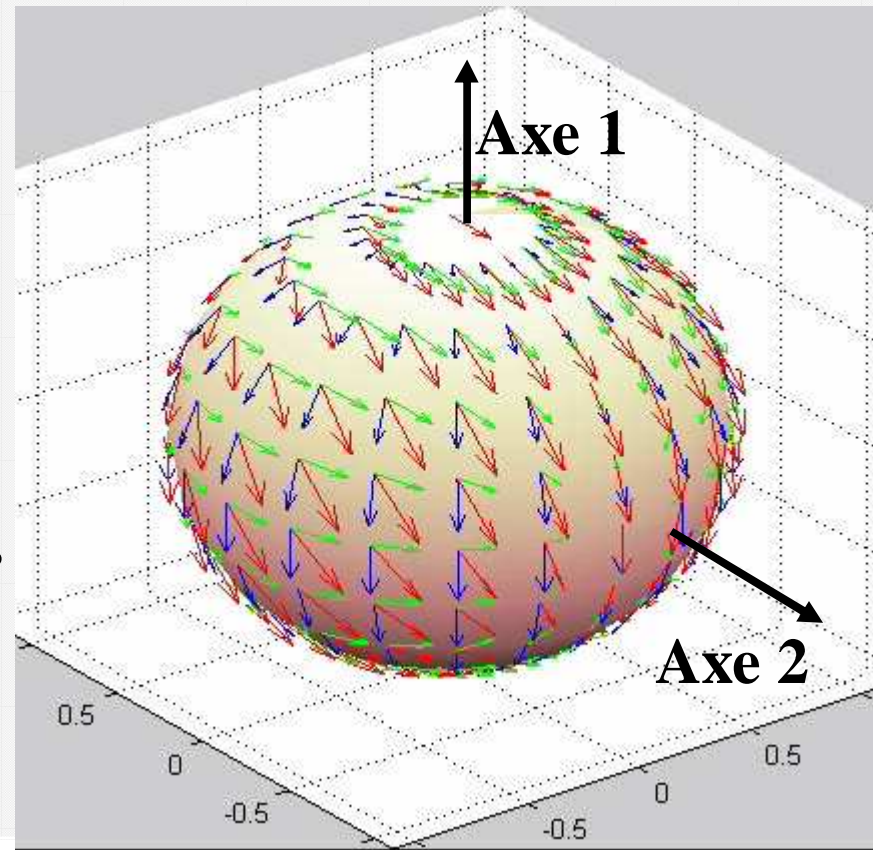
$$\vec{p}_E = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$



■ Ex3 : Polarisation rectiligne quelconque

$$\vec{p}_E = \begin{pmatrix} \alpha^2 \\ 1 - \alpha^2 \end{pmatrix}$$

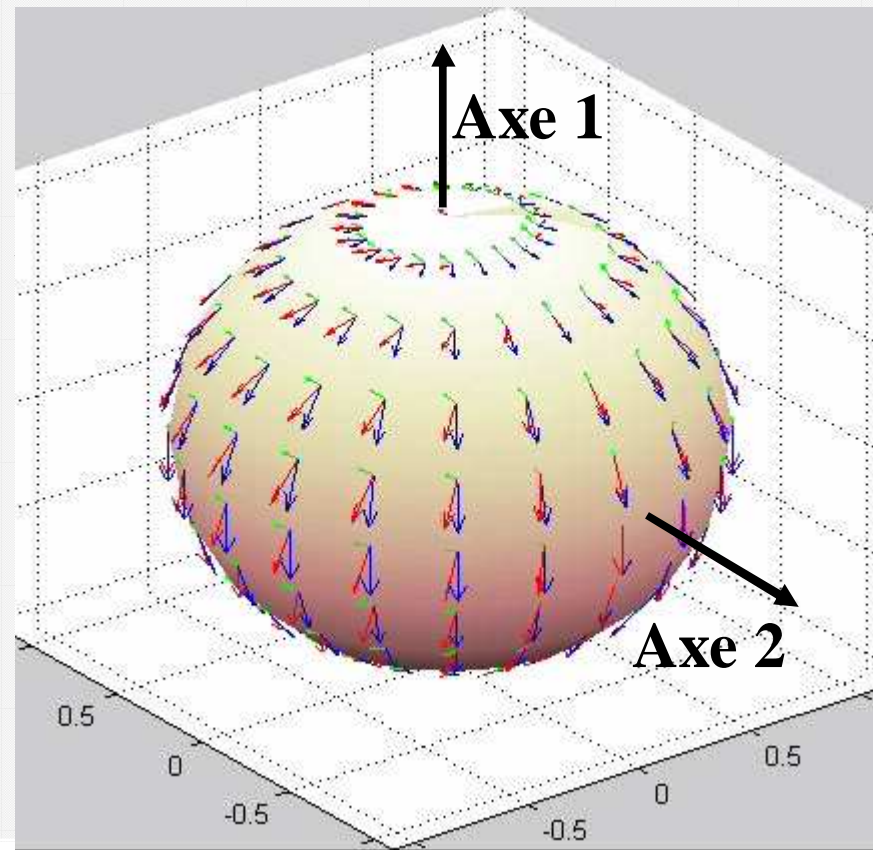
Principe : les 2 composantes
sont en phase



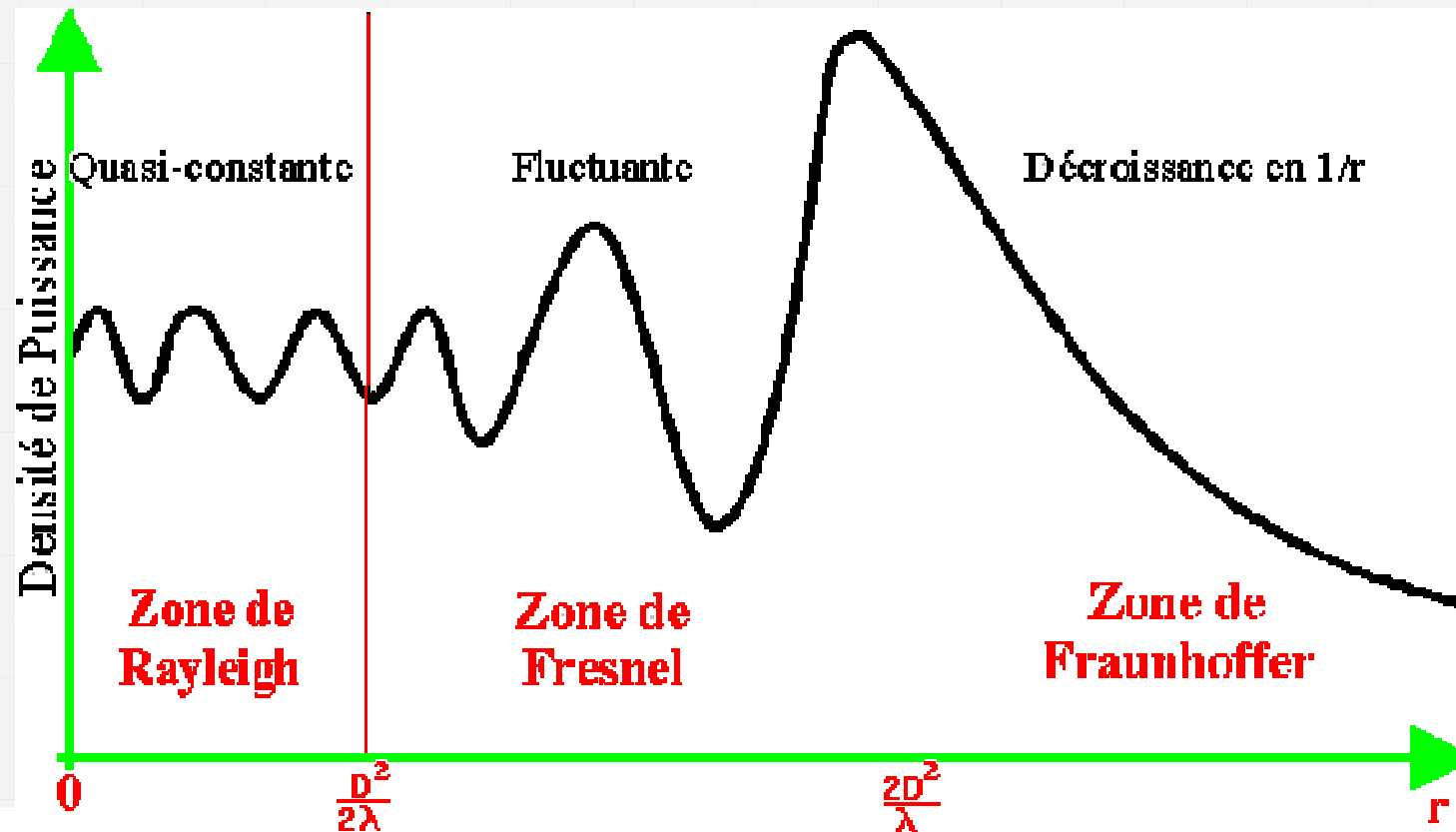
■ Ex4 : Polarisation elliptique

Déphasage
des composantes

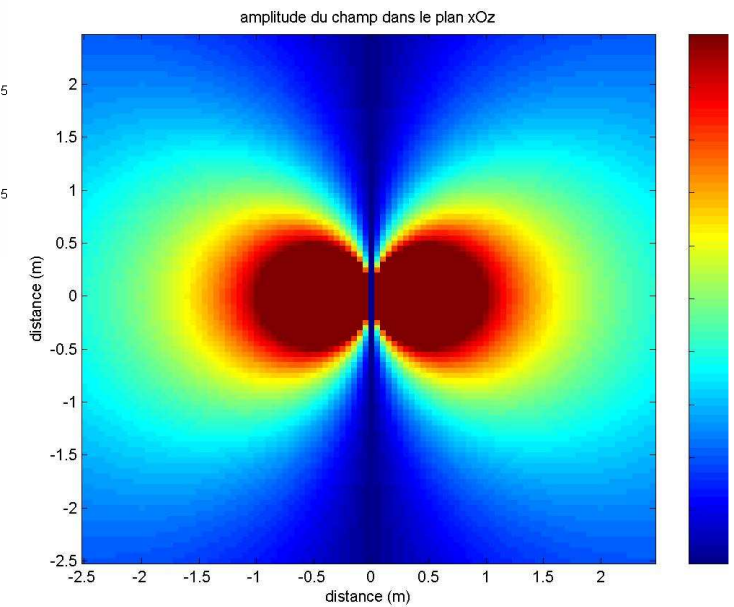
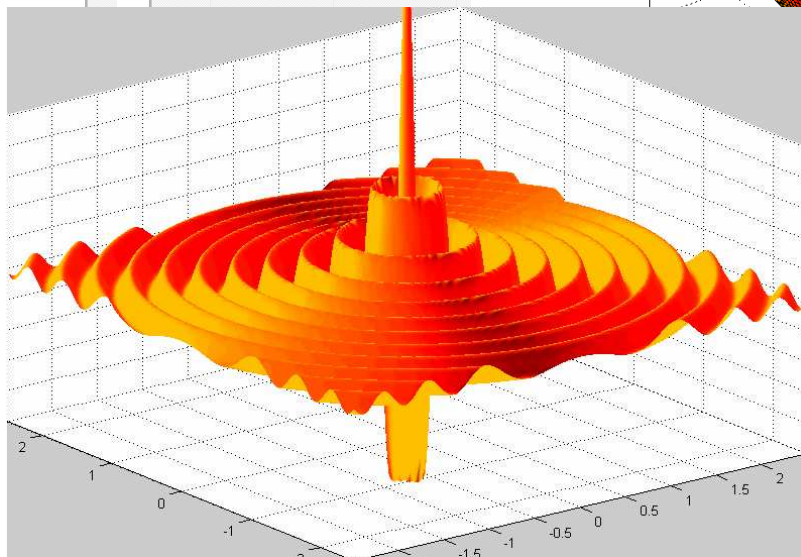
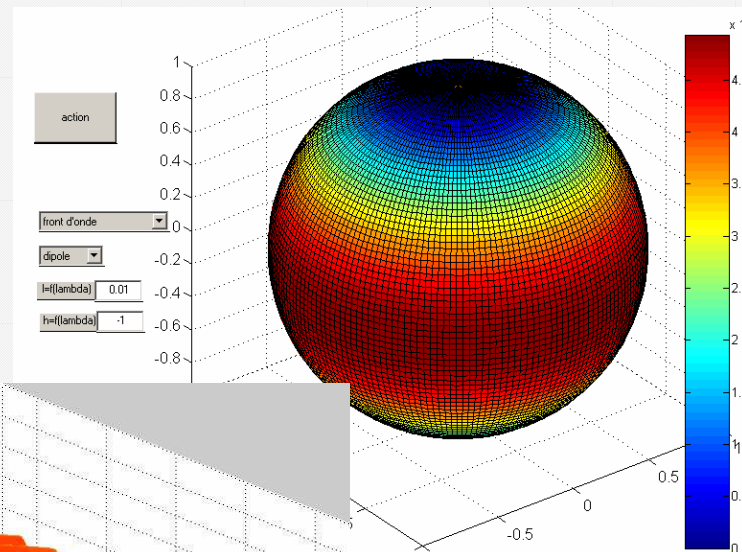
$$\vec{p}_E = \begin{pmatrix} \alpha^2 \cdot e^{j\phi} \\ 1 - \alpha^2 \end{pmatrix}$$



E. Propagation (ondes sphériques)

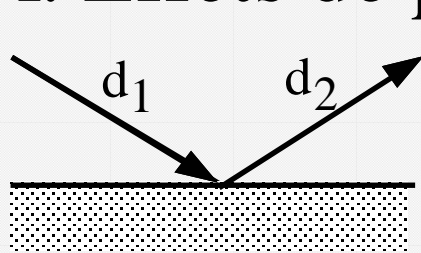


E. Propagation (ondes sphériques)

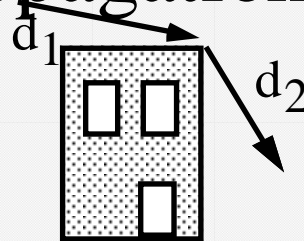


II-2. Environnement réel

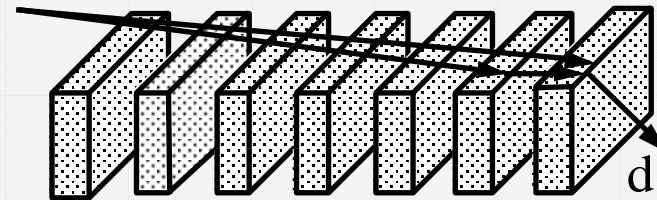
A. Effets de propagation



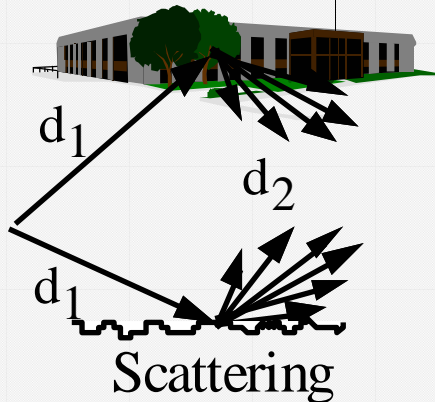
Reflection



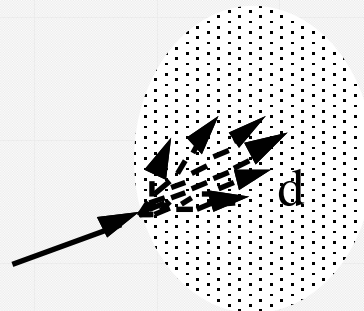
Diffraction



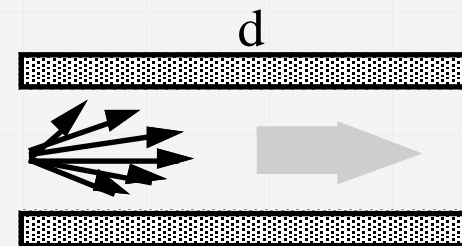
Multiple diffraction



Scattering



Absorption

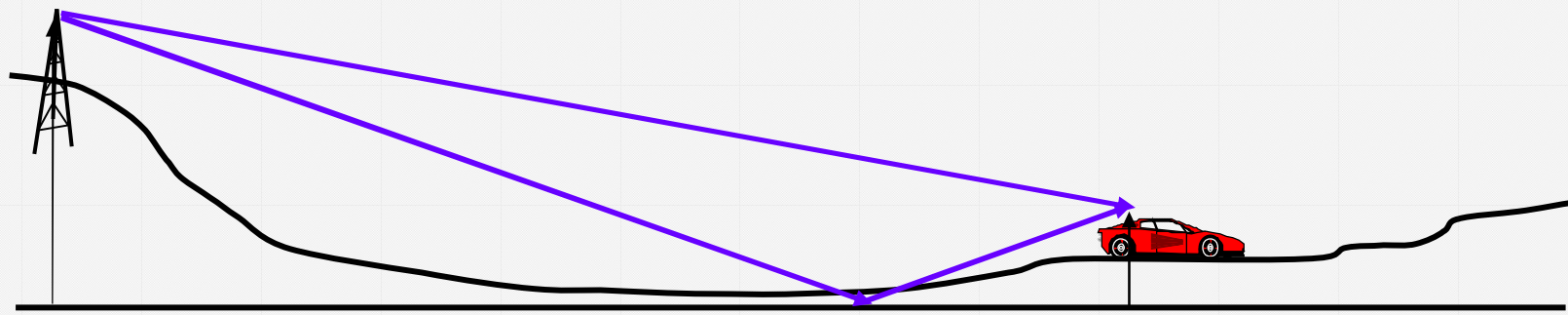


guided wave

©J-F Wagen (jean-frederic.wagen@swisscom.com)

II-2. Environnement réel

B. Effet de sol

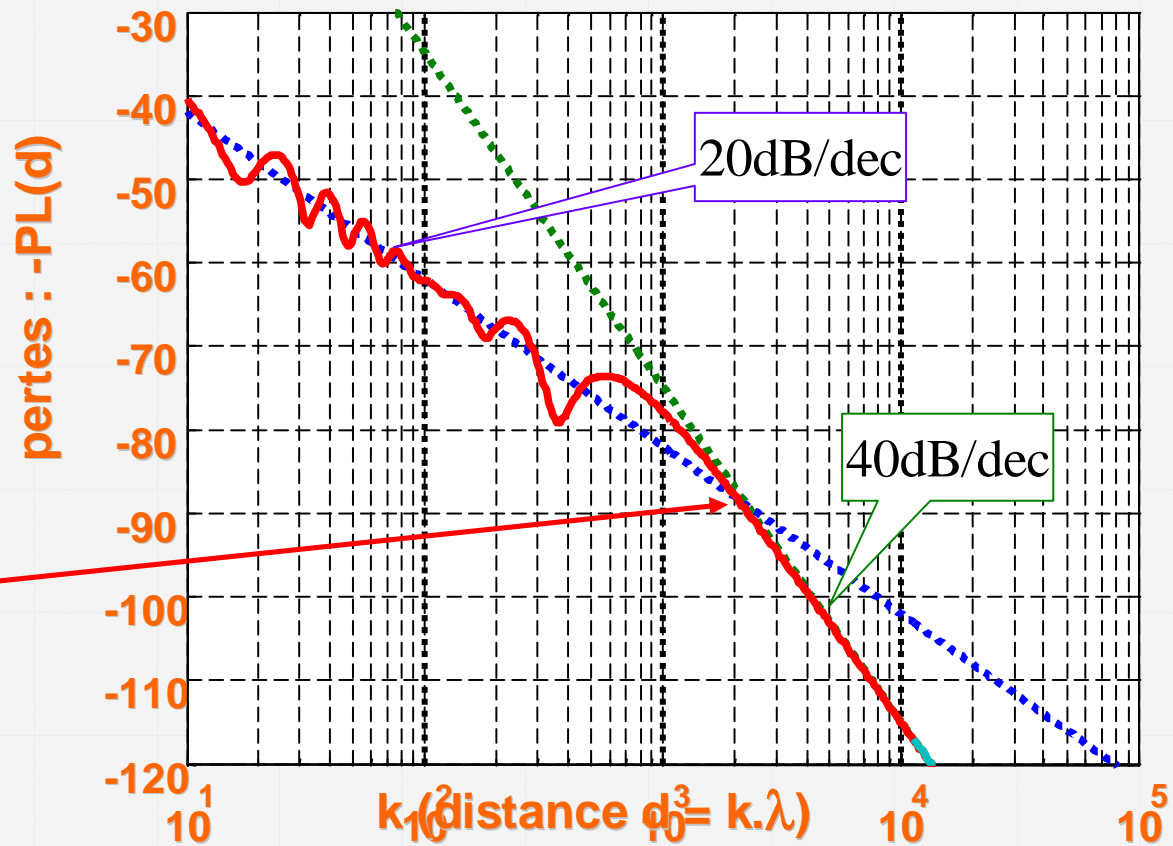


$$E_{TOT}(d, t) \approx \frac{E_0 \cdot d_0}{d} \cdot \exp(j(\omega_c t - \beta d')) \cdot [1 + \underline{R} \cdot \exp(-j\beta\Delta)]$$

$$PL = 40 \log d - 20 \log h_T - 20 \log h_R$$

II-2. Environnement réel

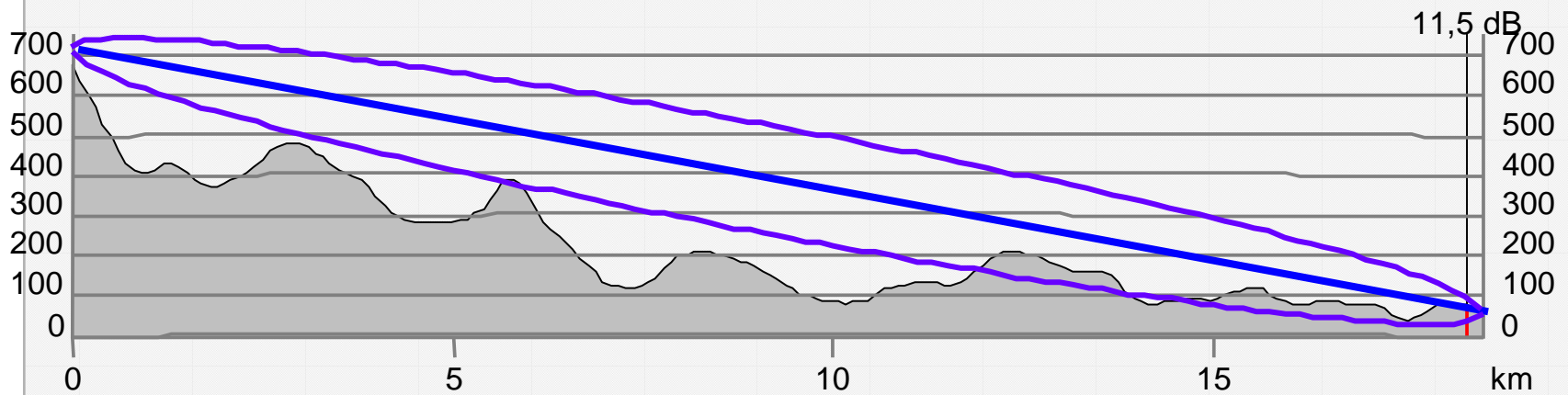
Exemple : GSM, $\lambda=30\text{cm}$, $h_E=15\text{m}$; $h_R=1,5\text{m}$, sol sec



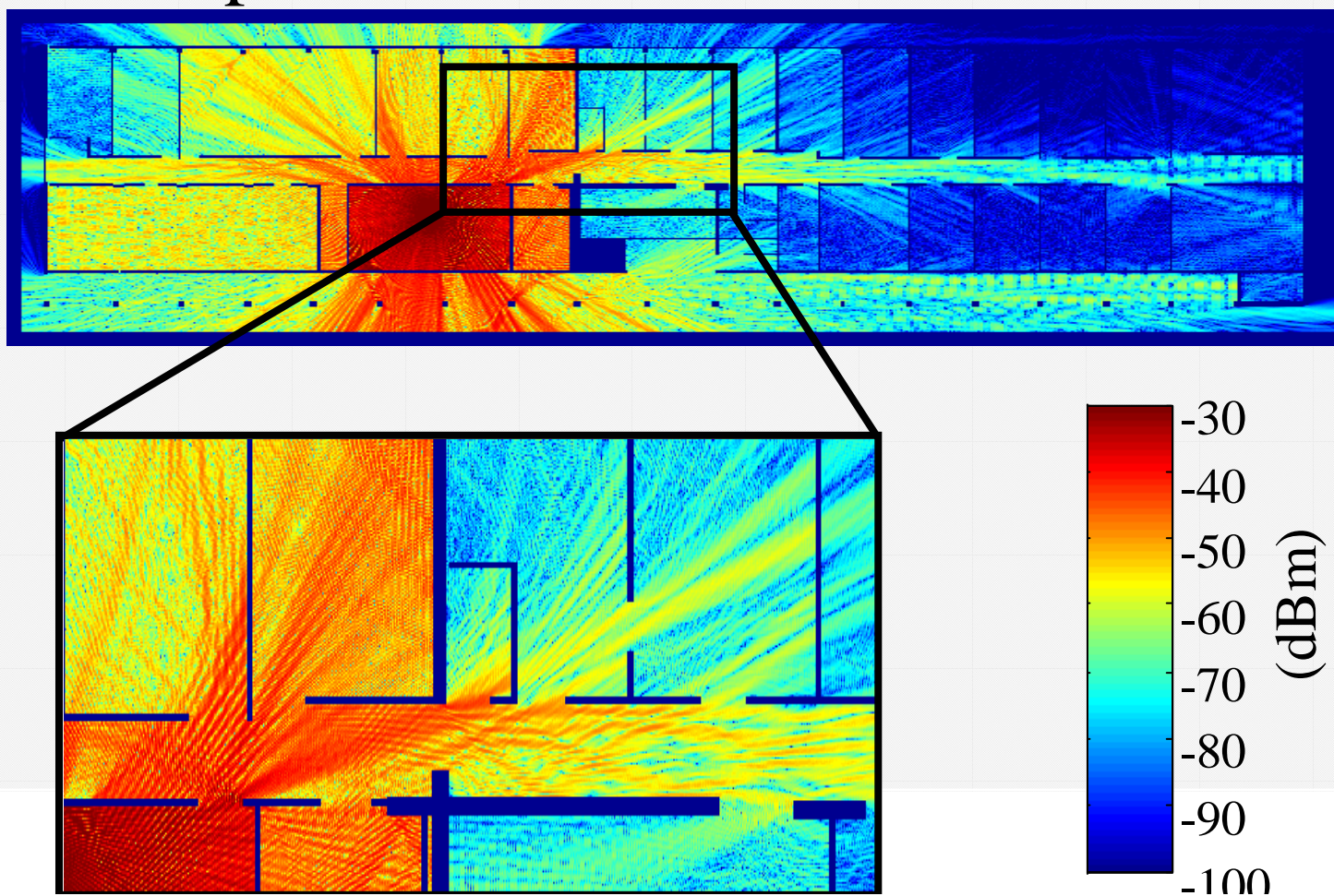
$$d = 4\pi \frac{h_r \cdot h_t}{\lambda}$$

$$PL = 20 \log \left(16\pi^2 \frac{h_r \cdot h_t}{\lambda^2} \right)$$

C. Diffraction



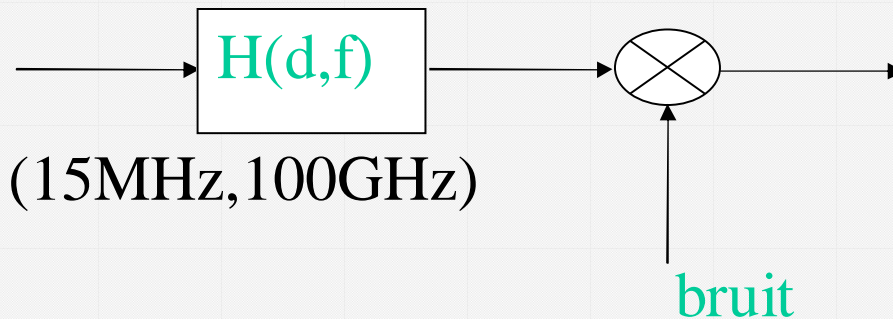
D. Exemple Indoor



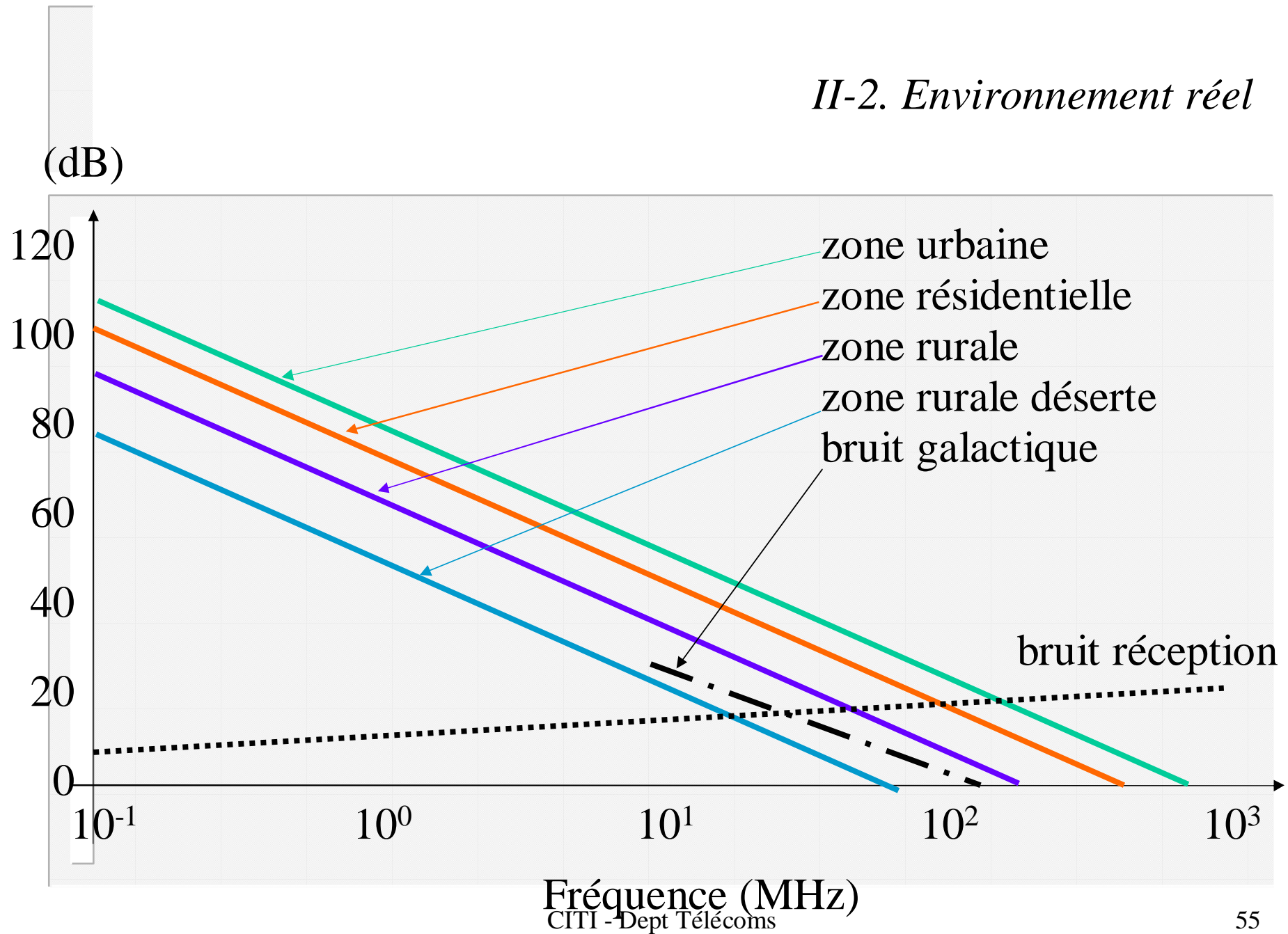
E. le bruit

Les sources de bruit

- Bruit galactique (15MHz, 100GHz)
- Bruit thermique (Johnson)
 - bruit blanc jusqu'aux infrarouges...
- Bruit artificiel
 - évolutif, non prédictible...



II-2. Environnement réel



II-2. Environnement réel

■ Le bruit thermique :

- 3 grandeurs : température, bande passante, constante de Boltzmann : avec $k=1.379.10^{-23} \text{ W.Hz}^{-1}.\text{K}^{-1}$

exple : GSM : B=270kHz, T=290°K

$$P_N = k \cdot T \cdot B$$

■ Récepteurs réels :

- facteur de bruit : $F = \frac{N_{out} / G}{k.T.B} = \frac{N_{eq}}{k.T.B}$
- figure de bruit : $F_{dB} = 10.\log(F)$
- température de bruit : $N_{eq} = k.T.B + k.T_{eq}.B$

E. Shadowing

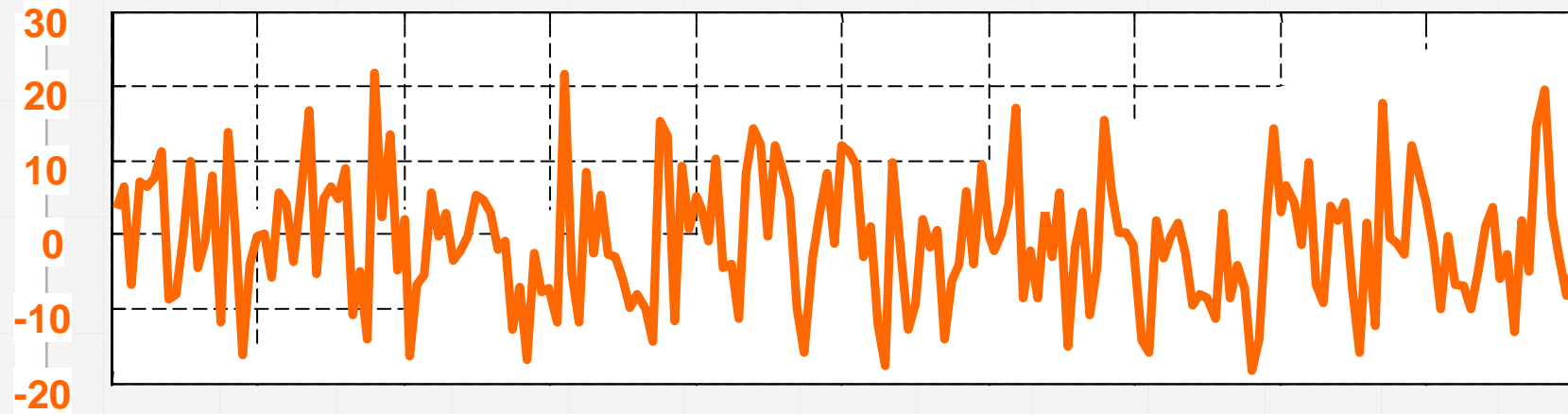
- Le path loss est une combinaison de plusieurs termes d'affaiblissement :

$$PL(x) = PL1 + PL2 + PL3 + \dots$$

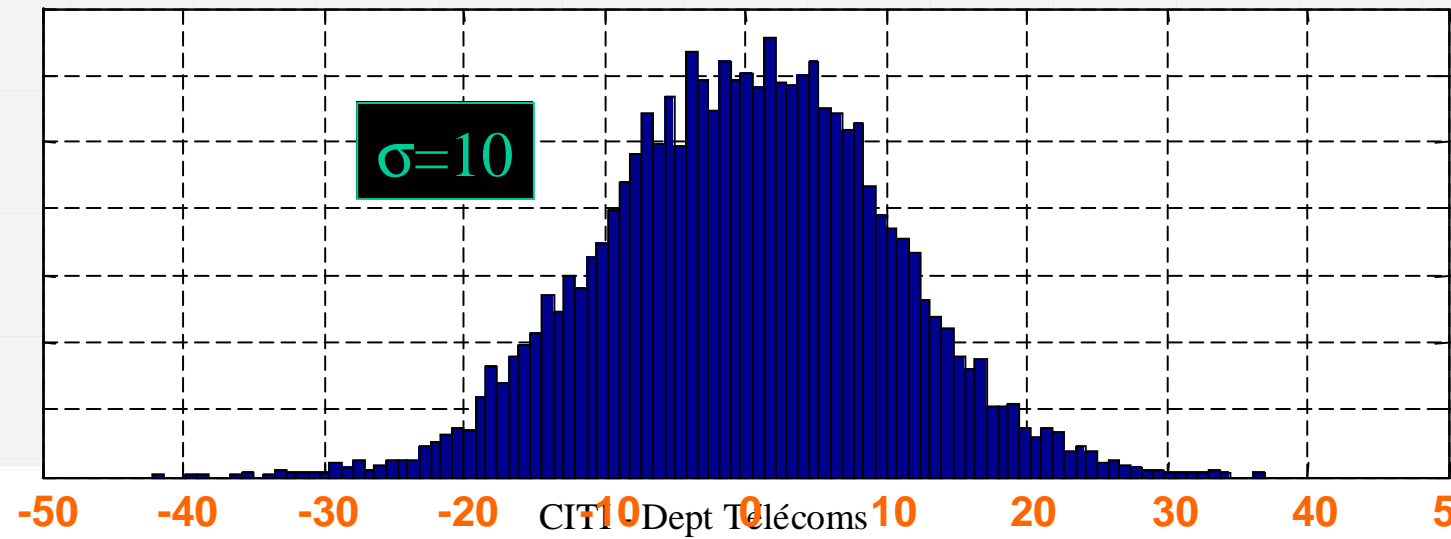
- chacun de ces termes peut être considéré comme une variable aléatoire (probabilité de présence d'un obstacle)
- application du théorème central limite
 - la loi d'affaiblissement est log-normal

II-2. Environnement réel

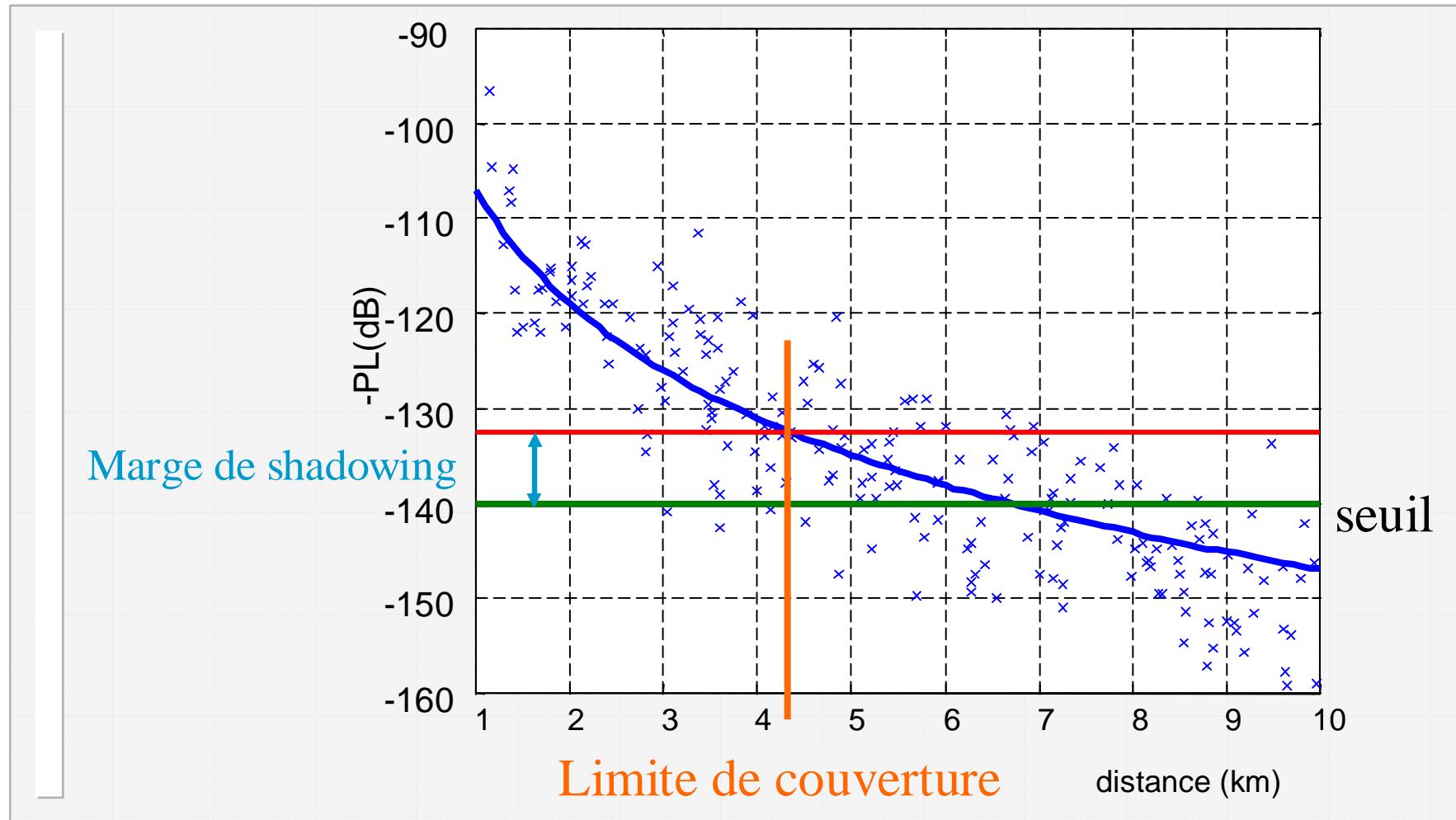
Niveau de signal (dB)



Loi de distribution



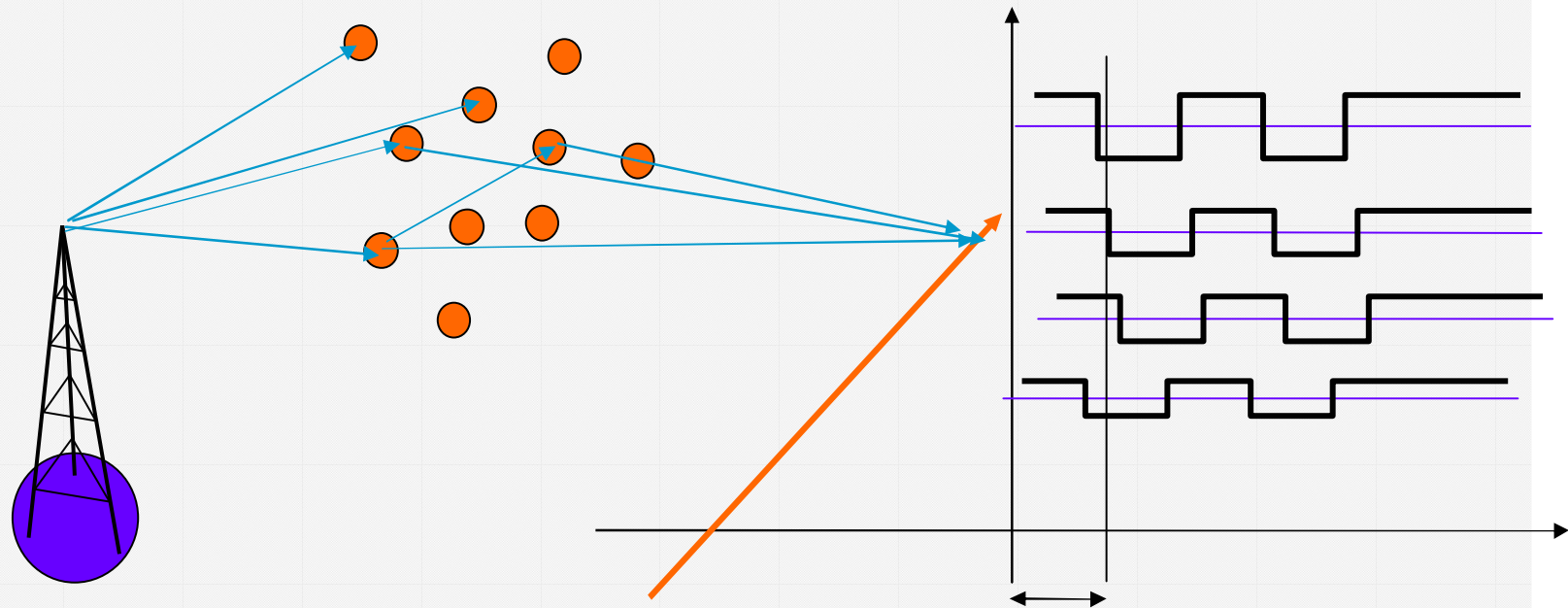
II-2. Environnement réel



II-3. Canal radio

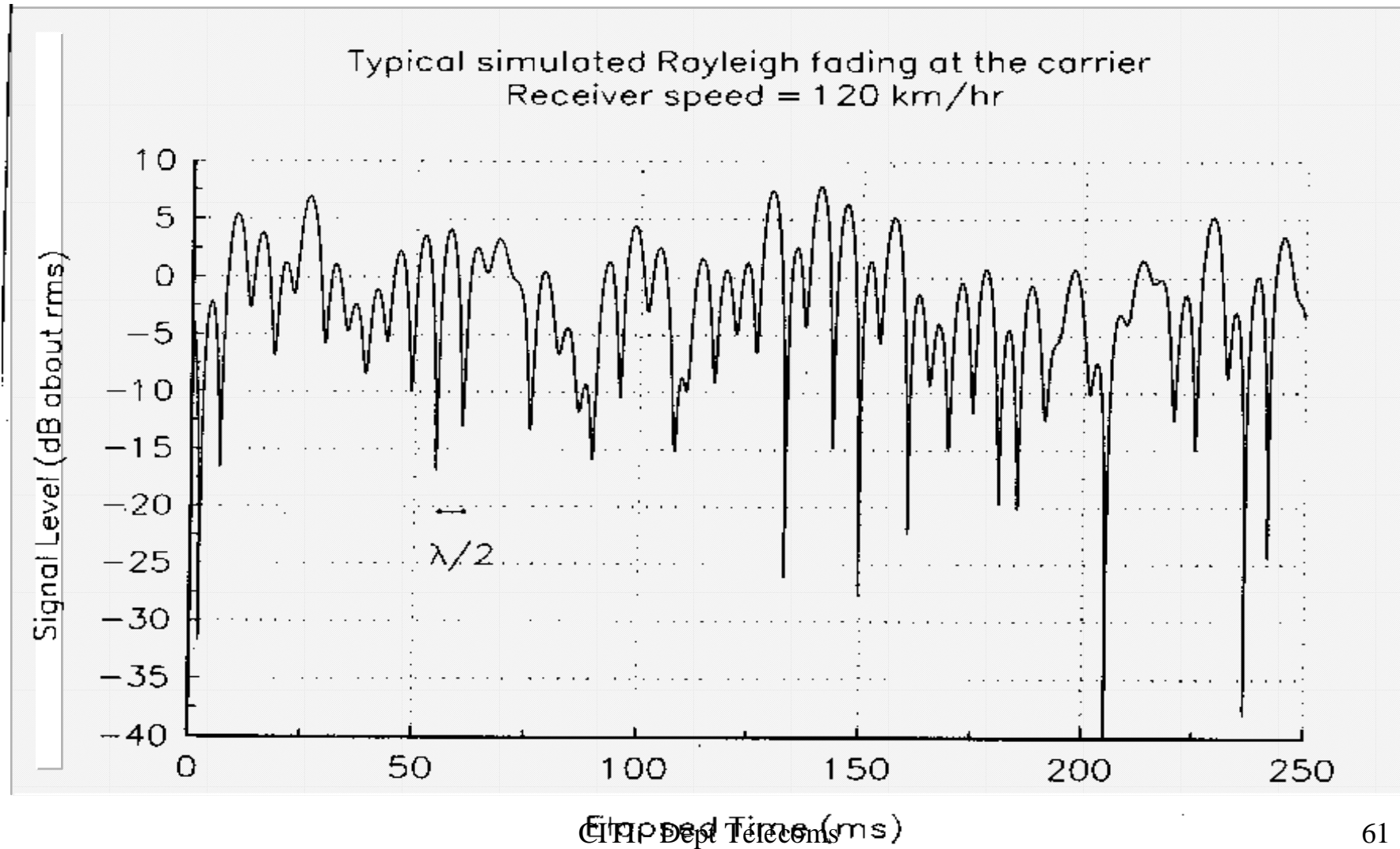
■ A. Fading plat

- Cas où les différences de chemins sont faibles (par rapport à la durée des impulsions)

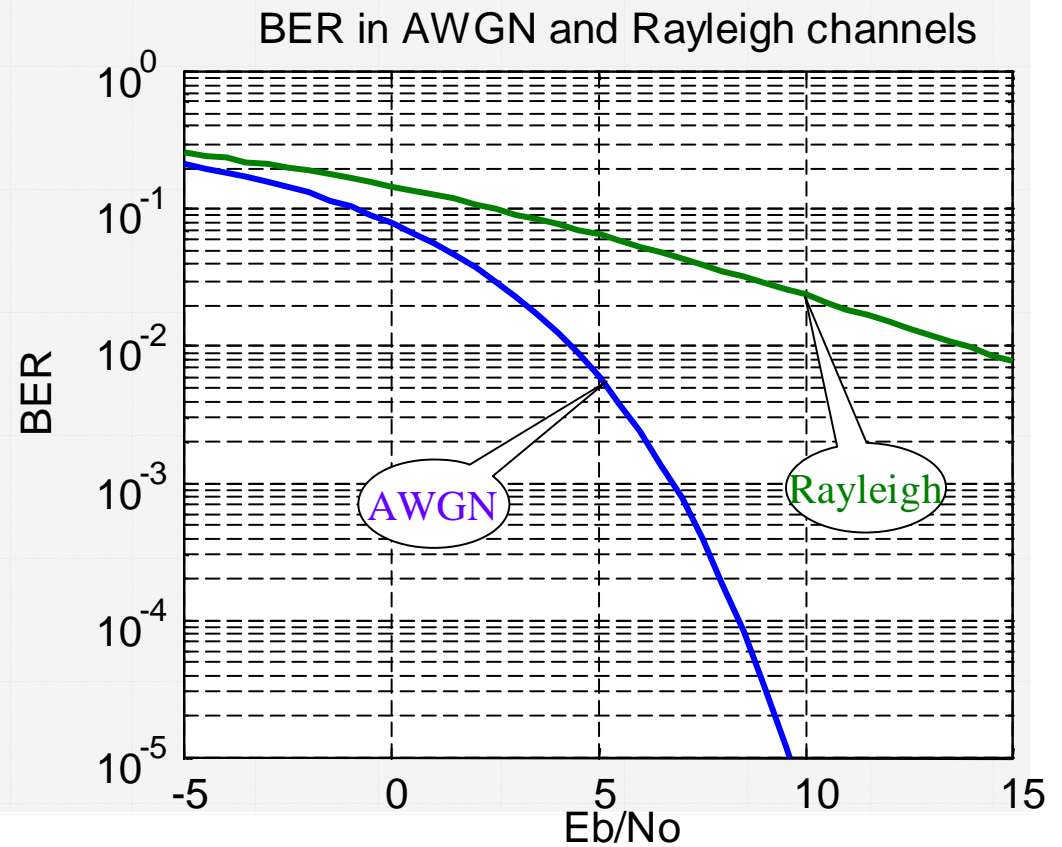


Attention, porteuses déphasées les unes par rapport aux autres T_s

II-3. Canal radio



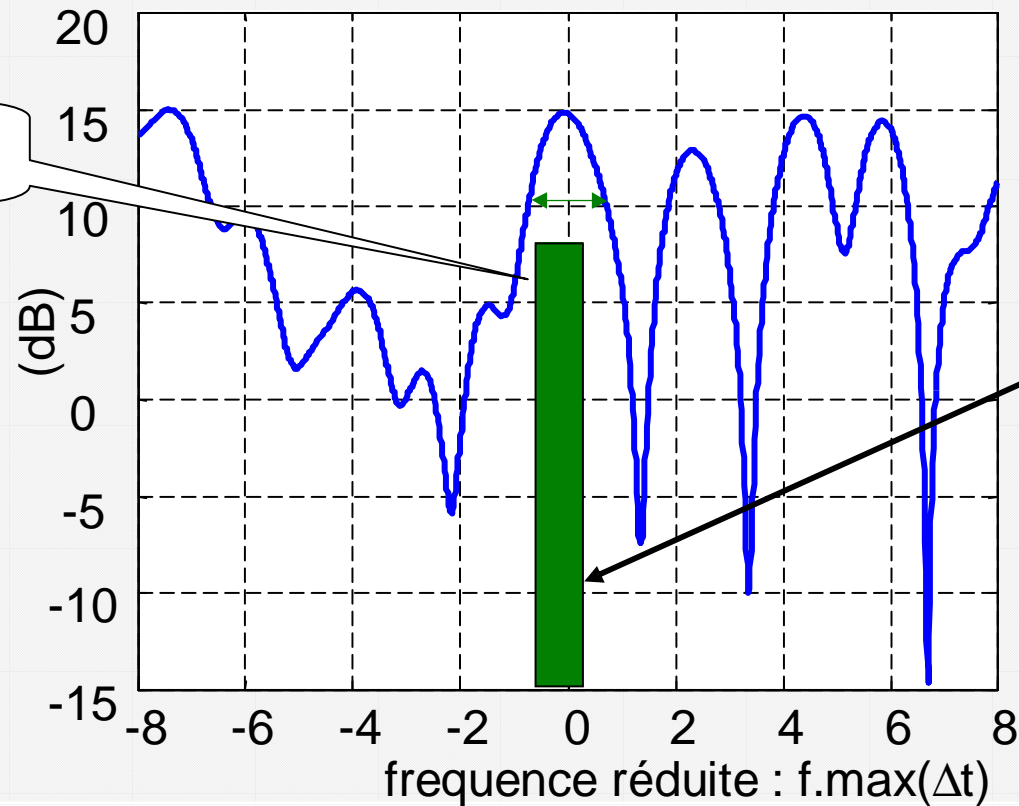
– Conséquences sur le BER



II-3. Canal radio

fonction de transfert d'un chemin à
20 composantes aléatoires ($\Delta t < 1$)

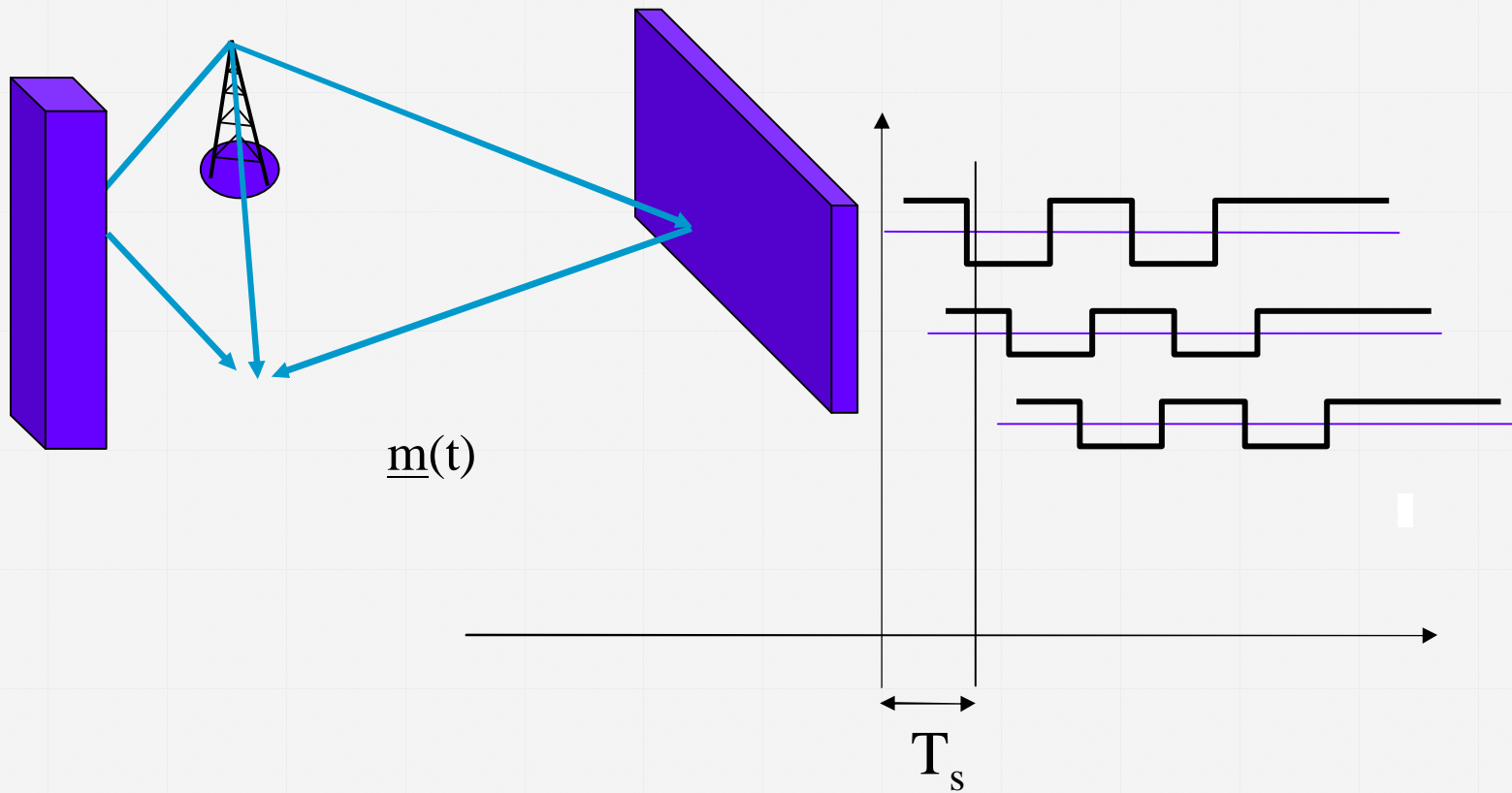
$$B_c \sim 1/\Delta t > W$$



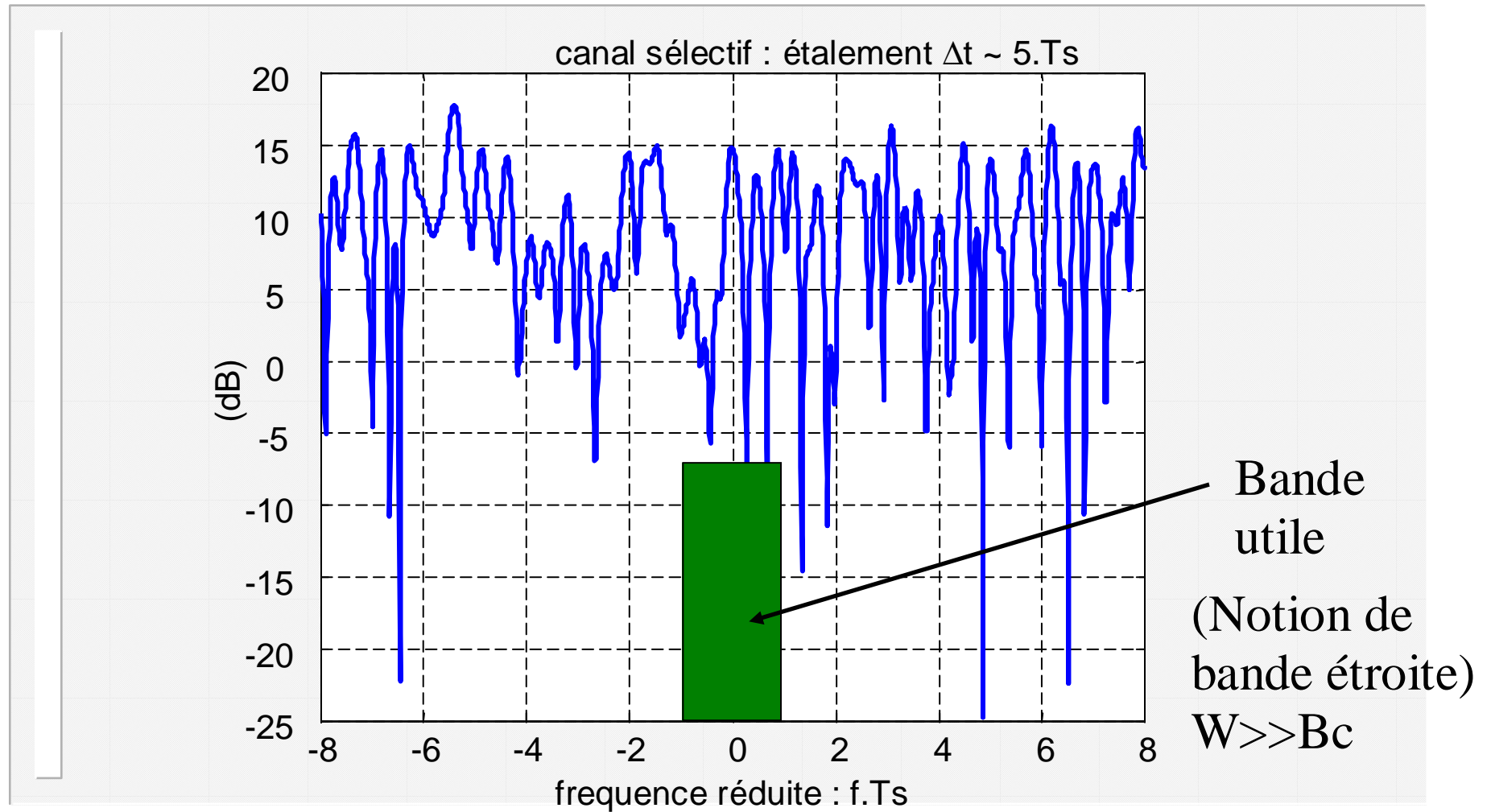
Bande
utile

(Notion de
bande étroite)
 $W \ll 1/\Delta t$

A. Fading sélectif



II-3. Canal radio



Plan général

I. Caractéristiques des ressources radio

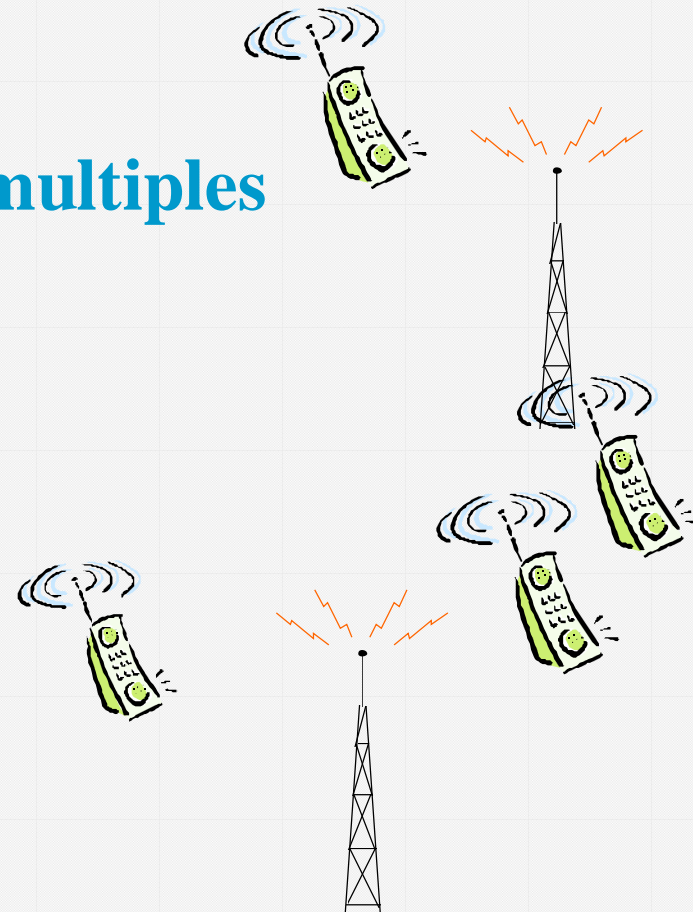
II. Propagation et bilan de liaison

III. Partage des ressources

IV. Cellulaire

III-Partage des ressources

- **1. Modes de partage**
- **2. Techniques d'accès multiples**



III-1. Modes de partage

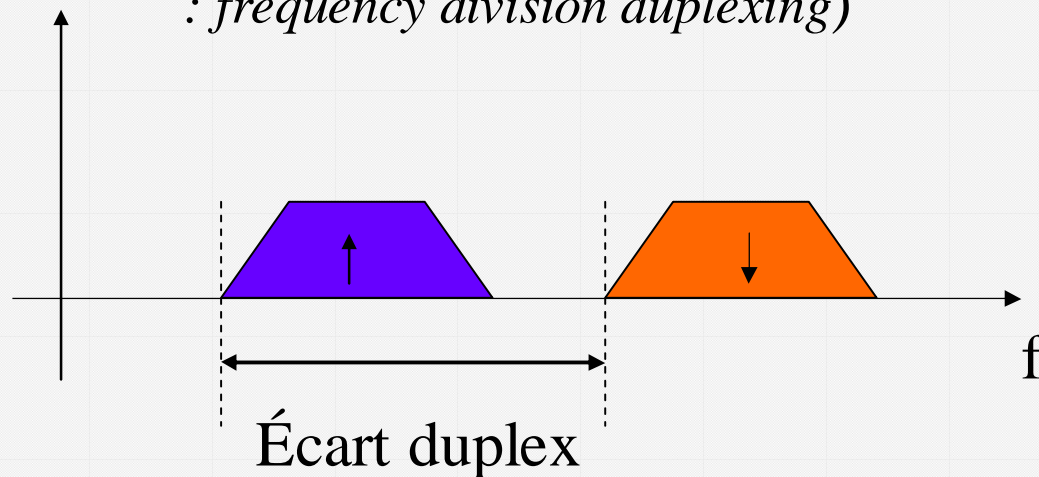
- A) Attribution de ressources globales
 - la bande de fréquence est choisie en fonction :
 - de la portée voulue.
 - de la capacité souhaitée.

 - GSM : 890-915/935-960 MHz
 - (GSM étendu : 880-915MHz, 925-960MHz)
 - DCS1800 : 1710-1785/1805-1880 MHz
 - DECT : 1880-1900MHz
 - wLAN : ISM ~2,4GHz

III-1. Modes de partage

- B) Duplexage (voix montantes/descendantes)
 - duplexage en fréquence (FDD

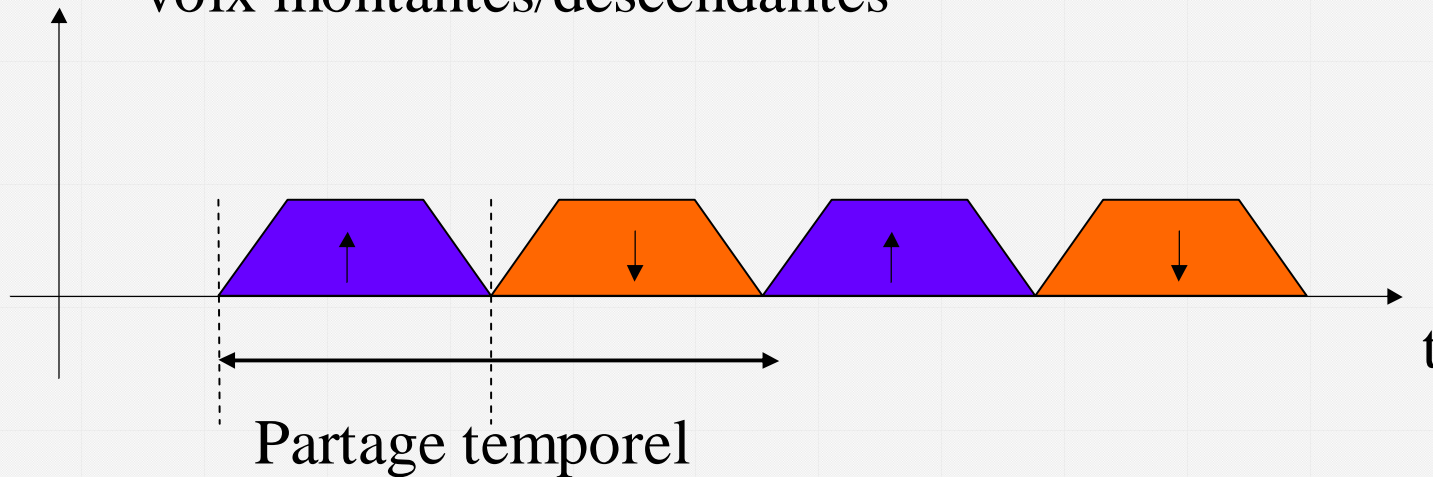
: *frequency division duplexing*)



Intérêt : permet d'éviter les interférences entre lien montant et lien descendant (signal en réception \ll signal en émission)

III-1. Modes de partage

- Duplexage en temps (TDD : *time division duplexing*):
voix montantes/descendantes



Intérêt : un seul canal fréquentiel à gérer

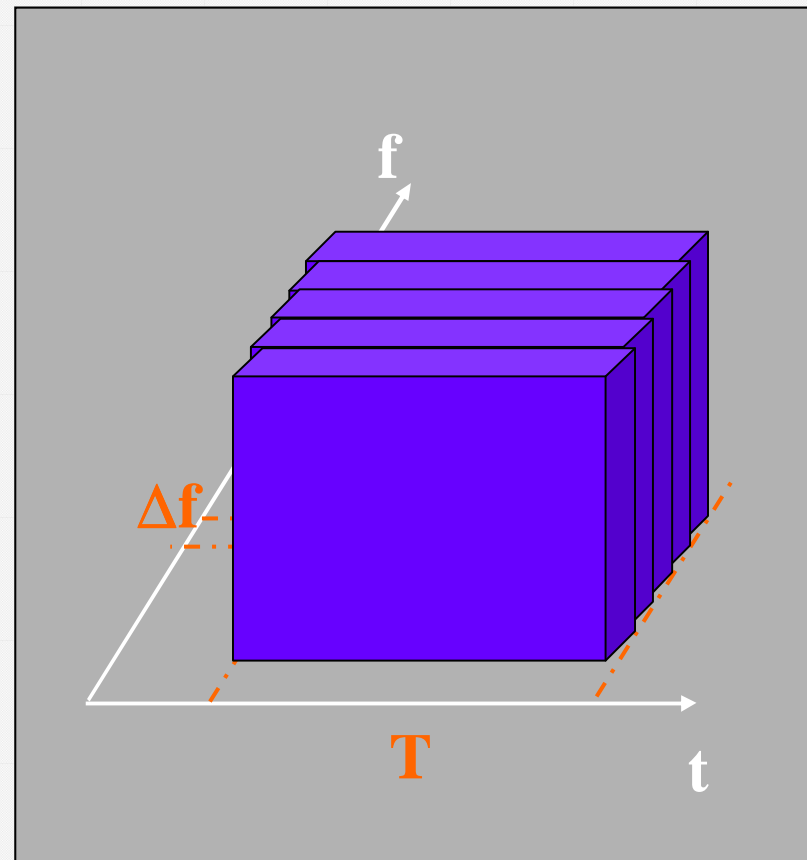
rem : attention aux interférences entre lien montant et lien descendant

III-2. Accès multiple

■ A) FDMA

(Frequency Division Multiple Access)

- découpage de la bande de fréquences en plusieurs porteuses (1 porteuse par canal).
- avantage : simplicité, proche d'un système analogique (radiocom2000).
- Inconvénient majeur : faible utilisation spectrale ou interférences élevées.

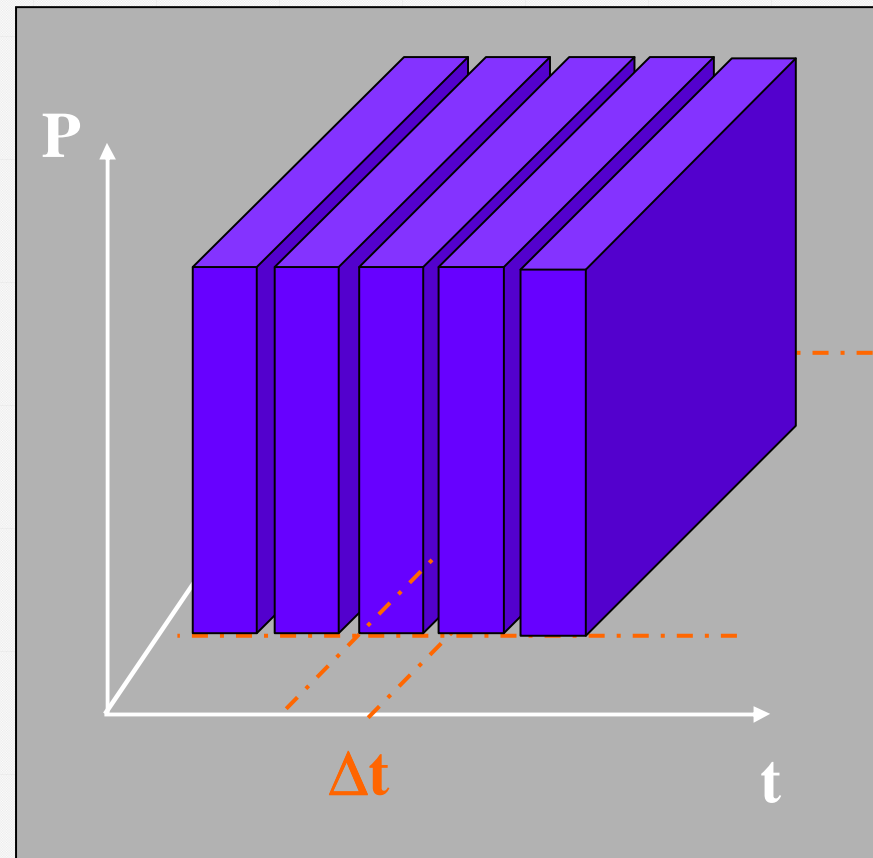


III-2. Accès multiples

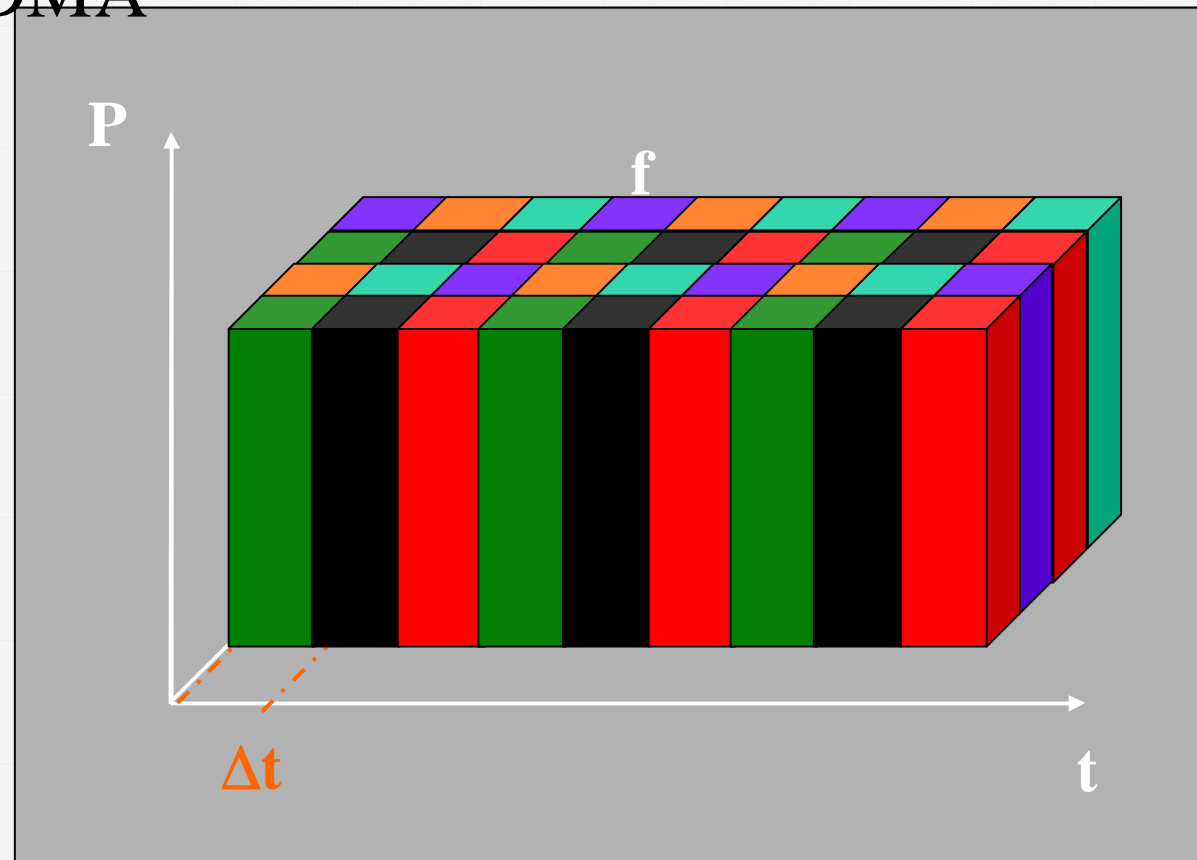
■ B) TDMA

(Time Division Multiple Access)

- découpage du canal fréquentiel en trames (et slots)
- avantage : 1 seule porteuse, simplifie la partie RF.
- Inconvénients :
 - synchronisation temporelle fine
 - étalement temporel, délais (mobiles à distance différente).

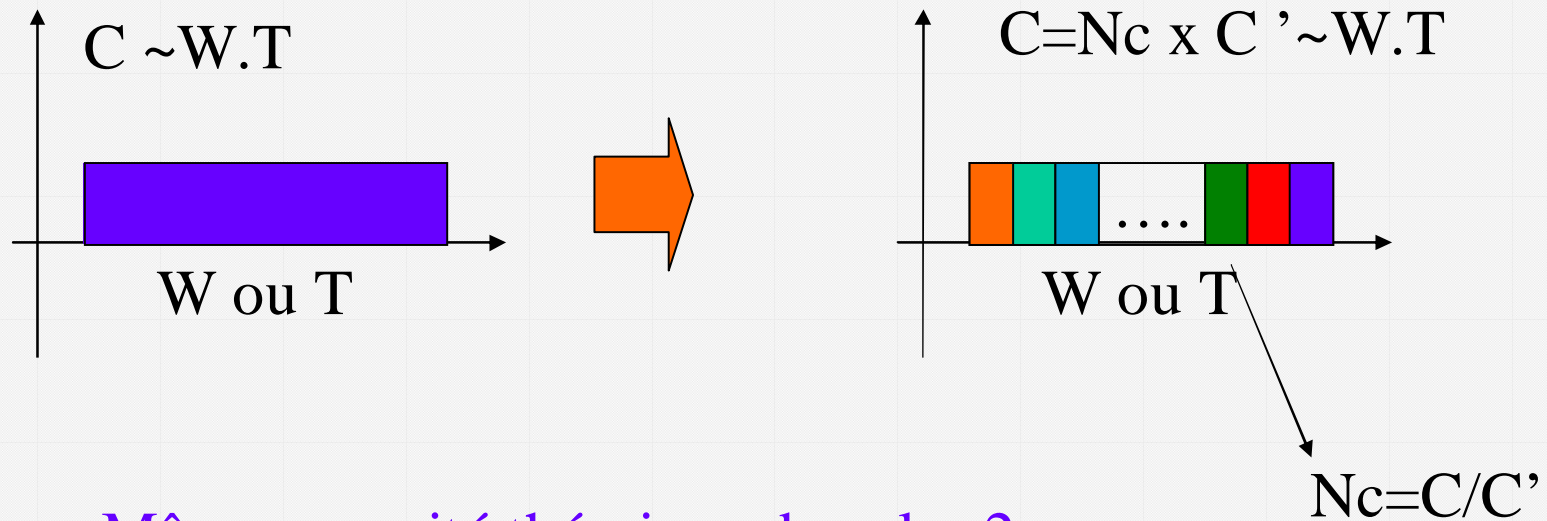


– C) F-TDMA



III-2. Accès multiples

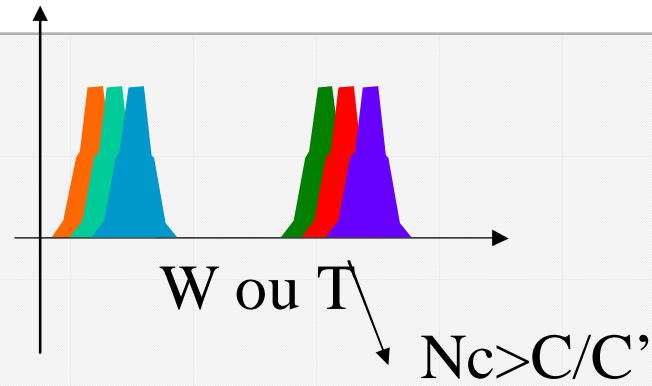
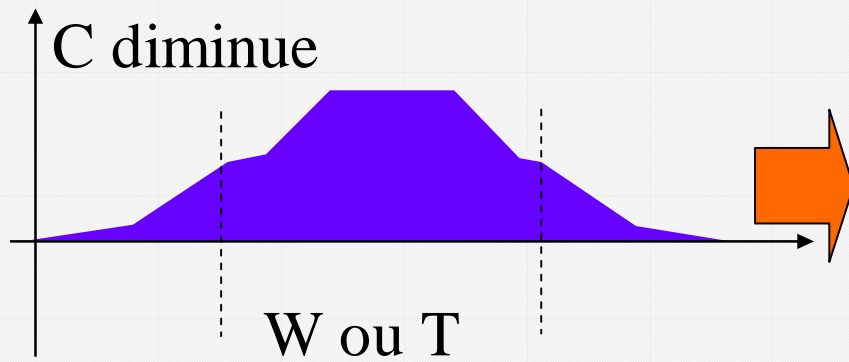
■ Efficacité théorique



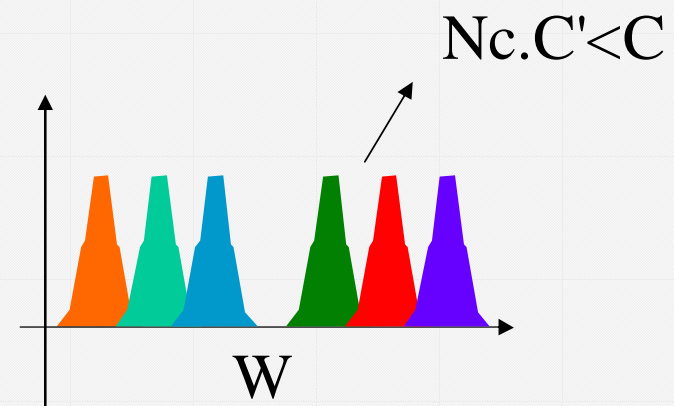
Même capacité théorique dans les 2 cas

III-2. Accès multiples

■ Efficacité réelle



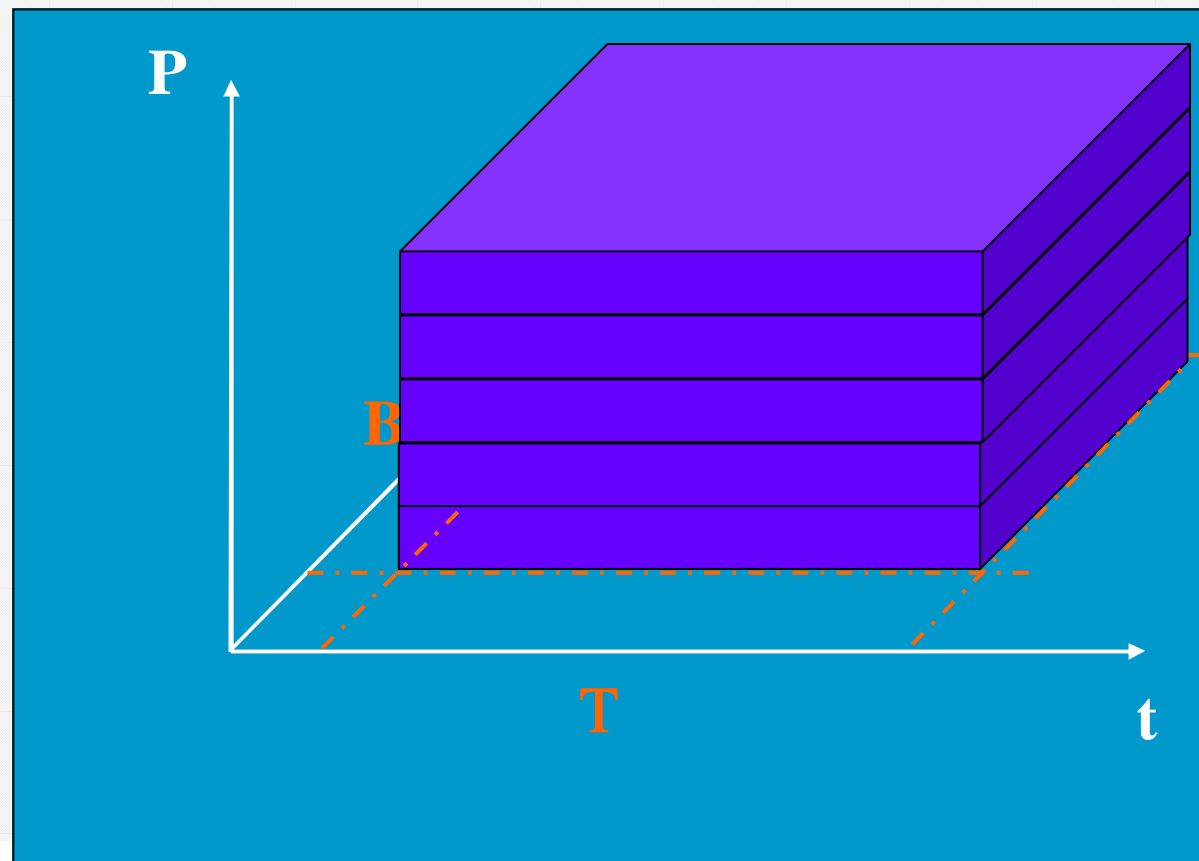
$$C = N_c C'$$



– FTDMA (TDMA)

- Le GSM est un système FTDMA, mais couramment appelé TDMA
- Définition de canaux fréquentiels à débit largement supérieur au débit d'une voie.
- Répartition de porteuses par cellule.
- Répartition dans le temps: trames et slots
- applications : GSM, DECT.

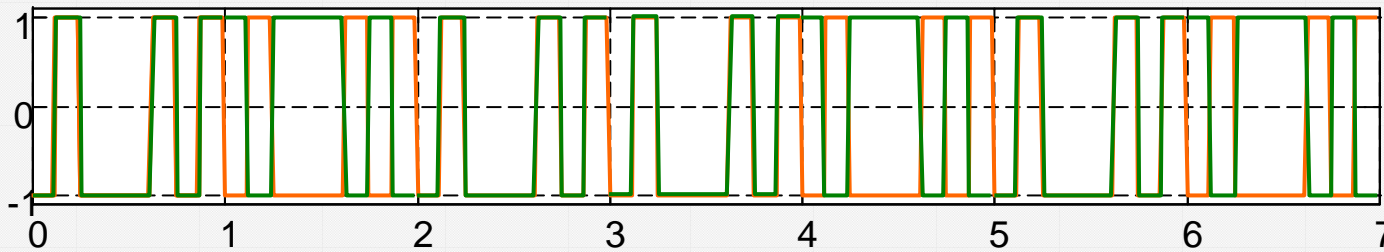
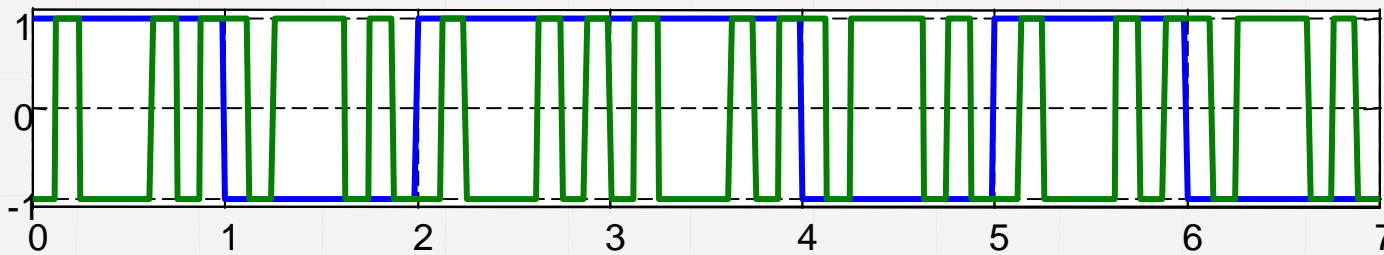
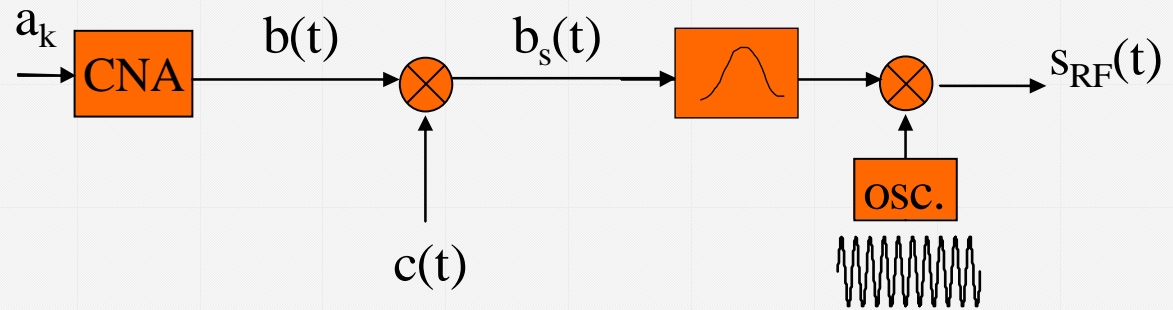
– D) CDMA



- CDMA (Code Division Multiple Access)
 - L'UMTS est un système W-CDMA
 - Définition de canaux fréquentiels à débit largement supérieur au débit d'une voie.
 - Répartition de porteuses par cellule.
 - Répartition dans le temps: trames et slots
 - applications : GSM, DECT.

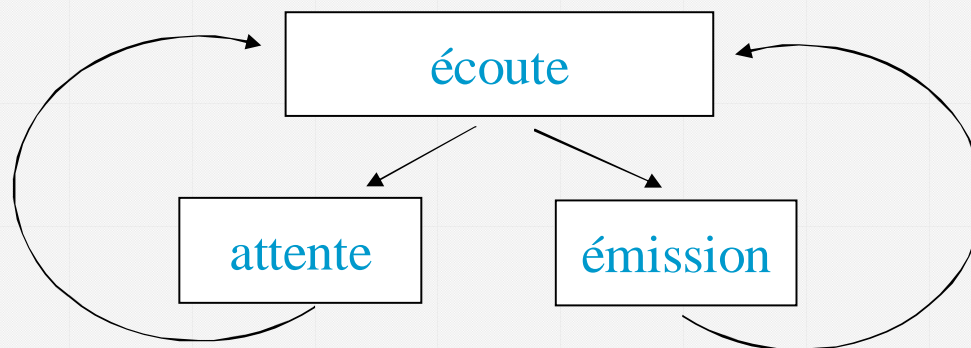
III-2. Accès multiples

le codeur



E. CSMA/CA

- Carrier Sense Multiple Access / Carrier Avoidance
- Remplace un TDMA
 - Pas de synchronisation
 - Pas de réservation de ressources
- Cycle :



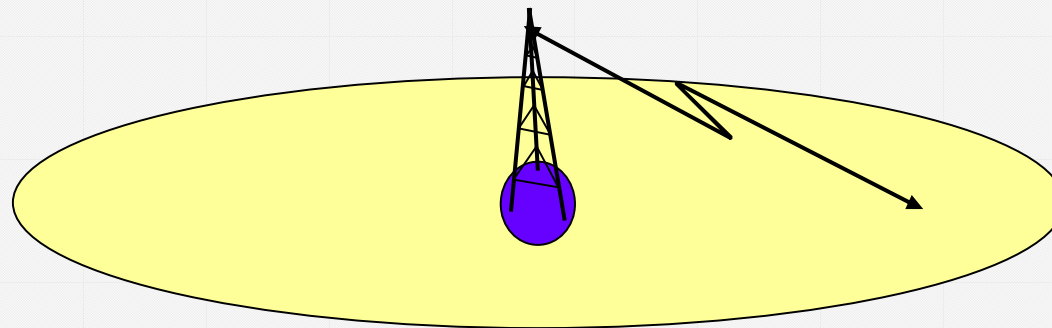
Plan général

I. Caractéristiques des ressources radio

II. Propagation et bilan de liaison

III. Partage des ressources

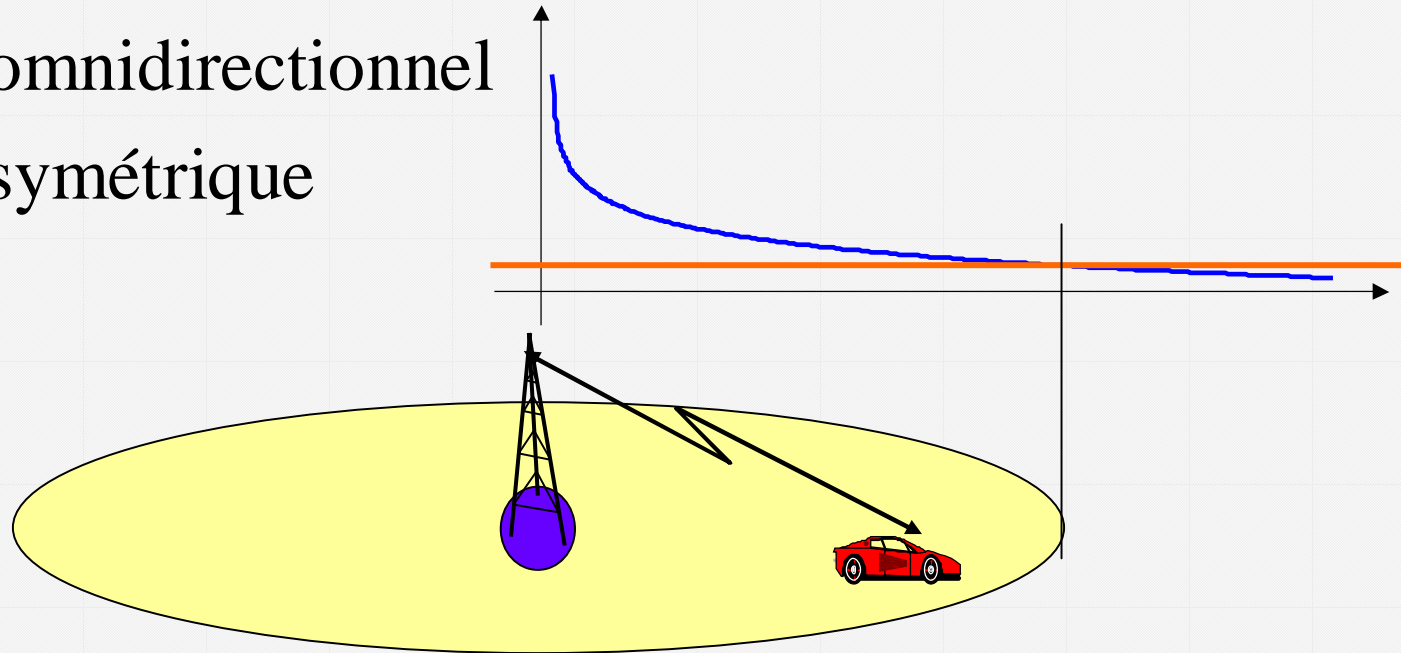
IV. Cellulaire



IV. Cellulaire : concepts de base

■ A) Bilan de liaison

- affaiblissement logarithmique
- omnidirectionnel
- symétrique



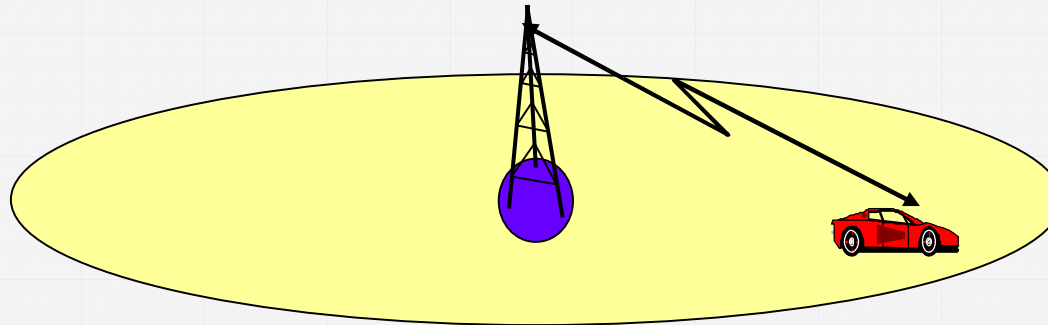
IV. Cellulaire

$$P_{dBm}(d) = P_{dBm}(d_0) - 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

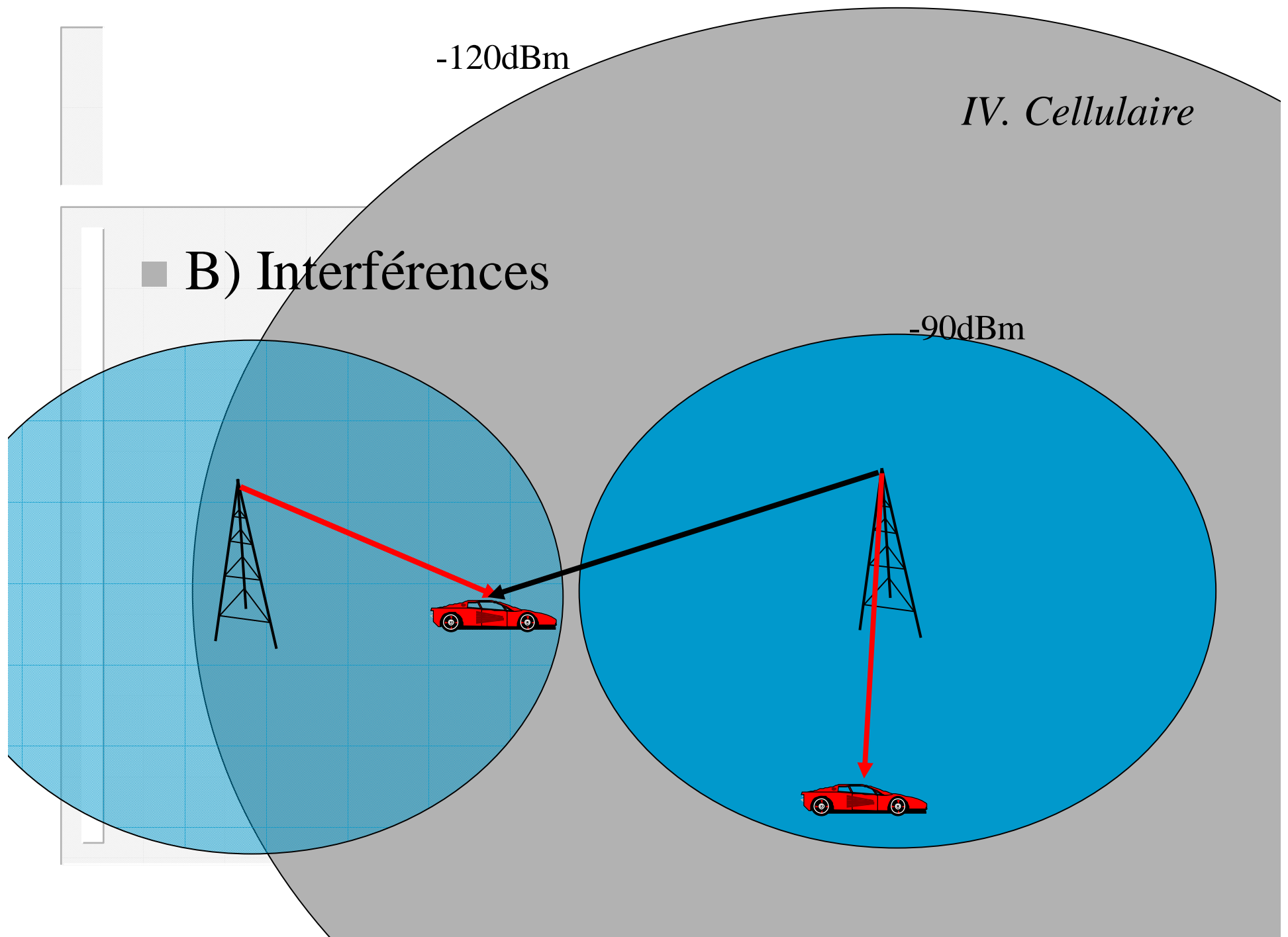
Loi d'affaiblissement

$$2 < n < 4$$

$$P_{mW}(d) = P_{mW}(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^n$$



■ B) Interférences



IV. Cellulaire

– 2 contraintes $\frac{C}{N+I} = SINR \geq S_{I+N}$

$\frac{C}{N} = SNR \geq 2 \cdot S_{I+N}$

$\frac{C}{I} = SIR \geq 2 \cdot S_{I+N}$

Soit en dB :

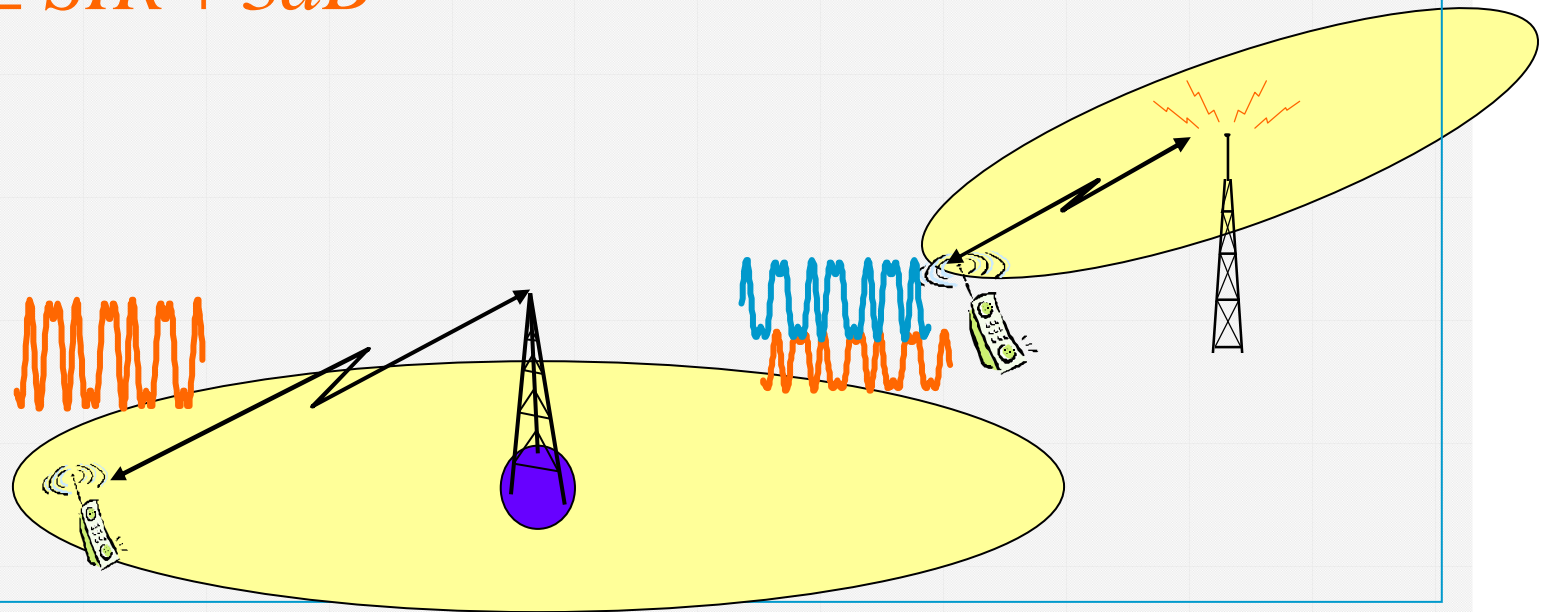
$\frac{C}{N} \geq S_N = S_{I+N} + 3dB$

$\frac{C}{I} \geq S_I = S_{I+N} + 3dB$

– C) Interférences co-canales (**spatial**)

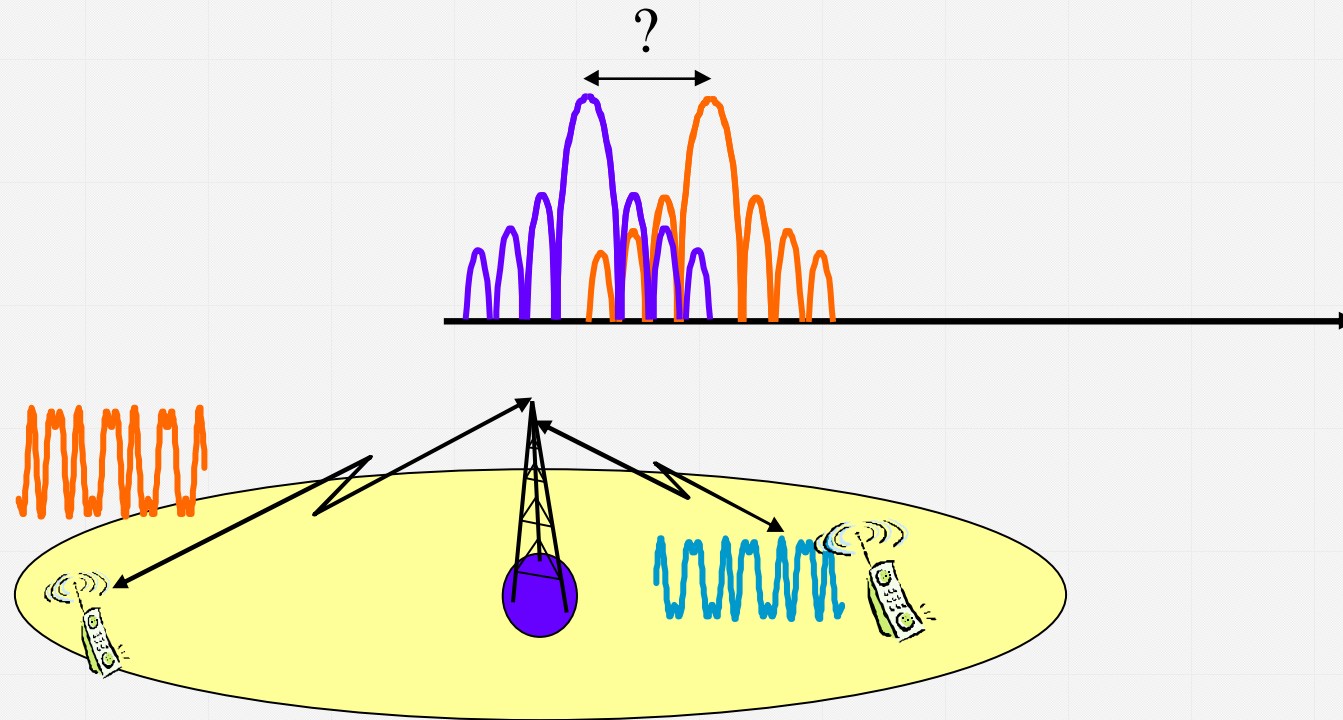
$$\frac{C}{I} \geq SIR + 3dB$$

Icc :



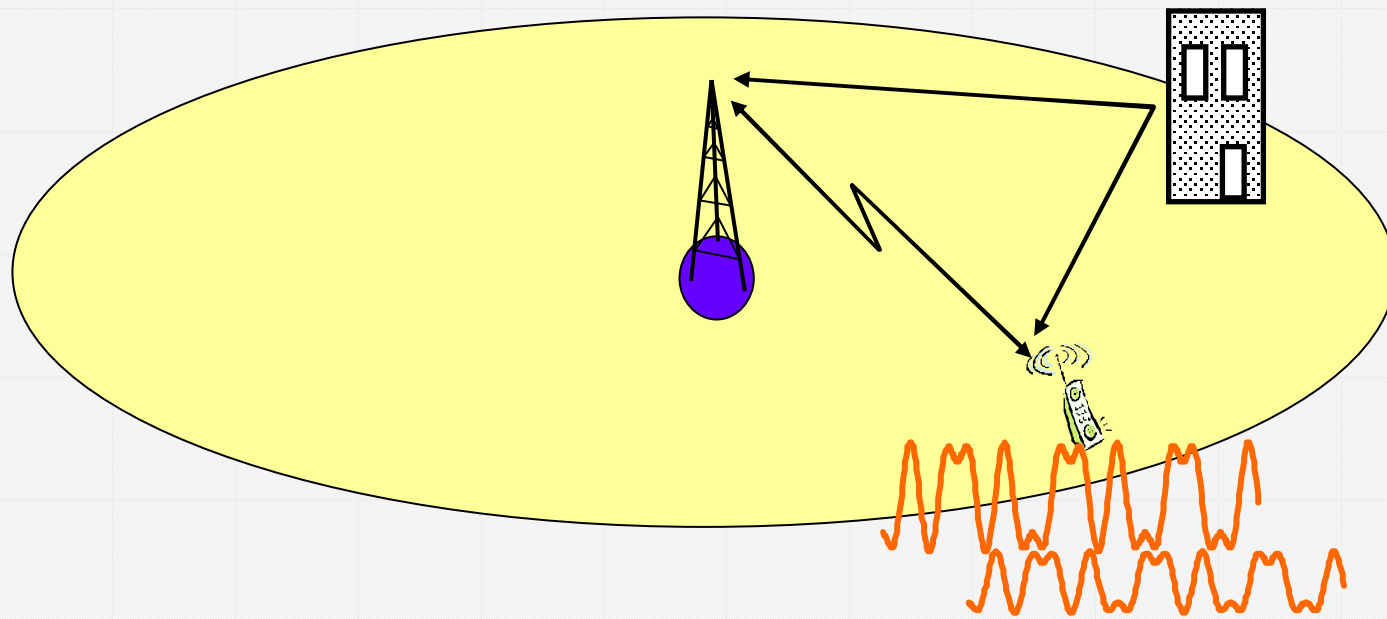
– D) Interférences canaux adjacents (**fréquentiel**)

Ica :



– E) Interférences inter-symboles (**temporel**)

Iis :

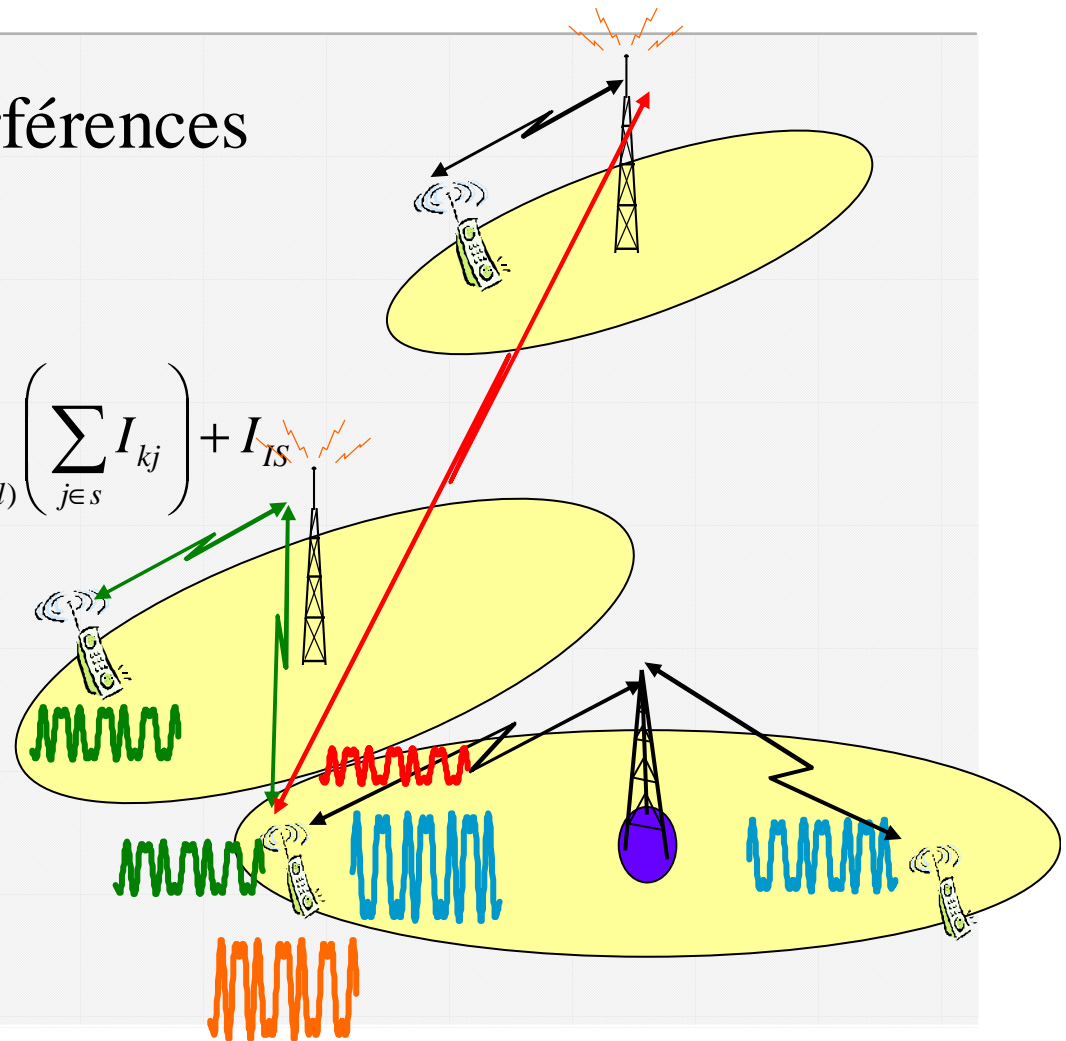


IV. Cellulaire

– D) Calcul d'interférences
sur 1 cellule

$$I_k = I_{CC} + I_{CA} + I_{IS}$$

$$\sum_{s \in C(\text{cell})} I_{k,k(s)} + \sum_{j \in \text{incell}} I_{kj} + \sum_{s \in V(\text{cell})} \left(\sum_{j \in s} I_{kj} \right) + I_{IS}$$



Les lois d'Erlang

$$P_c = \frac{A_{tot}^{N_c} \frac{1}{N_c!}}{\sum_{n=0}^{N_c} A^n \frac{1}{n!}}$$

IV. Cellulaire

Estimation des ressources nécessaires (trafic)

Taux d'appel μ , durée d'appel moyen
(H)

Intensité de trafic par utilisateur :
en Erlang : $A_u = \mu \cdot H$

Densité de population : d_h (hab/km²)
densité de trafic souhaité : $A = d_h \cdot A_u$
(erlang/km²)

(faible : 1 erlang, moyenne : 10
erlang, forte : 50 erlang)

Surface couverte : S

trafic à assurer : $A_{tot} = A \cdot S$ (en erlang)

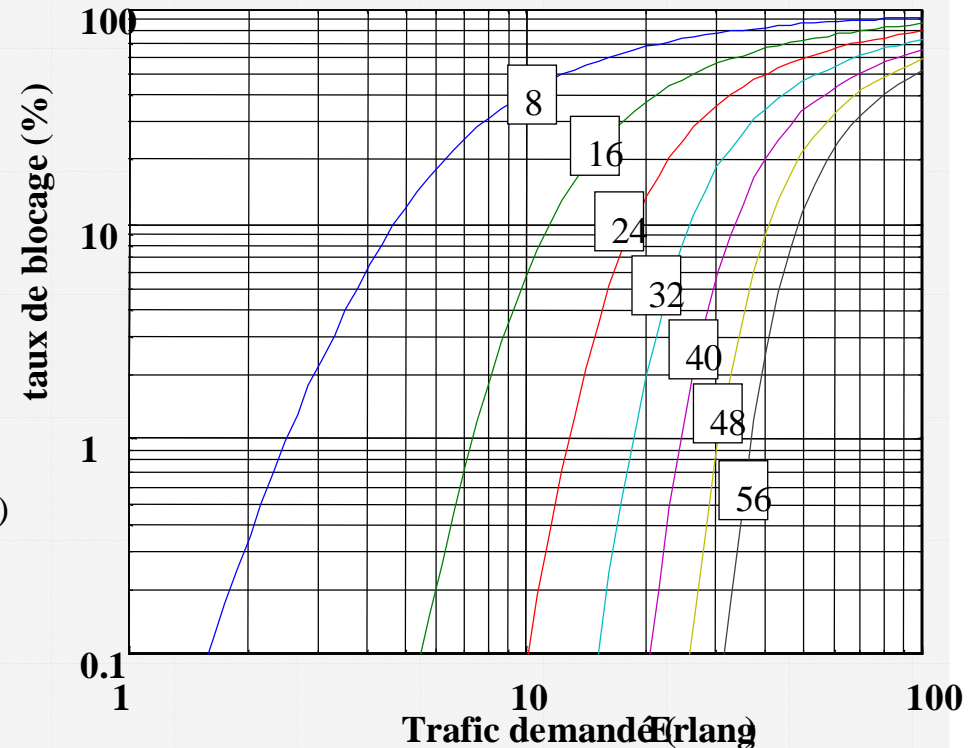
Taux de blocage :

% appels bloqués (~2%)

le taux de blocage dépend du nombre de
canaux et du trafic.

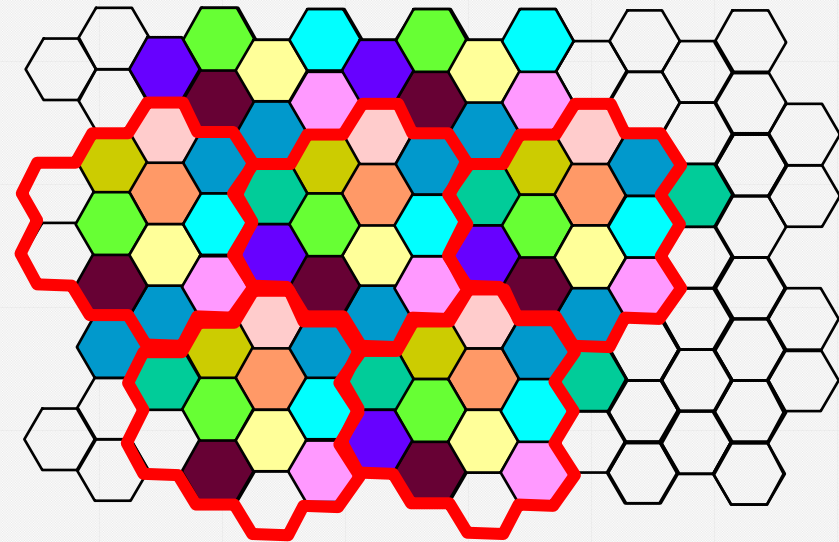
i.e. le nombre de canaux requis dépend du
trafic souhaité (densité.surface) et du taux de
blocage requis.

Etude du taux d'erreur en fonction du nombre
de canaux de données



IV. Cellulaire

- Capacité cellulaire
 - Système avec S canaux
 - Canaux alloués à un cluster de N cellules
 - k canaux par cellule
 - Un motif utilise les $S=kN$ canaux
 - Motif répété M fois
 - Capacité du réseau $C=MkN$
 - Réduire la taille N du cluster, augmente capacité
 - Réduire la surface de la cellule, augmente M et donc la capacité

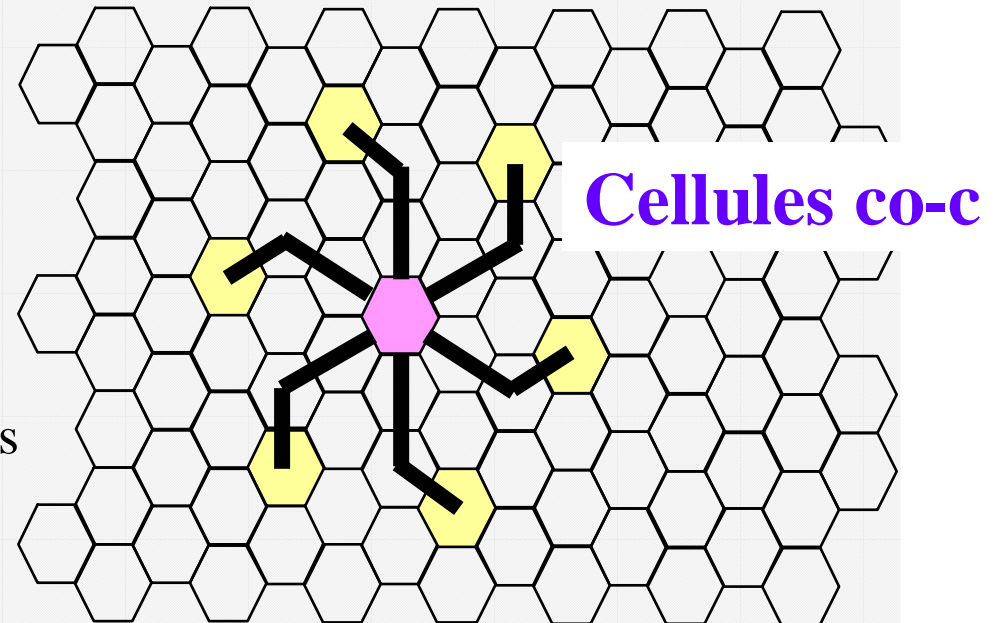


Notion de cluster

IV. Cellulaire

■ Interférence co-canal

- Cellules utilisant le même ensemble de fréquences (ou temps ou codes)
- rem : impossible de réduire ces interférences en augmentant la puissance d'émission



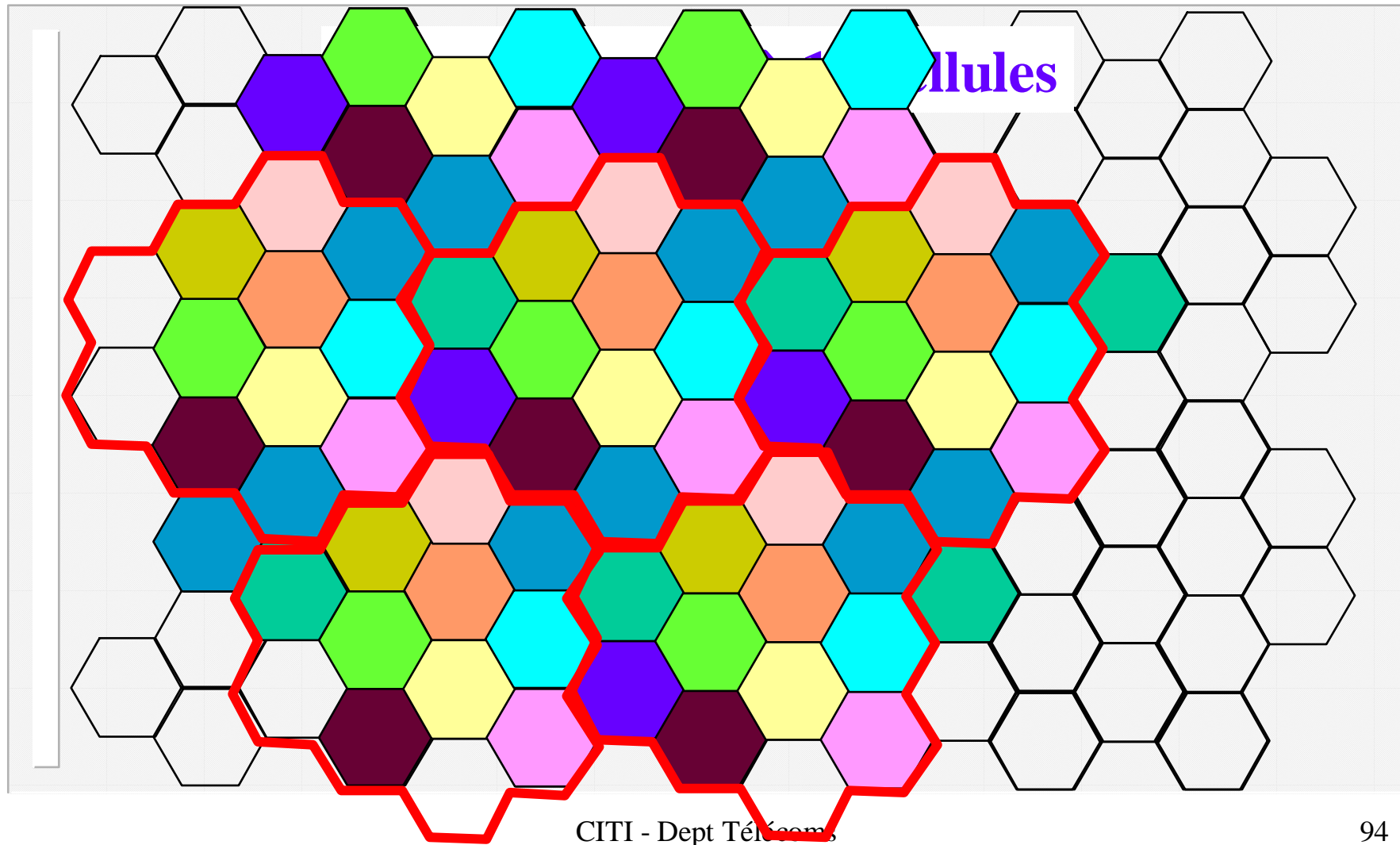
Puissance de la cellule co-canal i

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-n}}{\sum_{i=1}^{i_0} (D_i)^{-n}}$$

- Facteur de réutilisation (de canal)
 - Facteur $Q=D/R$
 - Géométrie hexagonale
 - 6 cellules co-canal
 - $N=i^2+ij+j^2$

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|----|----|----|----|
| 1 | 3 | 7 | 13 | 21 |
| 2 | 7 | 12 | 19 | 28 |
| 3 | 13 | 19 | 27 | 37 |
| 4 | 21 | 28 | 37 | 48 |

IV. Cellulaire



IV. Cellulaire

- Facteur de réutilisation co-canal (cellules de même taille)

$$\frac{C}{I} = \frac{(D/R)^n}{i_0} = \frac{(\sqrt{3N})^n}{6}$$

- n est le facteur d'atténuation
en milieu urbain n=2 à 4

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N}$$

| | N | 1 | 3 | 4 | 7 | 9 | 12 | 13 | 19 |
|-----|-----|------|-----|------|------|------|------|----|------|
| n=3 | C/I | -0,6 | 6,5 | 8,4 | 12 | 13,6 | 15,5 | 16 | 18,5 |
| n=4 | C/I | 1,75 | 11 | 13,8 | 18,7 | 20,8 | 23,3 | 24 | 27,3 |

Rem : marge de 3dB implique N=7 pour n=3