

# Communications Hertziennes (COH)

Jean-Marie Gorce

Dept Télécommunications,

Services & Usages

- Historique :

- <http://www.francetelecom.com/fr/groupe/initiatives/savoirplus/histoire/telecoms/>

1873-1895 : découverte, expérimentation des ondes EM

1873 : JC Maxwell en prédit l'existence.

1887 : H. Hertz les observe.

1890 : E. Branly réussit à les capter (1ère antenne?)

1895 : l'Italien G. Marconi réalise la 1ère transmission radio en morse. (marconigrammes).

(1897 : démonstration aux investisseurs)

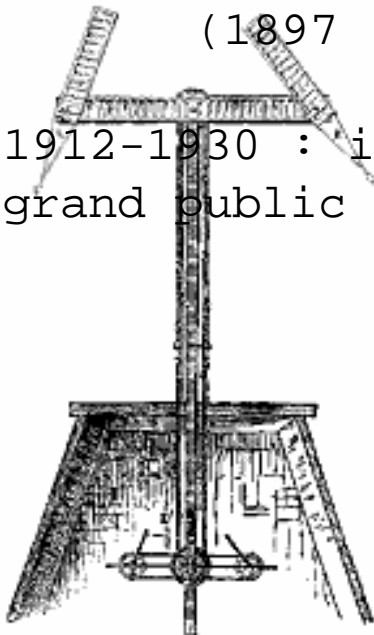
1912-1930 : inventions et mise en œuvre des premiers services grand public

1912 : le SOS du Titanic est capté par le navire Carpathia et sauve 800 personnes

1920 : 1ère liaison radiotélégraphique France-Amérique ouverte au public.

1924 : Première utilisation de la radio mobile par la police américaine.

1927 : 1ère liaison radiophonique Londres-New-York.

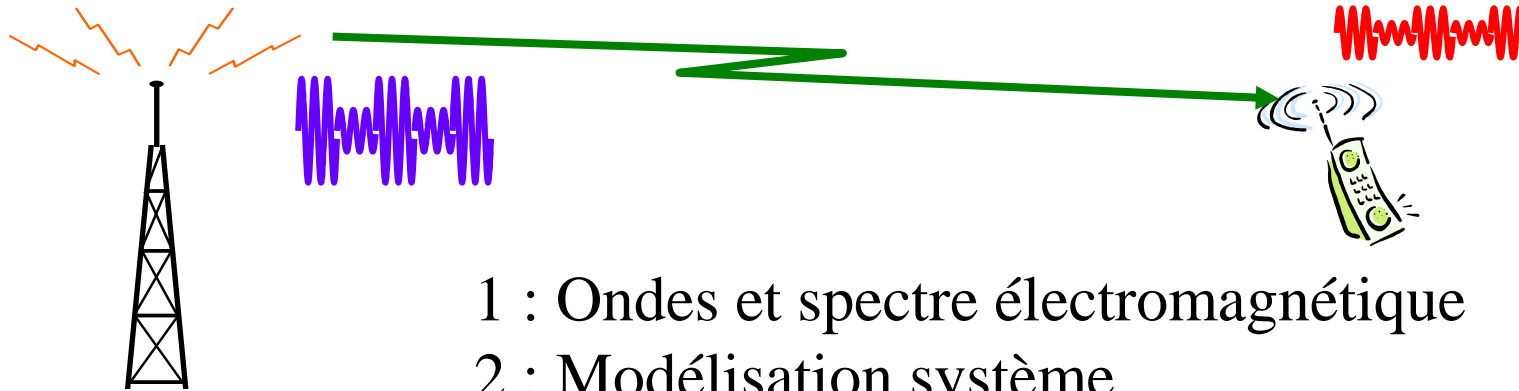




# Plan du cours

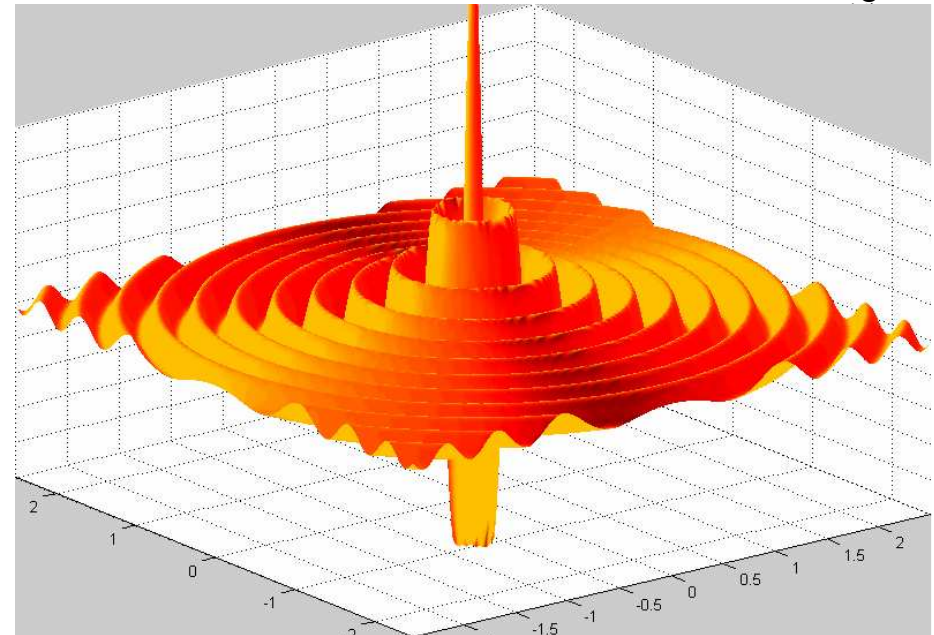
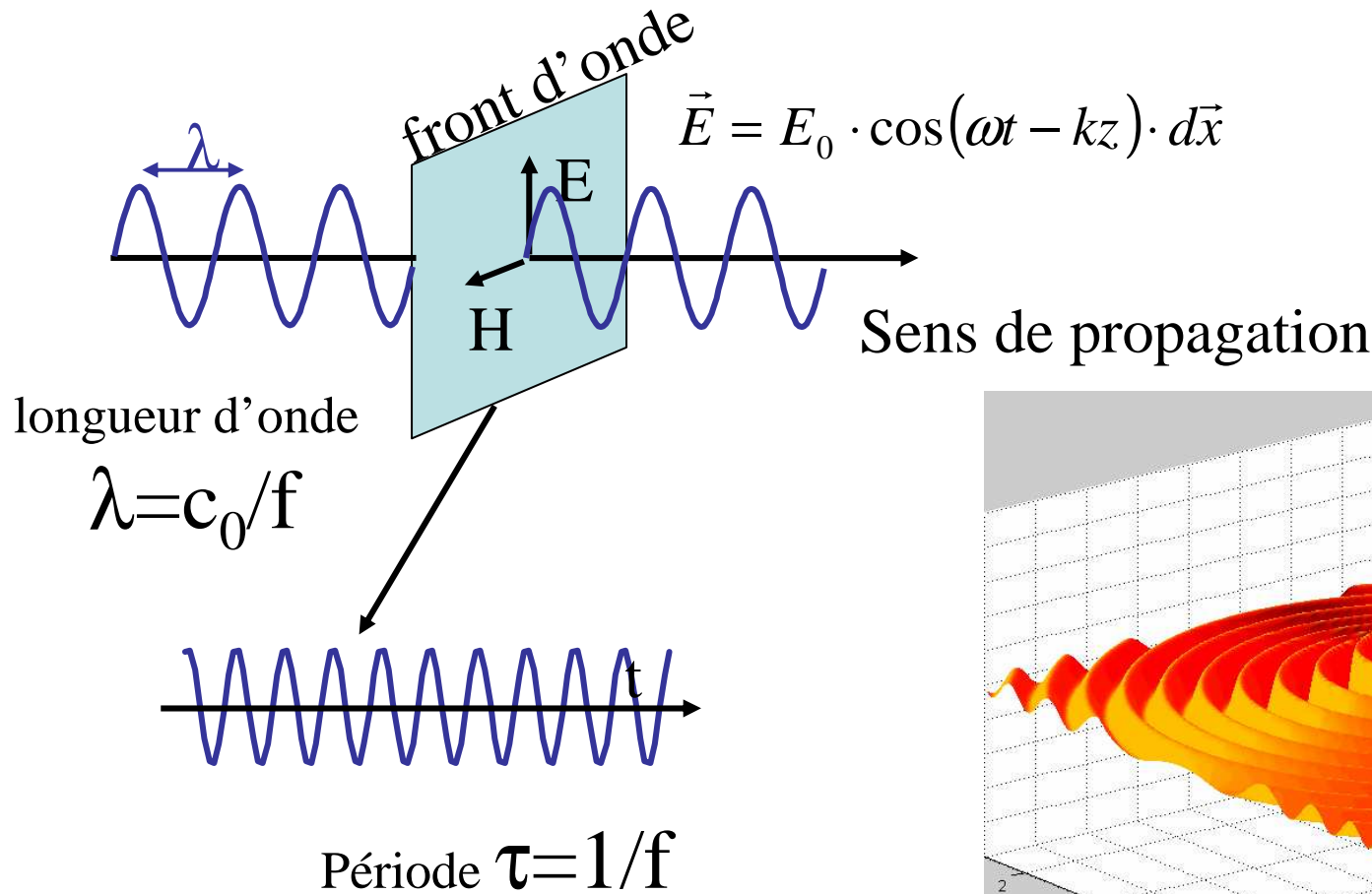
- **PARTIE I : ONDES – PROPAG : THEORIE (3h)**
  - Chap 1- Les ondes électromagnétiques (1h)
  - Chap 2- Rappels sur les mécanismes de propagation (1h)
  - Chap 3- Bilans de liaison (1h)
- **PARTIE II : LES ANTENNES: THEORIE (6h)**
  - Chap 4- Les antennes : propriétés générales (3h)
  - Chap 5- Les antennes filaires: du doublet aux éléments finis (2h)
  - Chap 6- Les différents types d'antennes → GVI (1h)
  - Chap 7- Les antennes en réseau (1h)
- **PARTIE III : SYSTEMES : CANAL RADIO et RECEPTION (6h)**
  - Chap 8- Modèles de propagation (2h)
  - Chap 9- Narrow-band flat fading (2h)
  - Chap 10- Wideband fast fading (2h)
- **PARTIE IV : INGENIERIE RADIO (4h)**
  - Chap 11- Le cellulaire : description du GSM / dimensionnement (2h)
  - Chap 12- Les wLANs : description du wLAN / déploiement (2h)

# Introduction

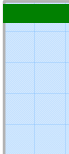


- 1 : Ondes et spectre électromagnétique
- 2 : Modélisation système
- 3 : Propagation / Antennes
- 4 : Modulation
- 5 : Capacité
- 6 : Canal radio
- 7 : Systèmes
- 8 : Interférences
- 9 : partage de ressources
- 10 : normalisation

# 1 – ondes et spectre

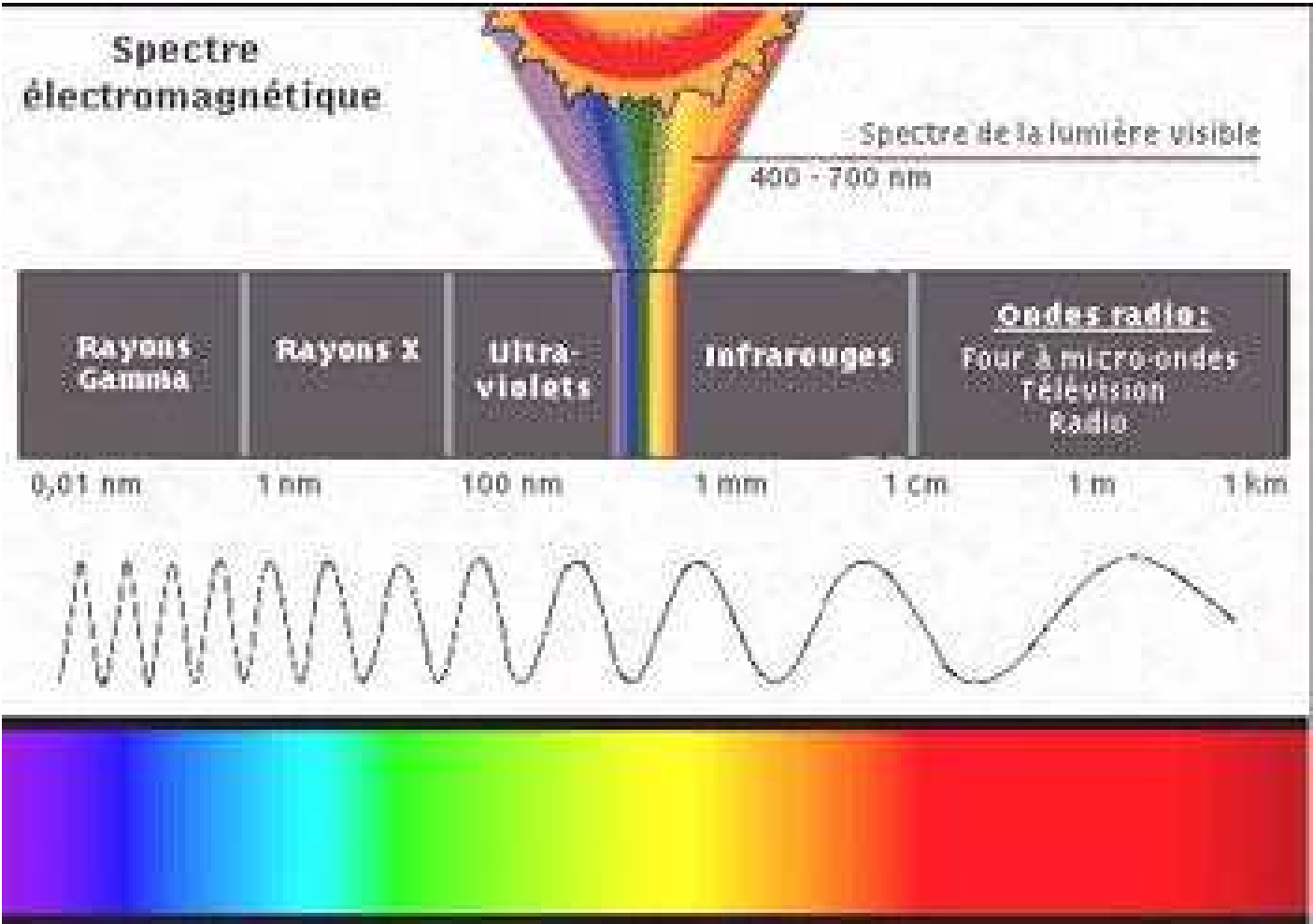


coms - INSA Lyon



# Introduction

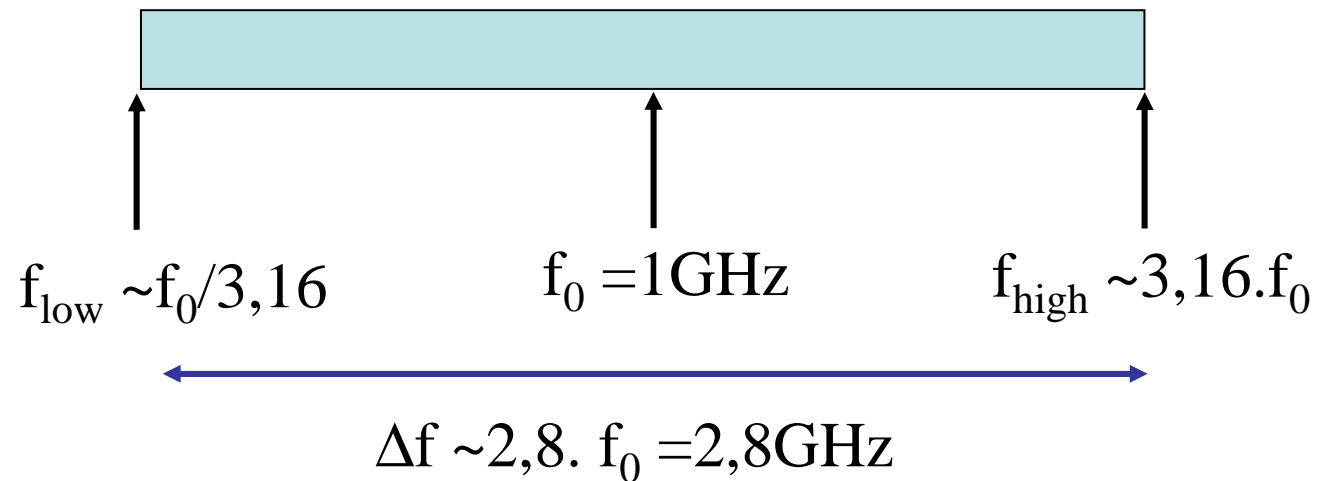
... et spectre





- Définition de bandes (ex: UHF)
  - *normalisation*

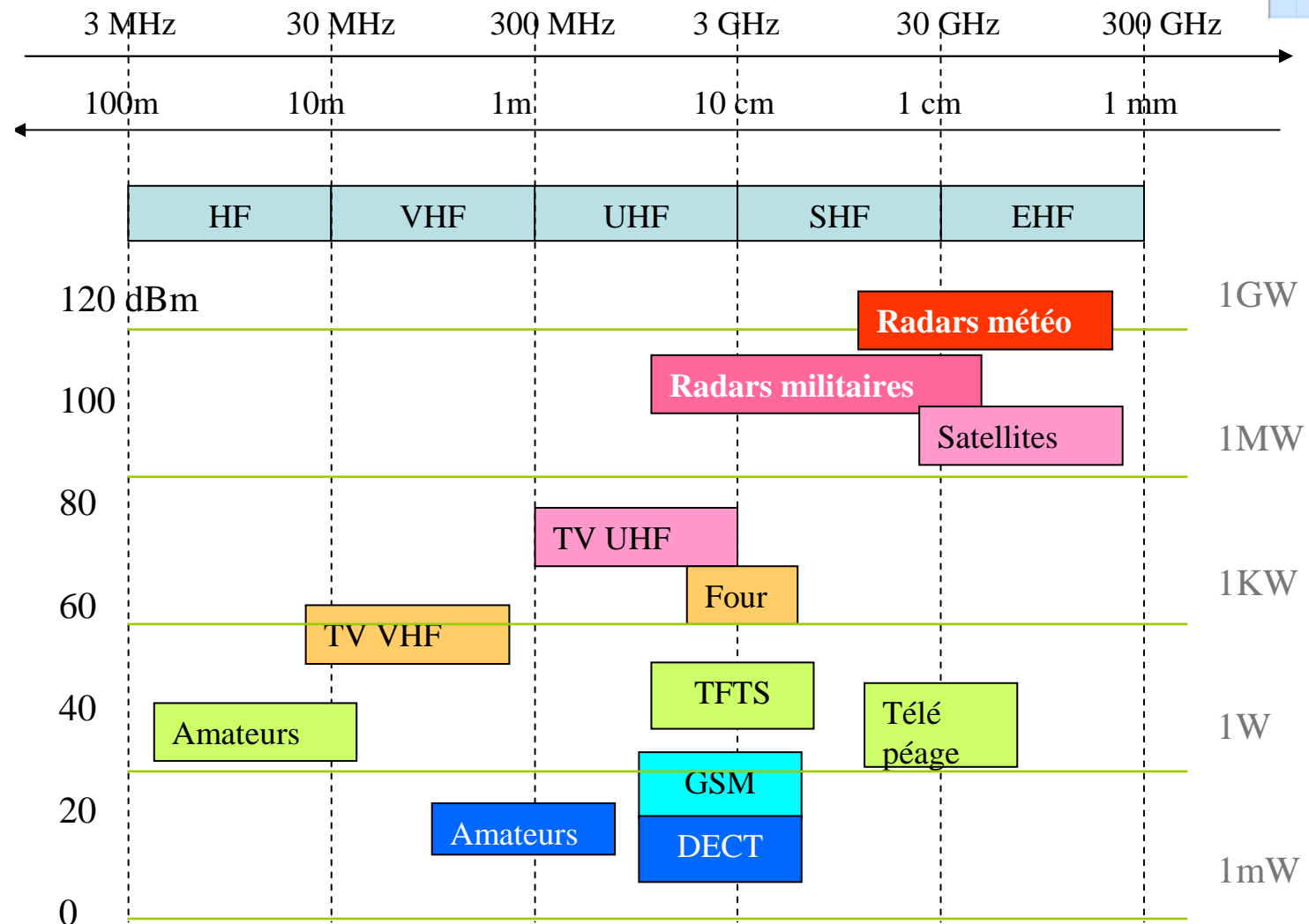
(régulier sur une échelle logarithmique\*)



$$f_{\text{high}} = 10.f_{\text{low}}$$

# Introduction

... et spectre

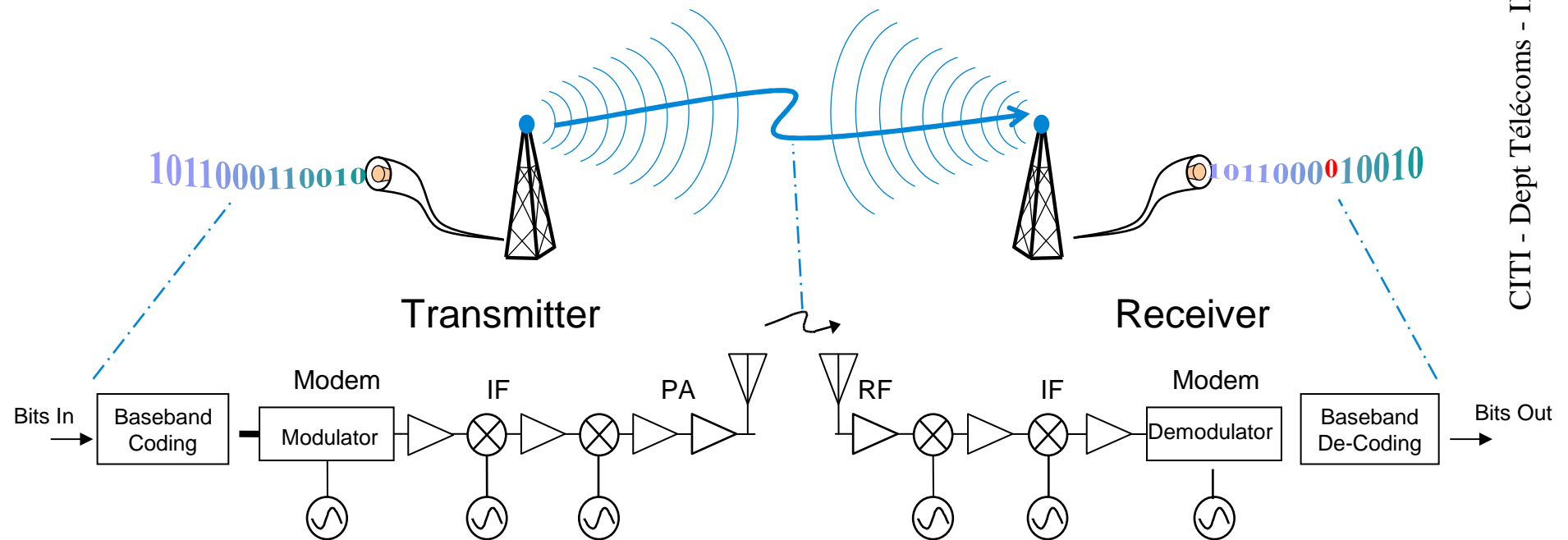


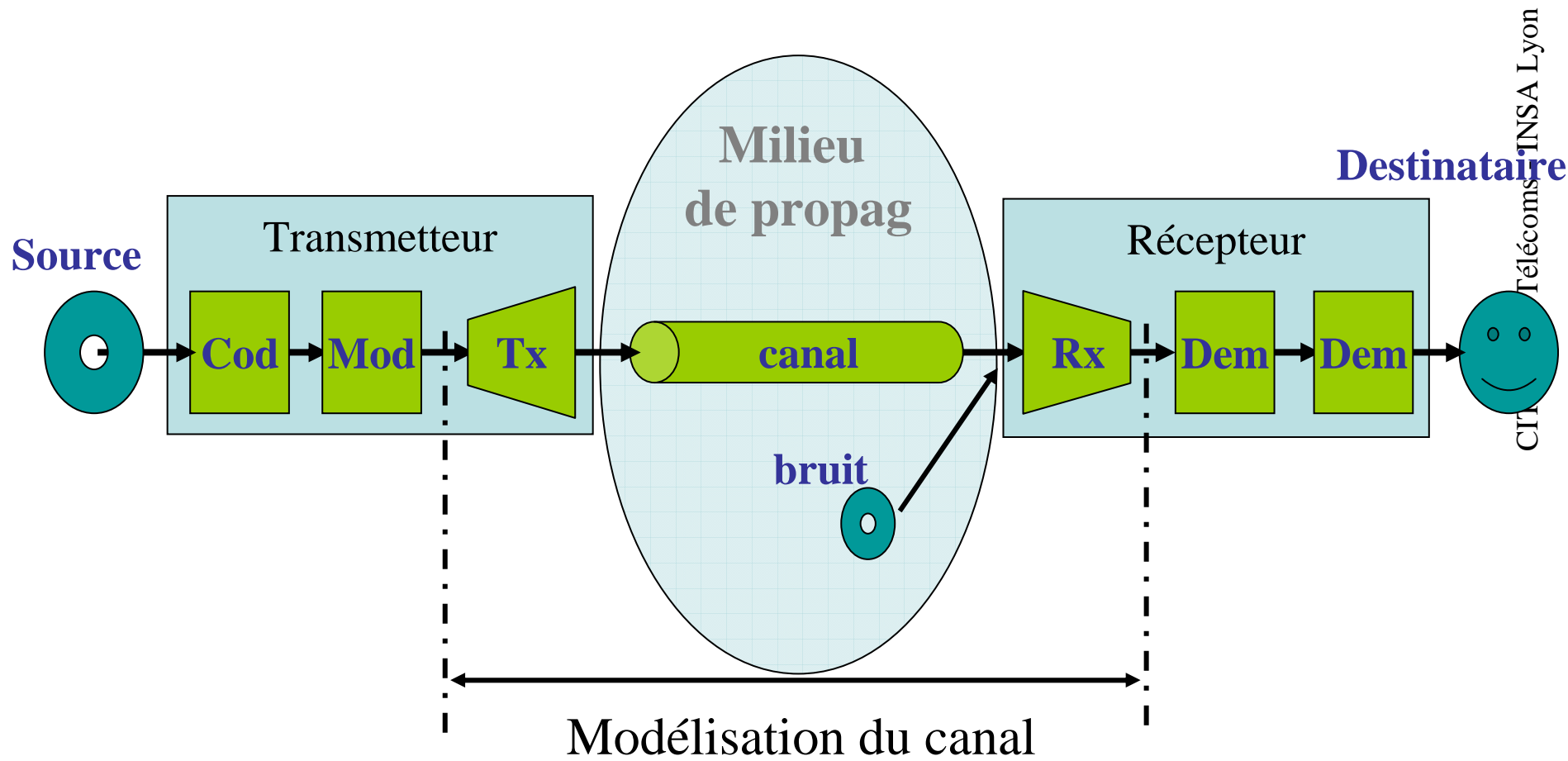
Plus de détails → <http://frequences-scanner.ift.fr/>

# 2 – modélisation

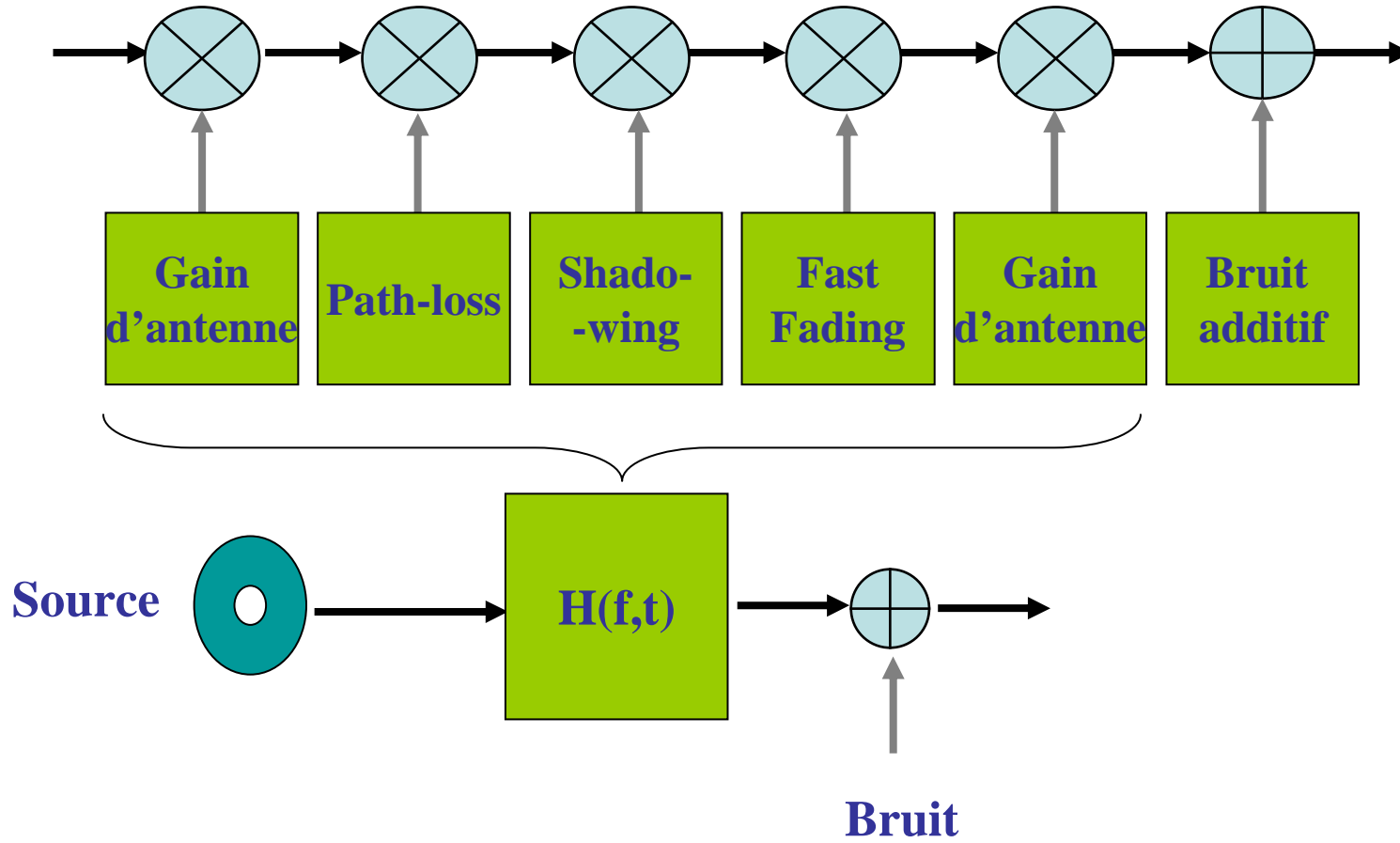


- Modélisation de la chaîne de transmission



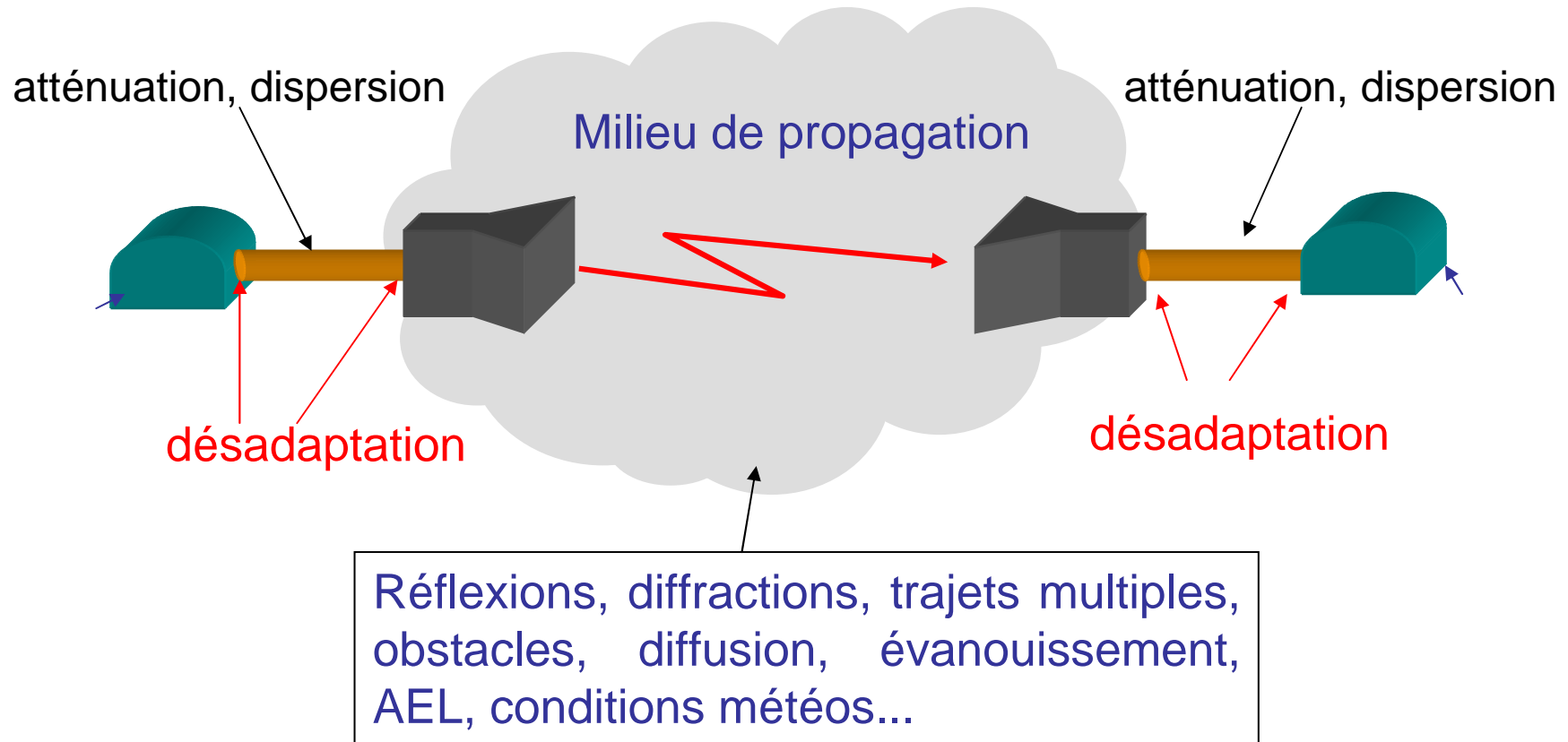


CI\* Télécoms INSA Lyon



# 3 – propagation

Introduction
Propagation



Et tous ces paramètres varient en fonction de la fréquence, du temps et même de la polarisation de l'onde.



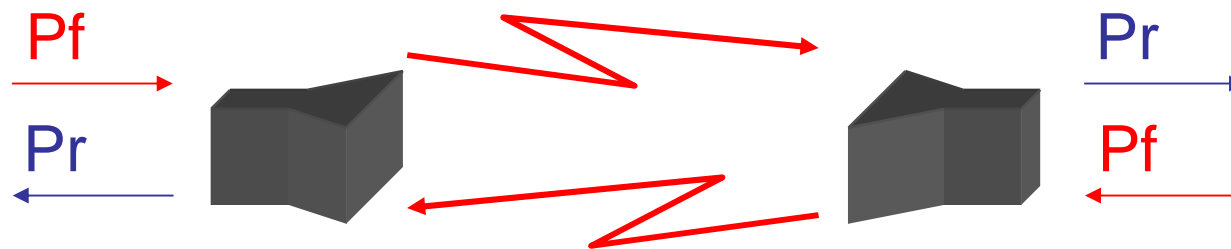
- La propagation est étudiée à l'aide des équations de Maxwell
  - Solutions ondulatoires : ondes planes/sphériques
  - Bilan de liaison : formule de Friiz
  - Interactions avec l'environnement
- 4 grands théorèmes en découlent
  - le théorème de réciprocité de Lorentz
  - le théorème de Huygens-Fresnel
  - la théorie des images
  - le principe de Babinet

- Réciprocité de Lorentz

Si on considère deux distributions de courants I1 et I2 qui sont à l'origine de champs E1 et E2, on montre d'après les équations de Maxwell :

$$\iiint_V \vec{E}_2 \cdot \vec{I}_1 \cdot dV = \iiint_V \vec{E}_1 \cdot \vec{I}_2 \cdot dV$$

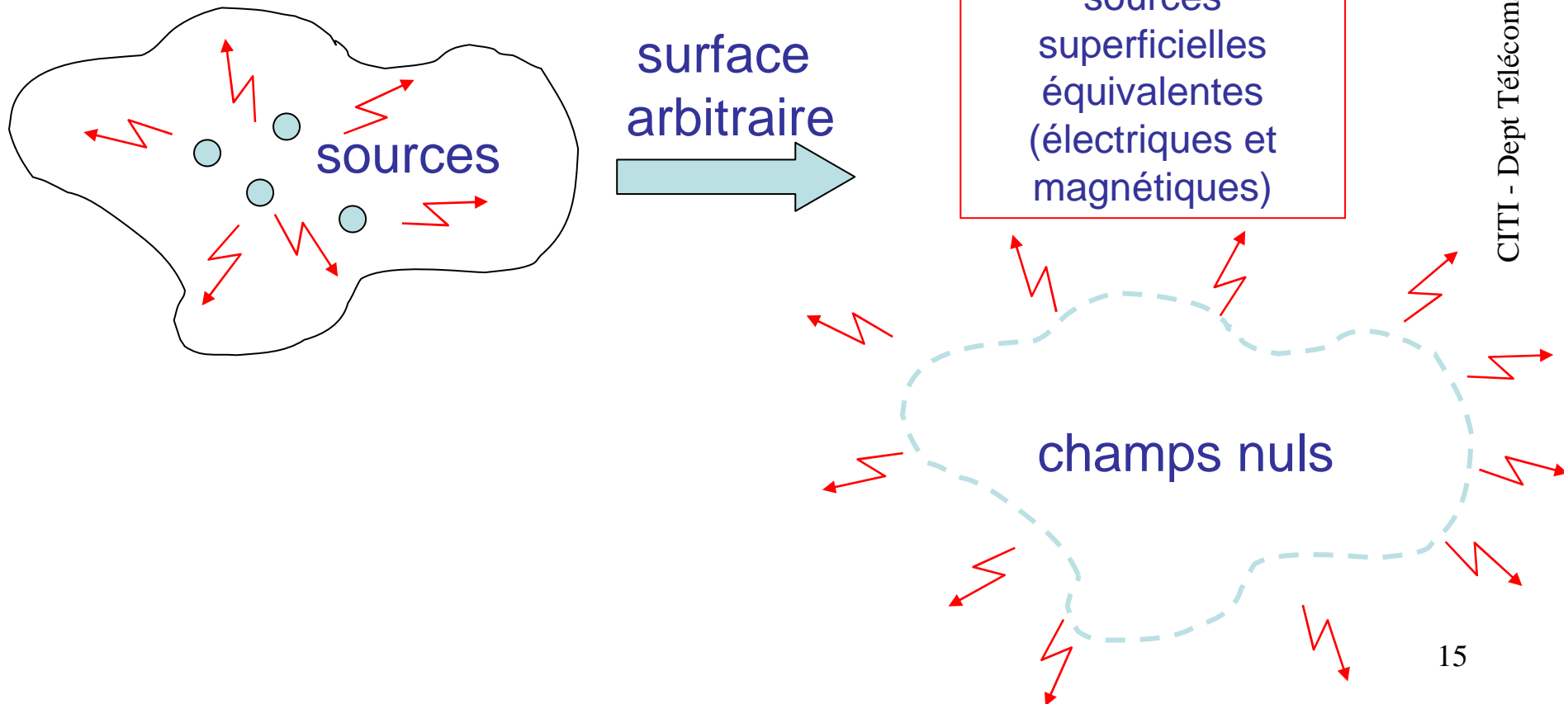
→ les systèmes rayonnants sont réciproques (attention seulement dans le cadre des antennes passives).





- Principe de Huyghens-Fresnel

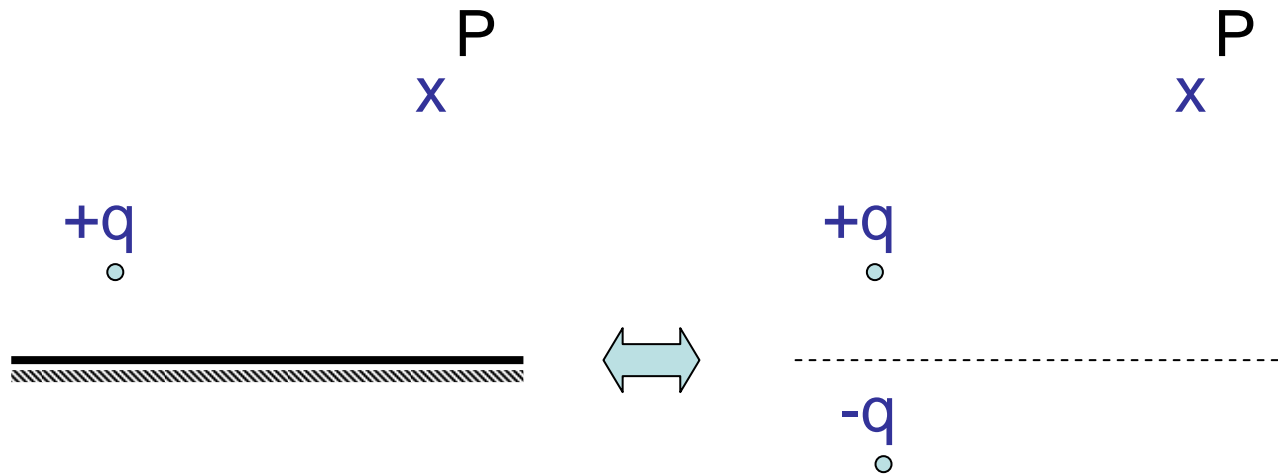
Principe permettant de calculer le rayonnement à l'infini de n'importe quel type de source





- Théorème des images

Au niveau d'un point d'observation, le champ créé par une source  $+q$  placée au-dessus d'un plan réflecteur parfait de dimensions infini est équivalent au champ créé par l'association de cette charge avec son image par symétrie par rapport au plan de charge  $-q$ .



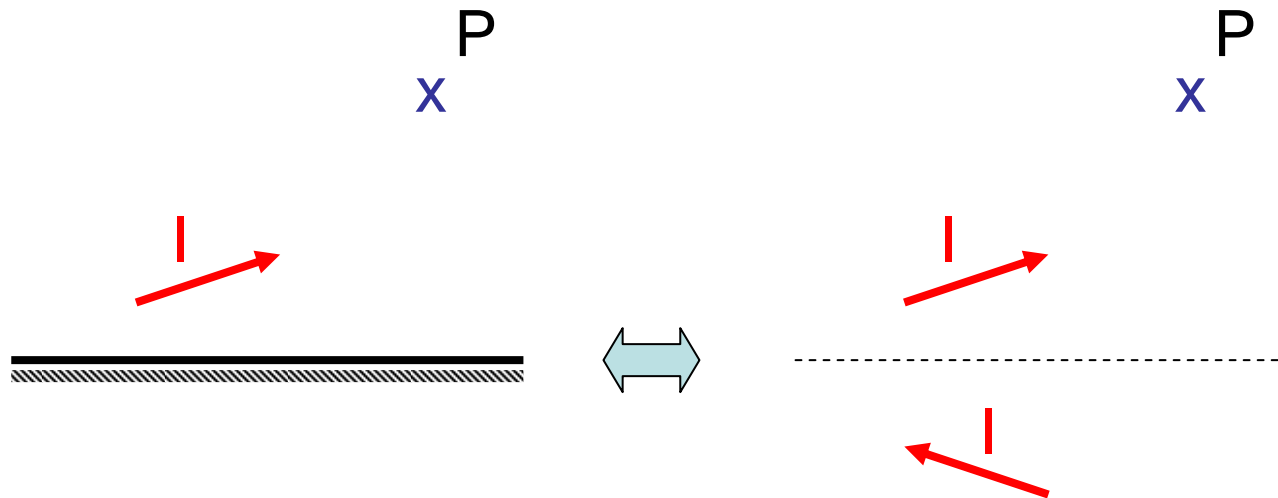


## → images en courant

Le même principe s'applique pour les sources de courants.

L'image sera formée de la symétrie de la répartition de courant de signe opposé (opposition de phase).

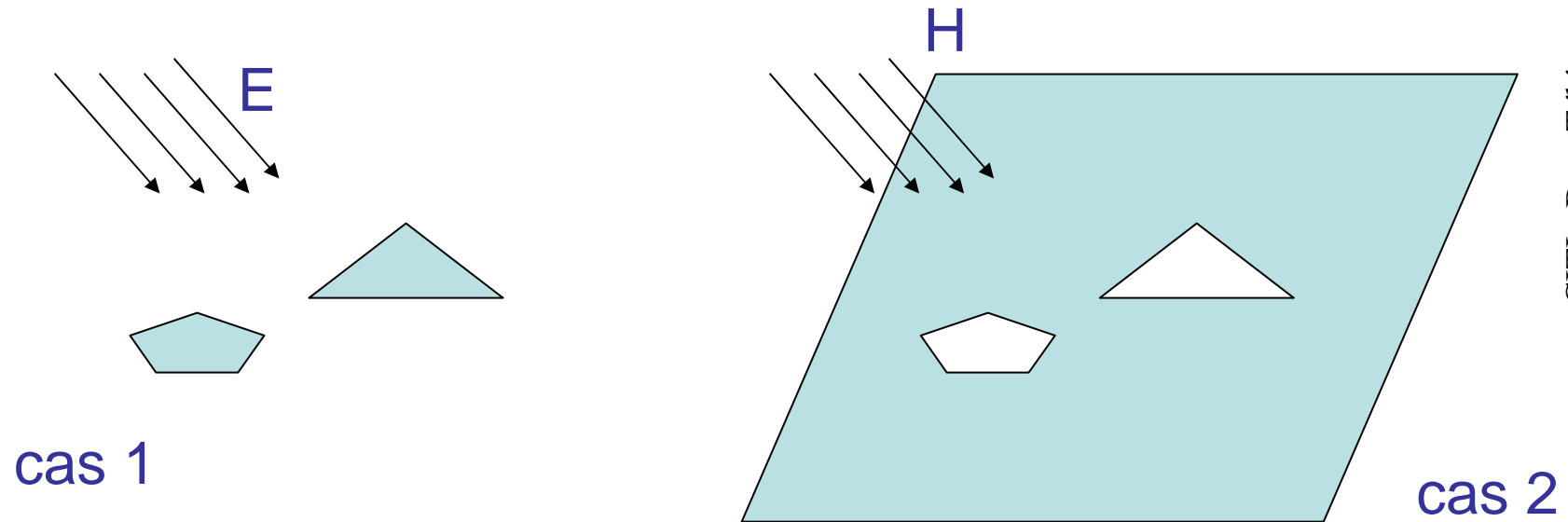
➤ à la base de très nombreuses applications en antennes





- Principe de Babinet

Le théorème de Babinet reprend l'aspect symétrique des équations de Maxwell

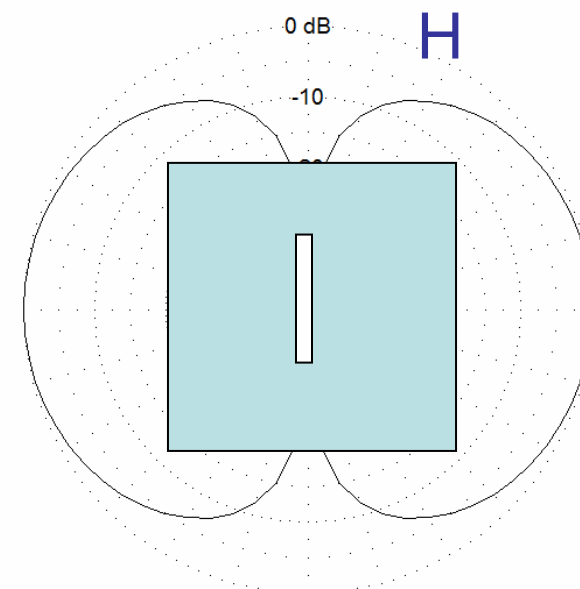
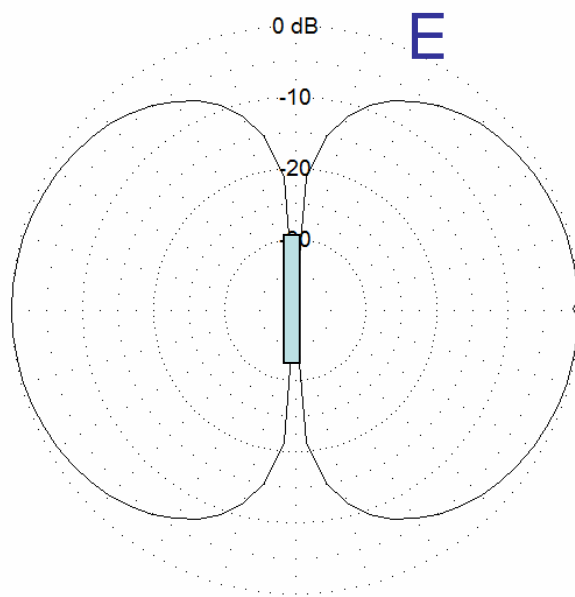


Le champ total du cas 1 va être égal au champ diffracté du cas 2 et inversement.



### ➔ Application aux antennes

Toute fente pratiquée dans un plan de masse de grande dimension aura le même comportement en rayonnement que l'antenne métallique complémentaire à ceci près que les champs E et H sont inversés.

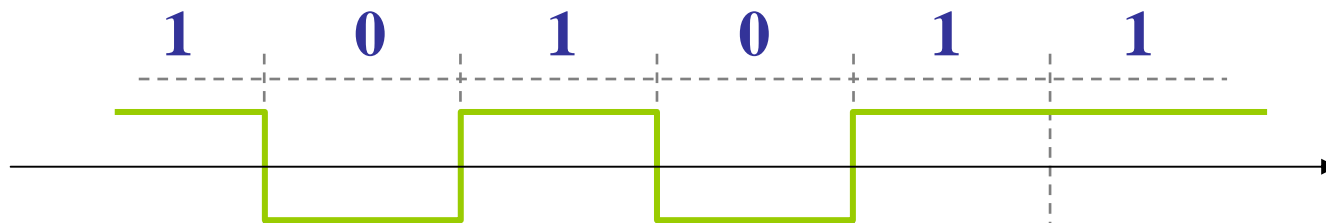


# 4 – Modulation



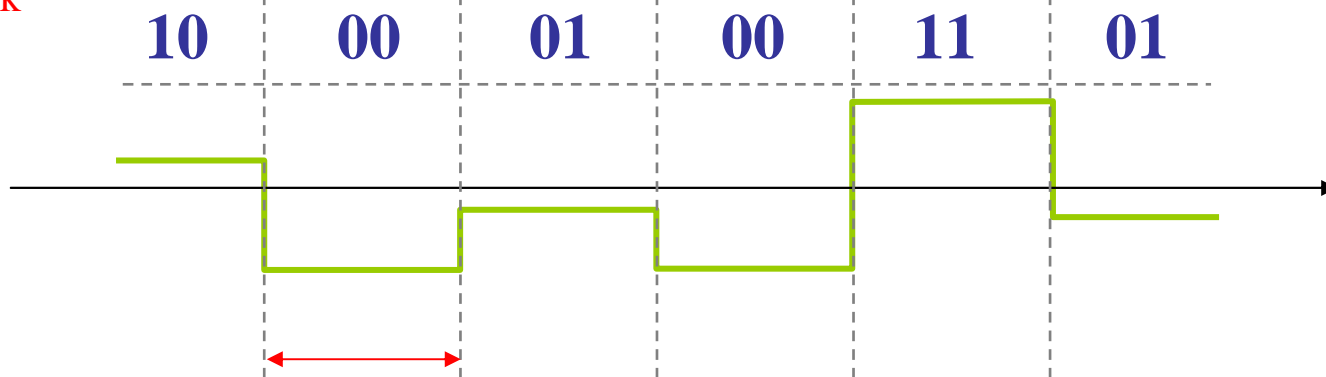
## A) signal en bande de base

- signal bipolaire



- signal M-polaire

$$M=2^k$$



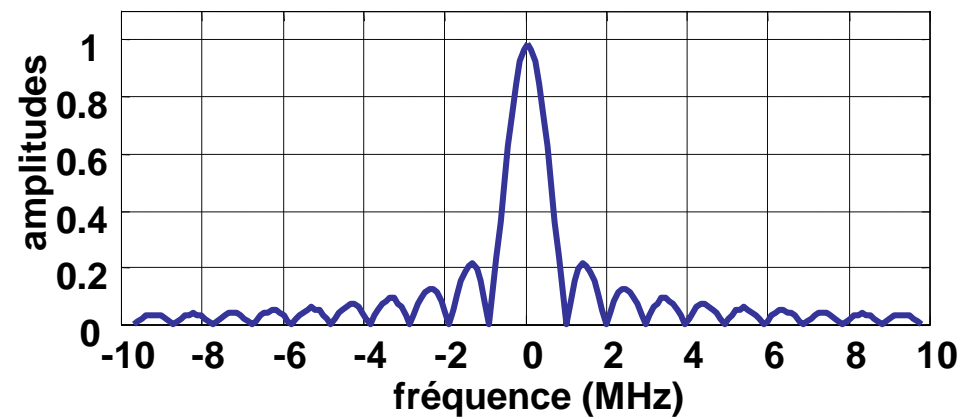
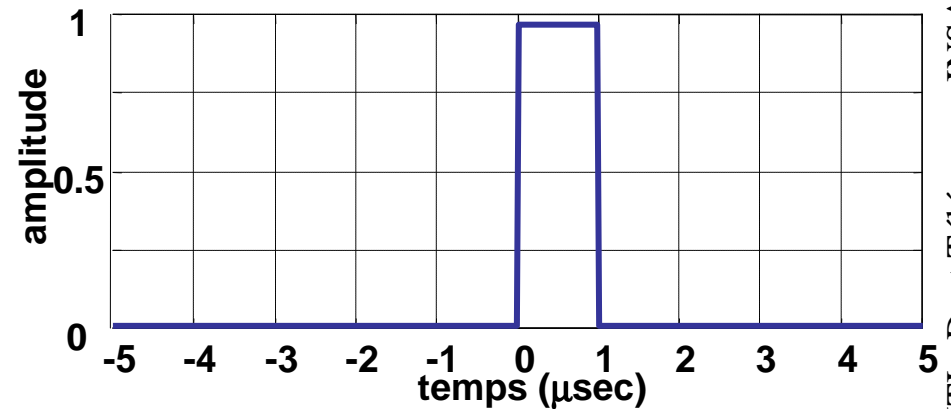
$$T_s = k \cdot T_b$$

$$R_b = k \cdot R_s$$

## B) Propriétés spectrales

- spectre d'un symbole

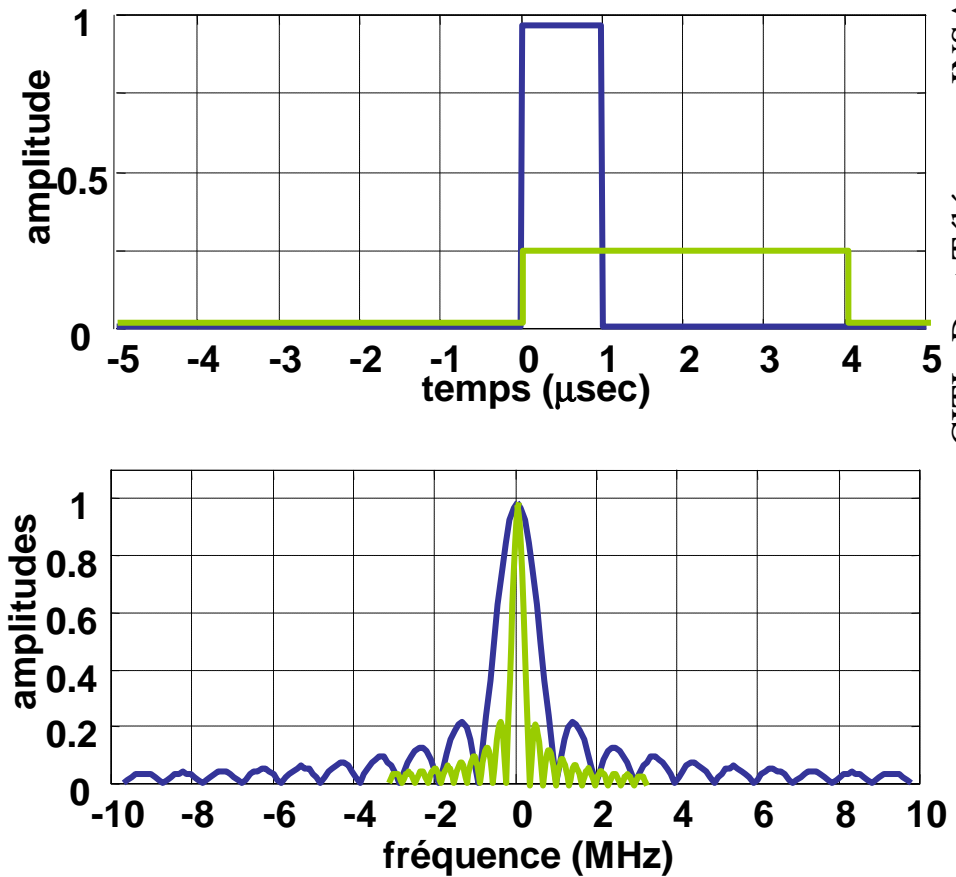
$\Delta f = 2/T$  (lobe principal)  
 $\Delta f = 1/T$  (lobes secondaires)



## B) Propriétés spectrales

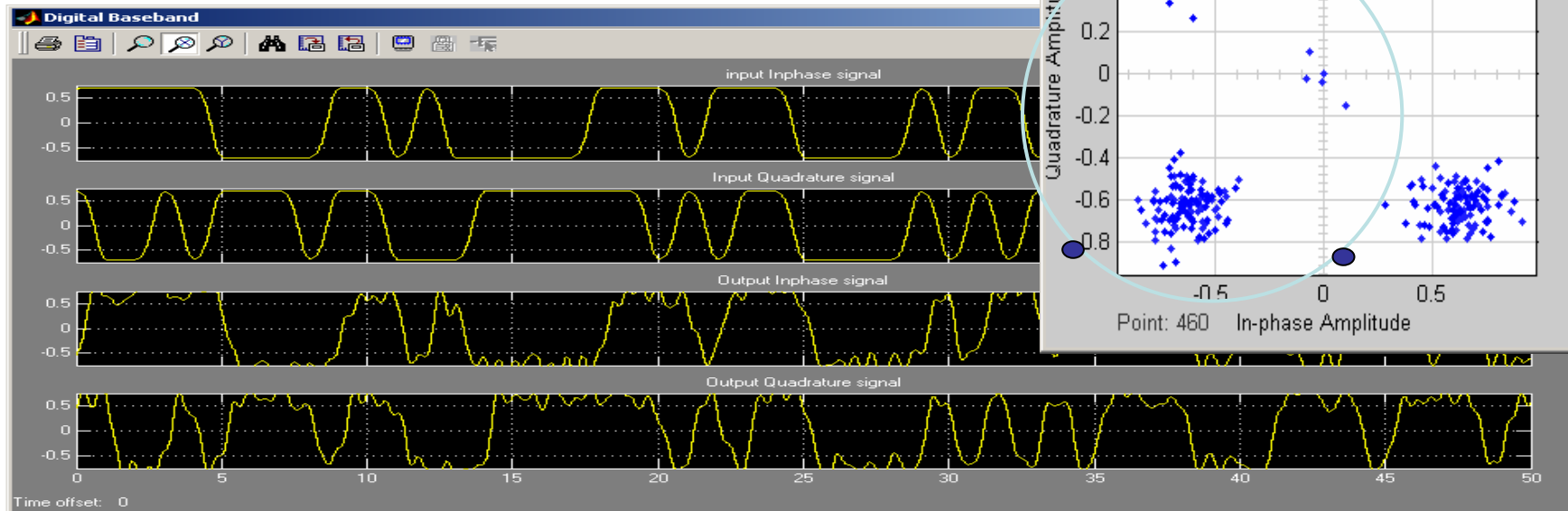
- spectre d'un symbole

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

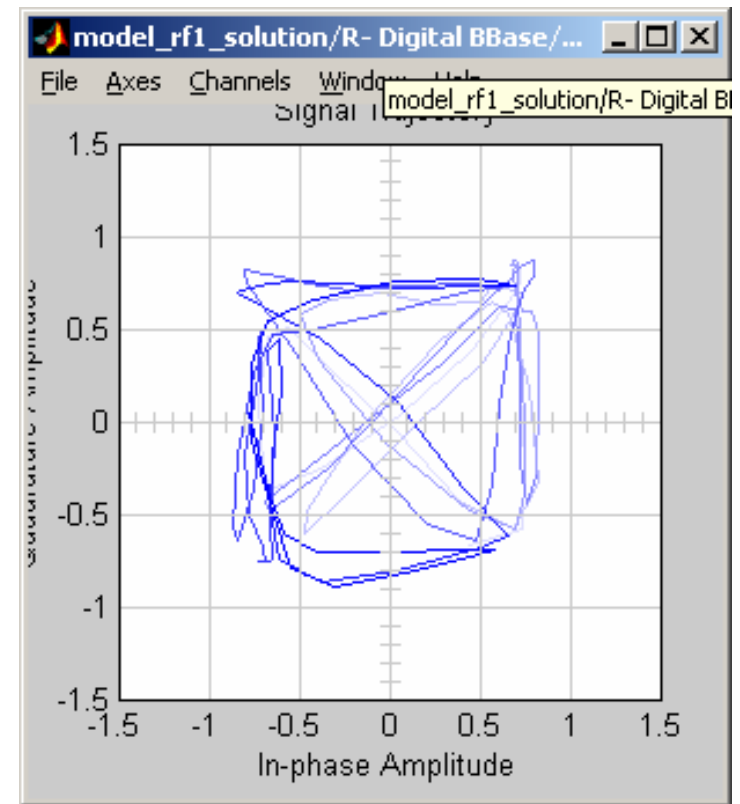
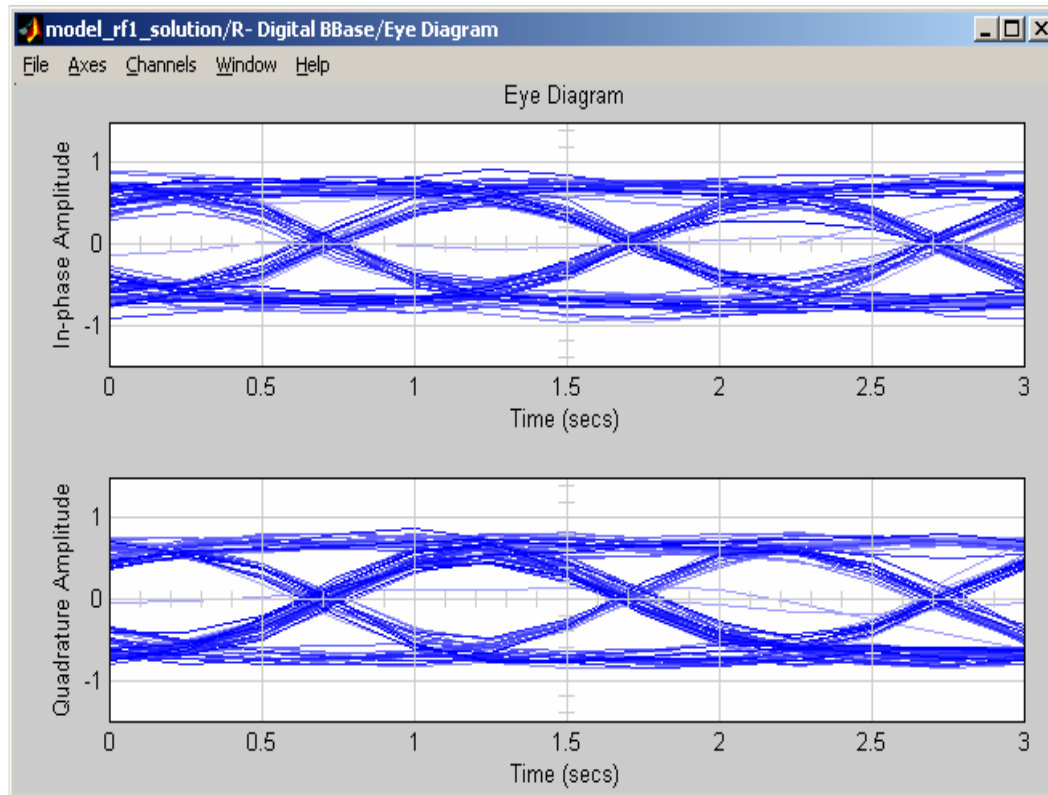


## C) Constellations

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

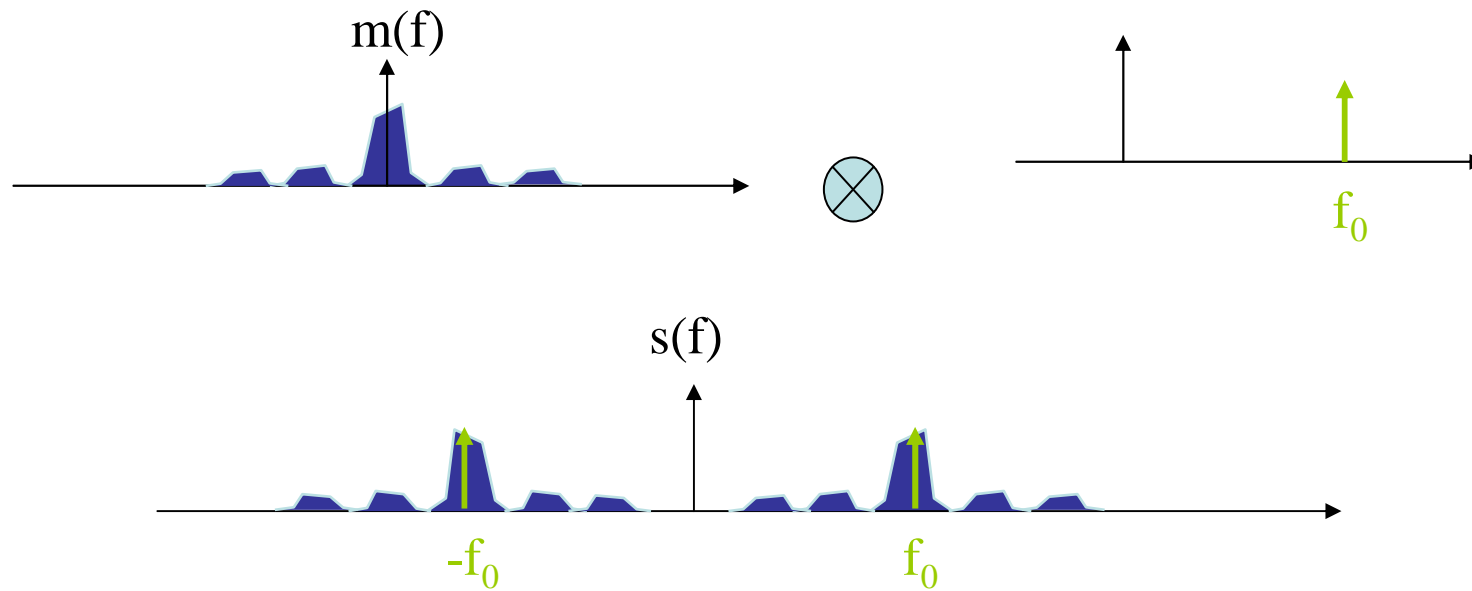


## D) Autres représentations



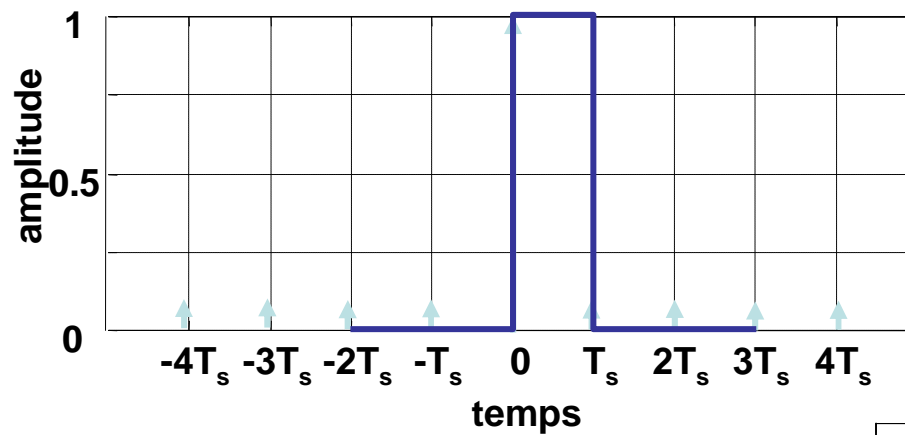


## E) Spectre après modulation



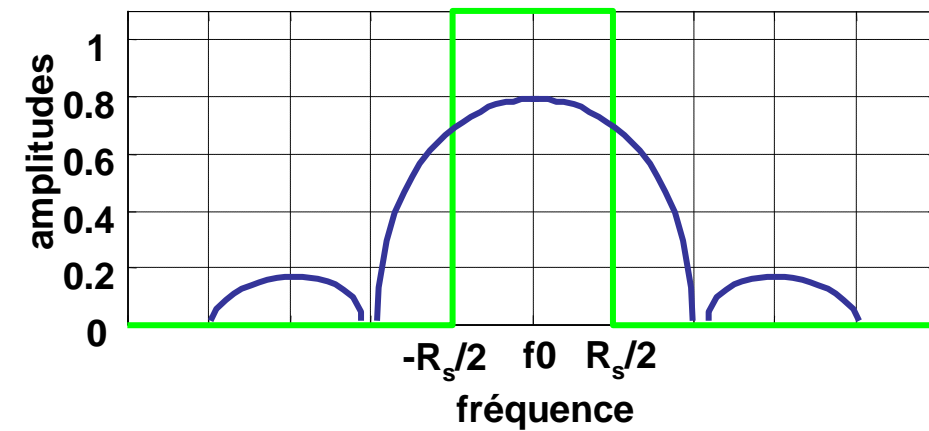


## F) Réduire l'occupation spectrale

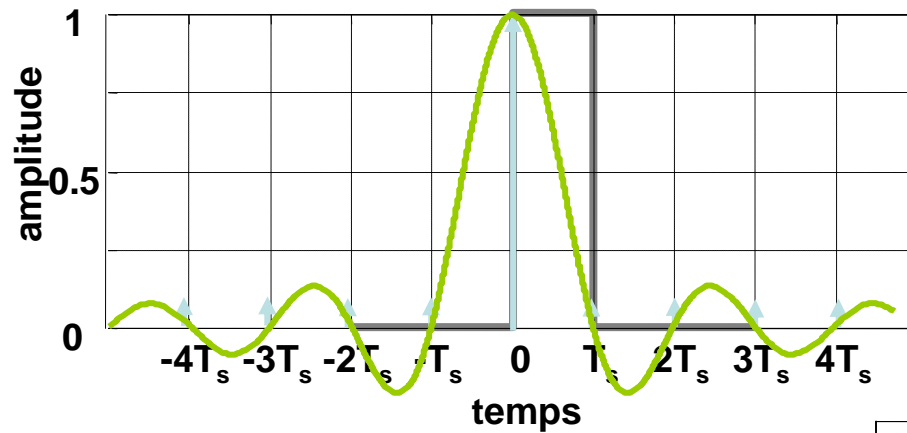


Durée symbole :  $T_s$

Largeur spectrale : infinie

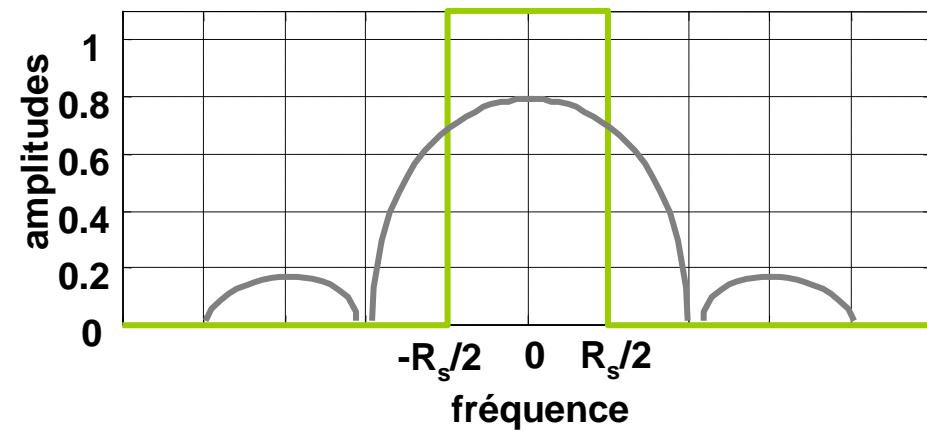


## F) Réduire l'occupation spectrale



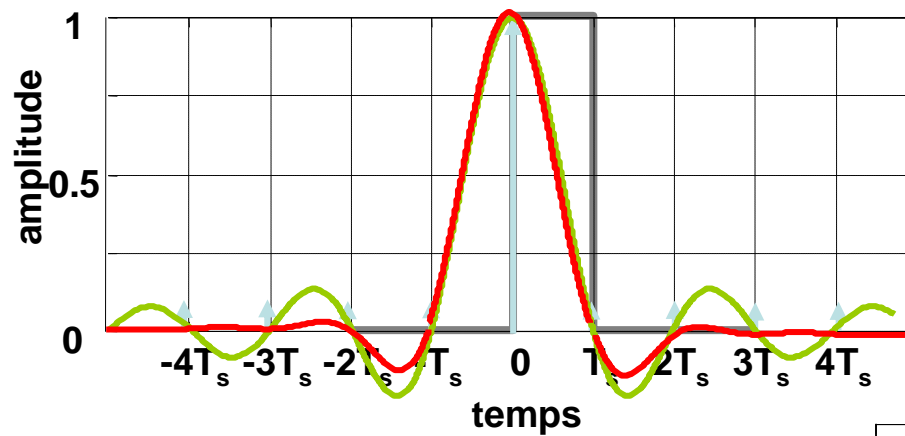
Durée symbole :  
infinie

Largeur spectrale :  $R_s$ .



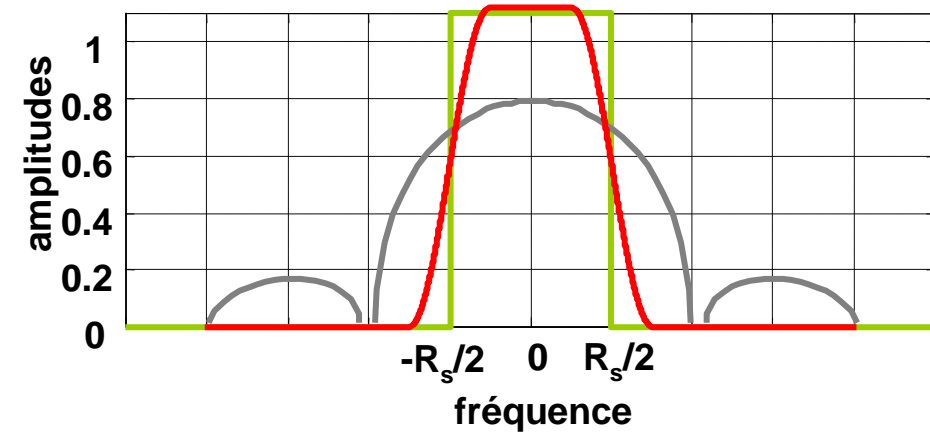


## F) Réduire l'occupation spectrale



Durée symbole :  
infinie

Largeur spectrale :  $1,6R_s$ .



# 5 – Capacité



## – A) 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.

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



### – 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*



### – C) Valeur expérimentale

- La capacité de Canal pour un système donné :
  - le débit symbole max :  $R_s \sim 1,6.W$  (dépend de la qualité de la modulation, et des contraintes imposées en terme de largeur spectrale : bande à -3dB, -10dB, etc...)
  - le nombre de bits par symbole dépend du taux d'erreur acceptable :  $N_b=f(SNR)$  (cf. courbes précédentes)
  - La capacité est donnée par le produit des 2.



## – D) Le bruit AWGN

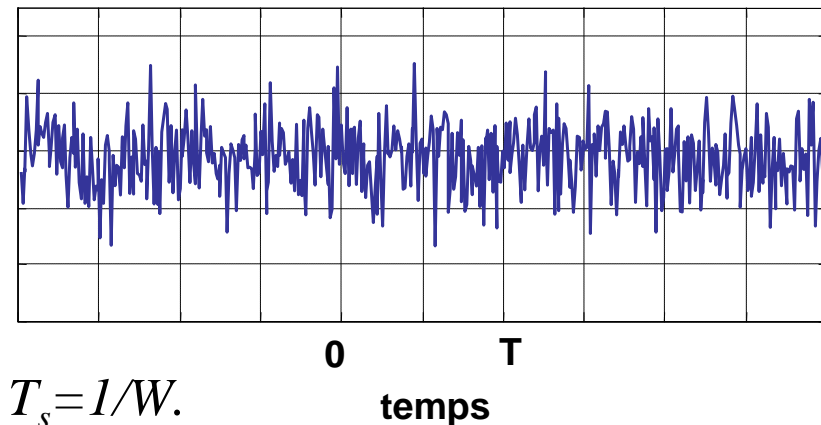
- bruit de réception des systèmes électroniques

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

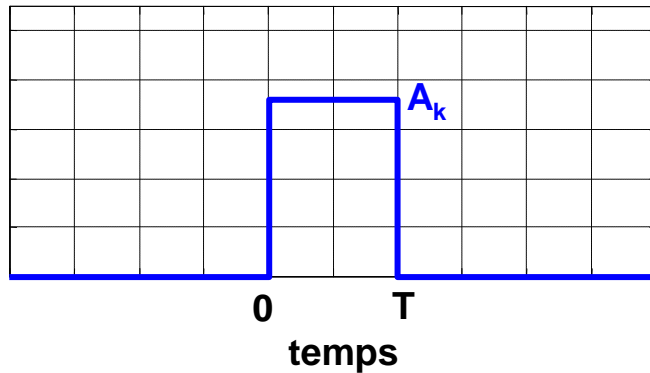
$T_k = 290$  K (en réf. ,  $T^\circ$  en Kelvin)



*Remarque : si modulation idéale :  $T_s = 1/W$ .*

*alors,  $E_N = N_0$ .*

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



Puissance d'un symbole émis :

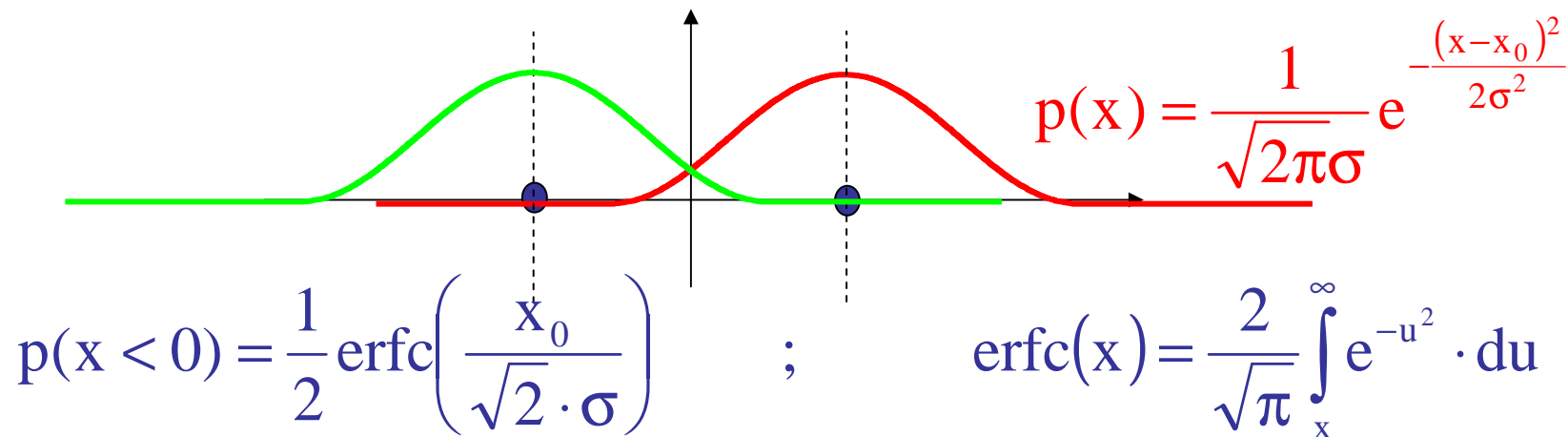
$$S_k = A_k^2 / 2$$

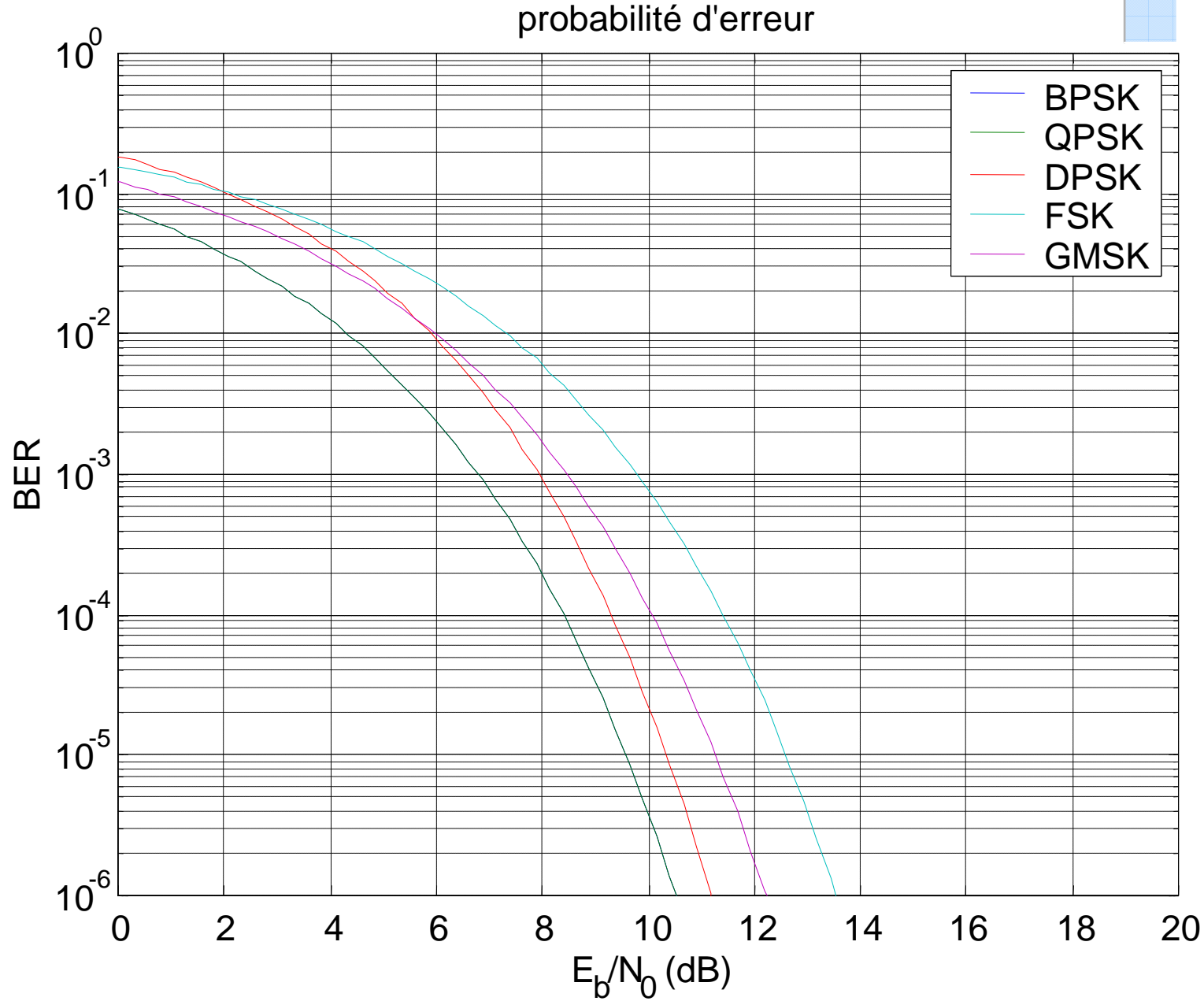
Energie 'bit' reçue :

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

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

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



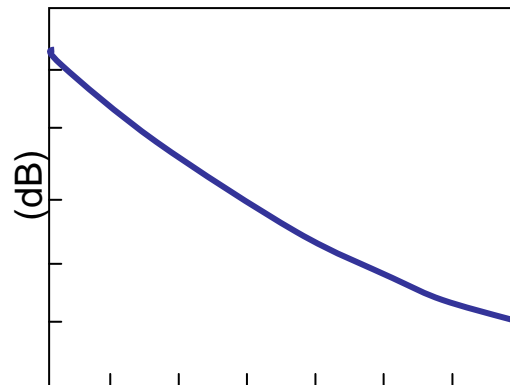


# 6 – canal radio

- Phénomènes liés à l'environnement :

## Path loss

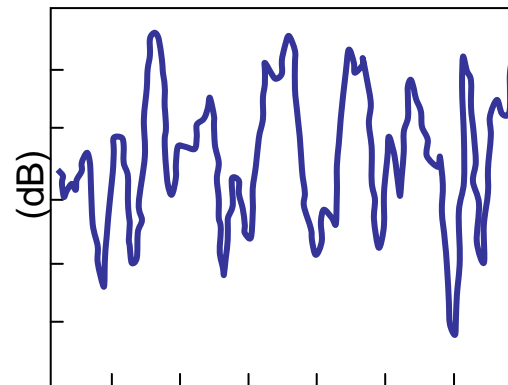
Affaiblissement proportionnel à la distance de propagation



Distance émetteur-récepteur

## Shadowing

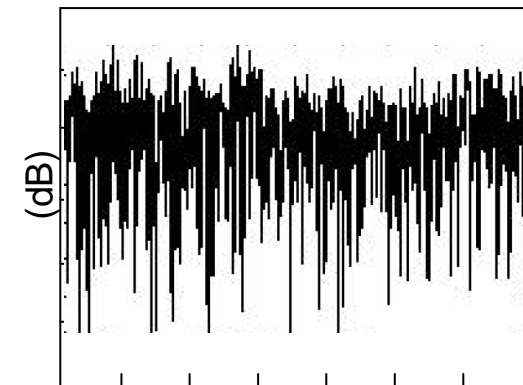
Variation lente du signal due aux obstacles



Distance émetteur-récepteur

## Fading

Fluctuations rapides du signal liées aux multi trajets

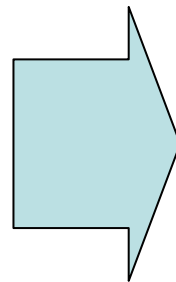


Distance émetteur-récepteur

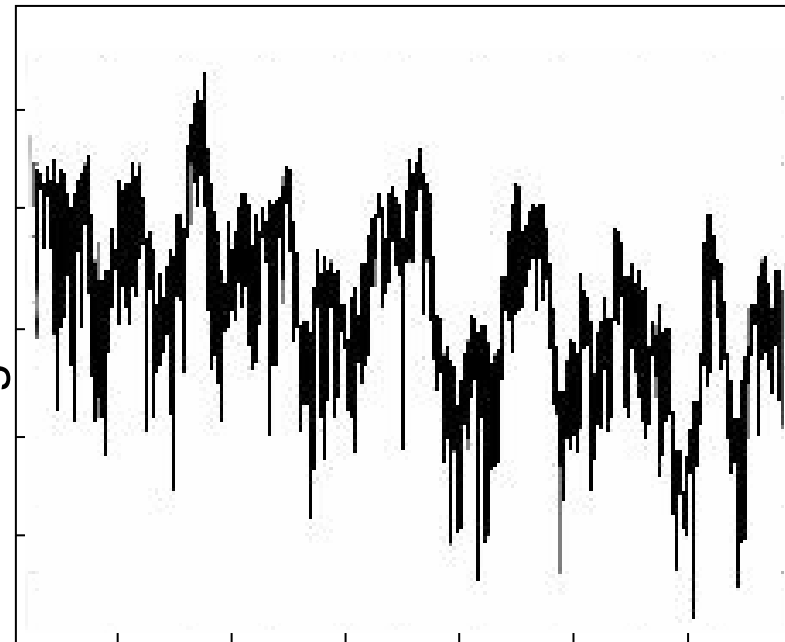


- En environnement réel, les 3 phénomènes se superposent

Path loss  
+  
Shadowing  
+  
Fading

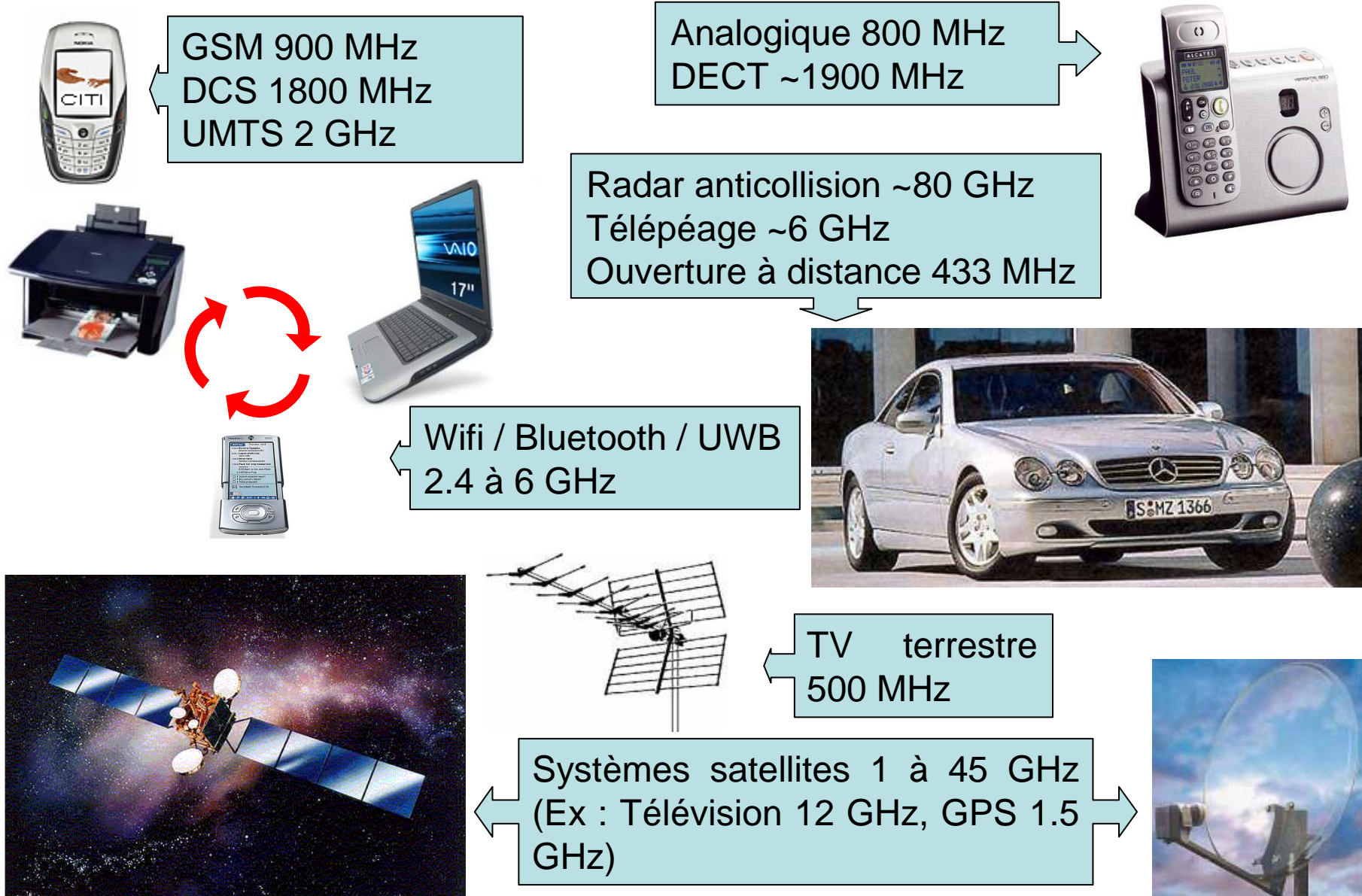


Puissance du  
signal total



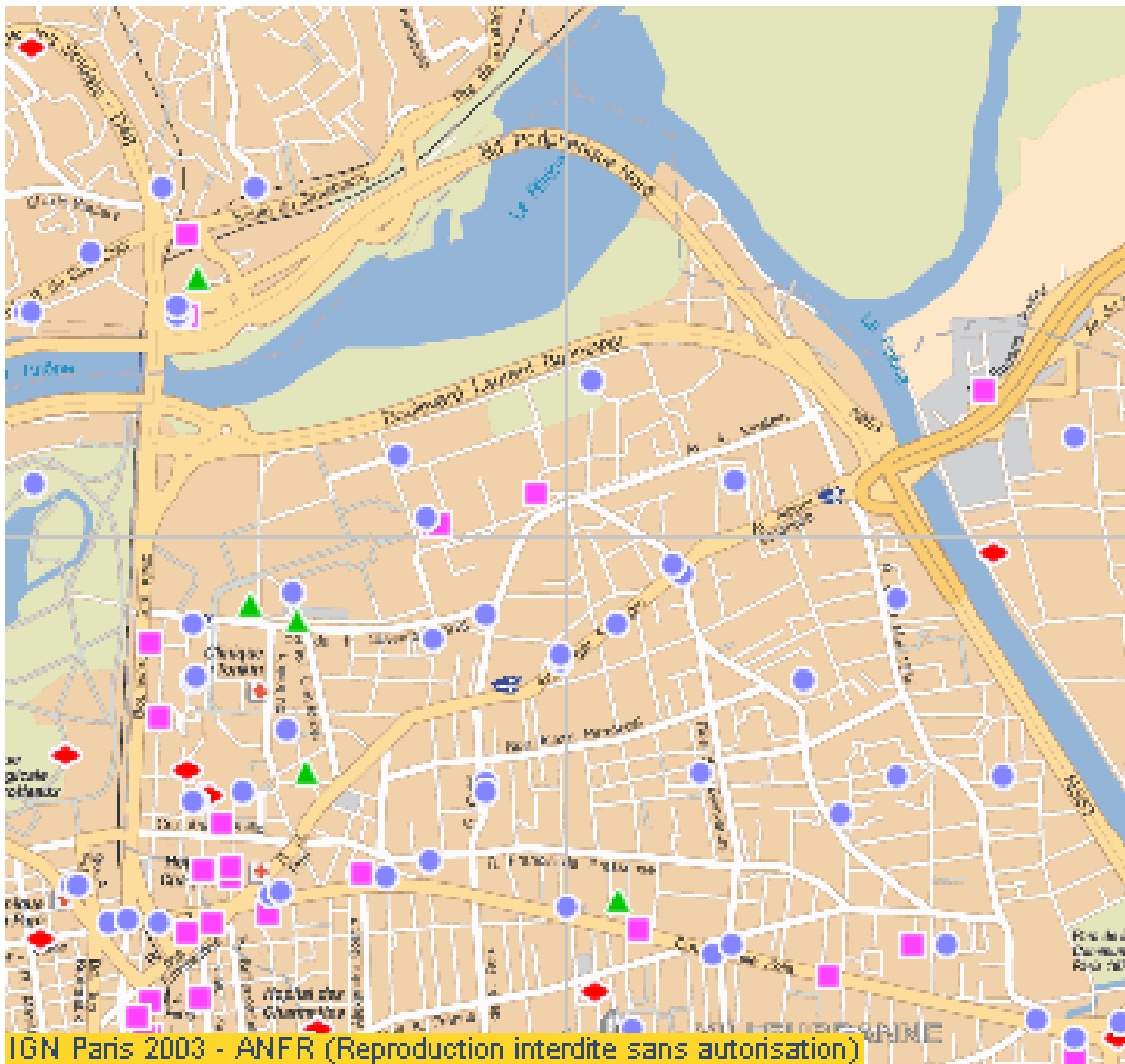
Distance émetteur-  
récepteur

# 7 – les systèmes



# Introduction

## Systèmes



● Radiotéléphonie

▲ Radiodiffusion

■ Autres stations

◆ Mesures de champs

© ANRF :  
<http://www.cartoradio.fr>

CITI - Dept Télécoms - INSA Lyon



- La diffusion
- La liaison point à point
- L'accès fixe
- Les radio-mobiles
- Les réseaux cellulaires



- Diffusion d'information sur 1 zone géographique.
- Caractéristiques
  - 1 liaison simplex (sens descendant)
  - 1 émetteur fixe omnidirectionnel
  - des récepteurs directionnels
- Applications
  - TV, radiophonie, signalisation...



Photo : Xavier LANSADÉ - 2-2003



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

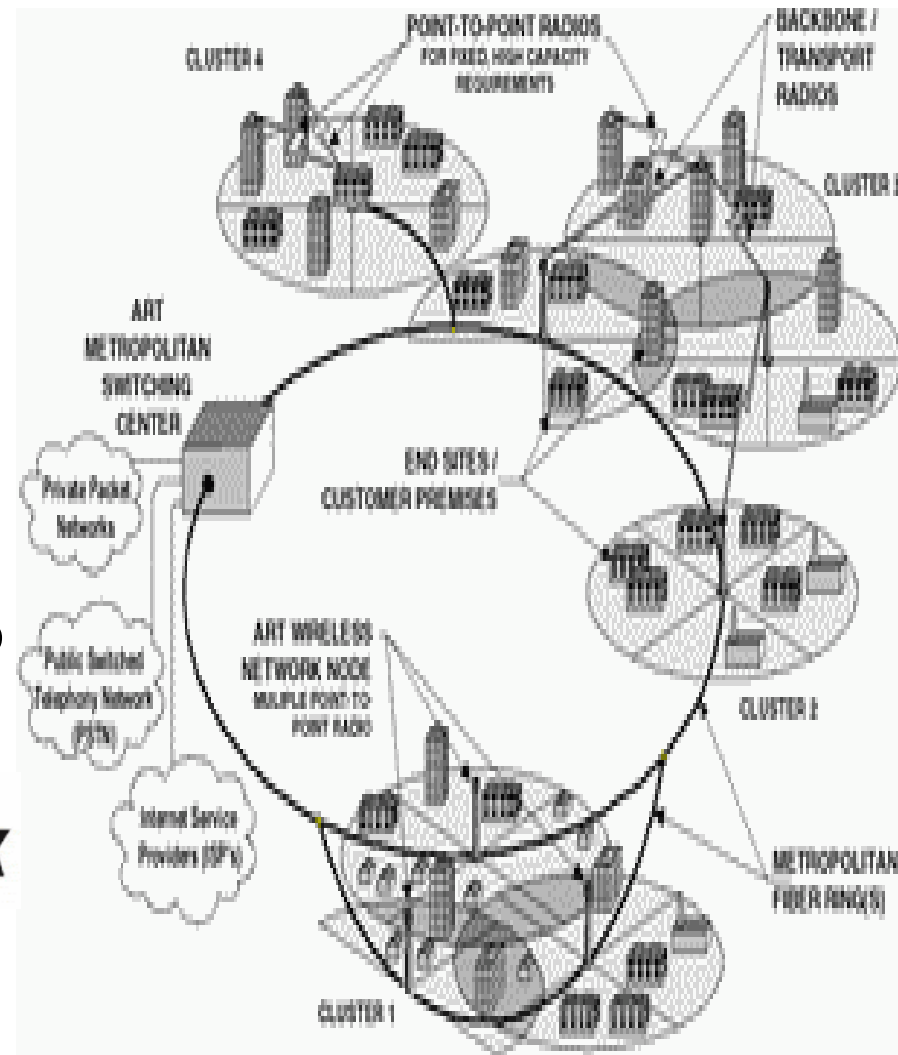


<http://www.sfe-france.com>



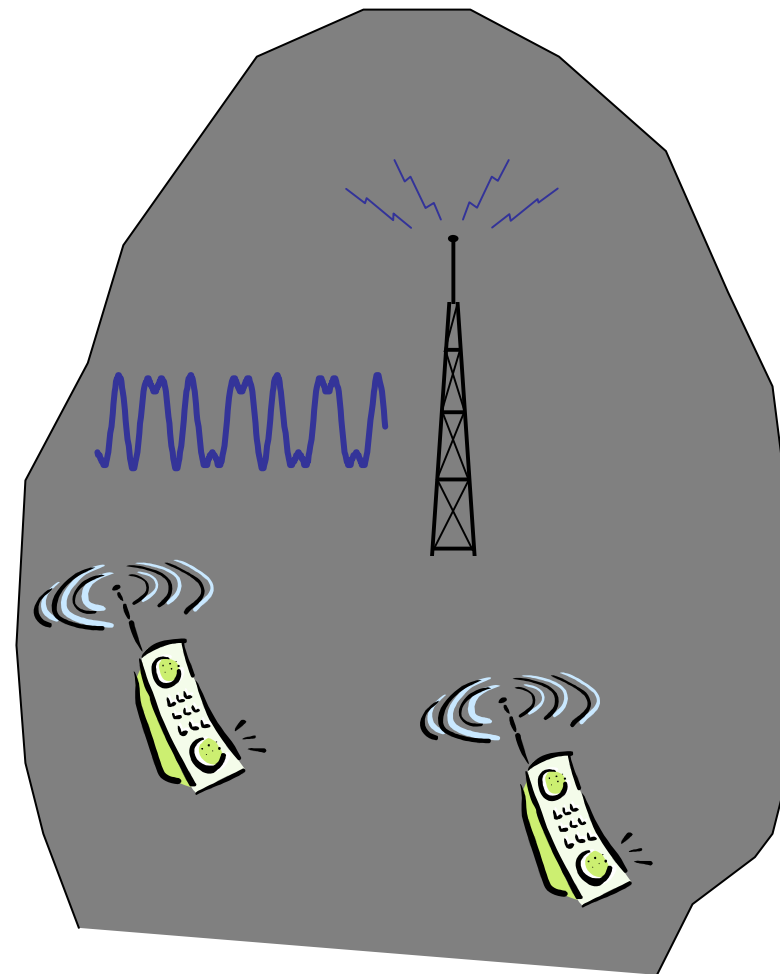
<http://panneauxcols.free.fr/Relais/relais.htm>

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





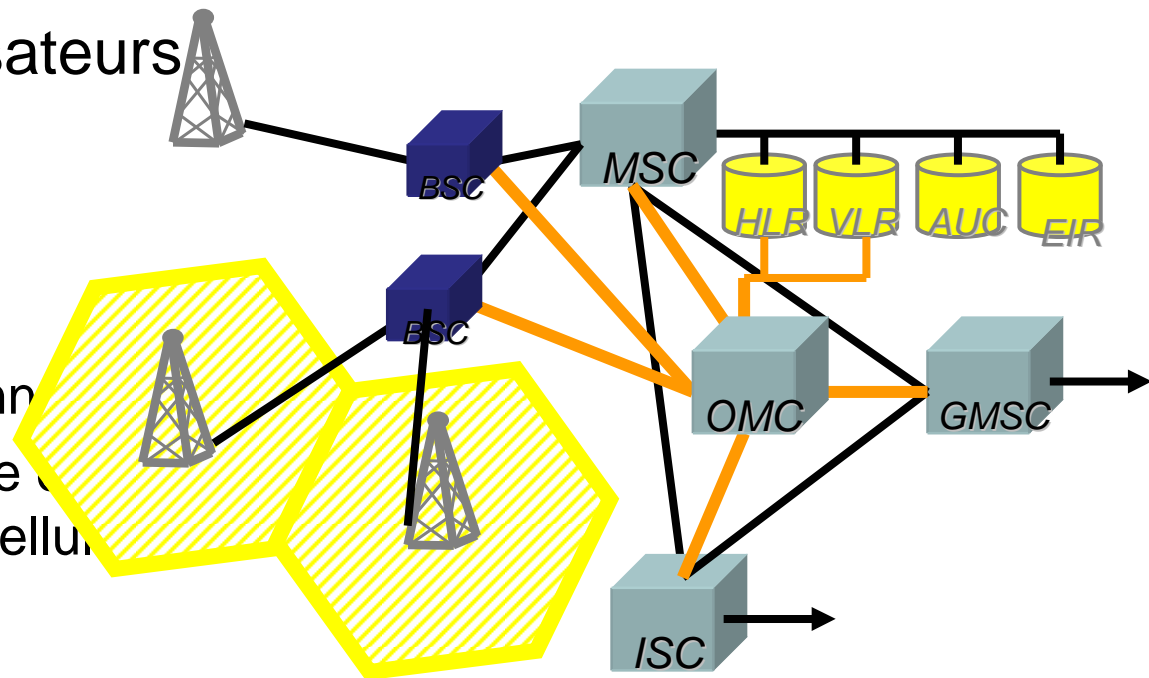
- Radio-mobiles:  
transmission entre 1 point  
d'accès fixe et 1  
utilisateur mobile
- Caractéristiques :
  - 1 liaison duplex
  - 2 E/R omnidirectionnel
- Applications
  - radio-taxis, médecins ...



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

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

- Applications
  - la téléphonie mobile, les réseaux radio

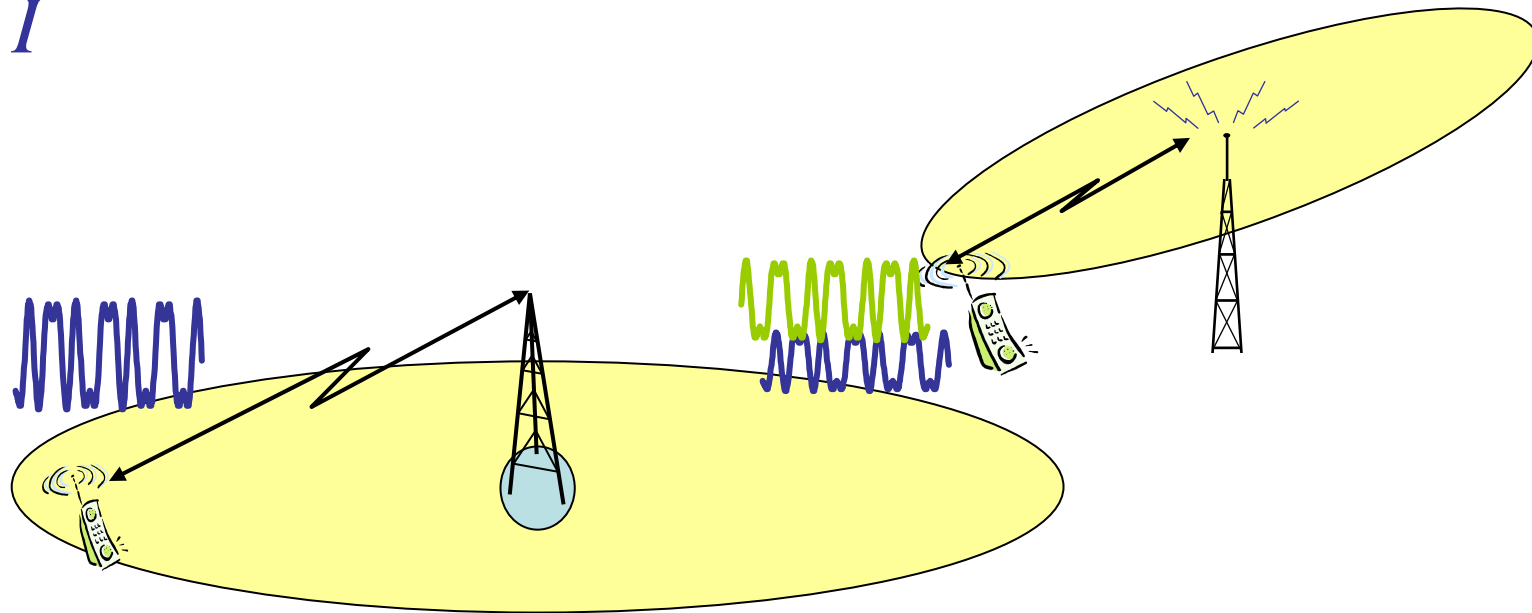


# 8 – Interférences

## A) Interférences co-canales (*spatial*)

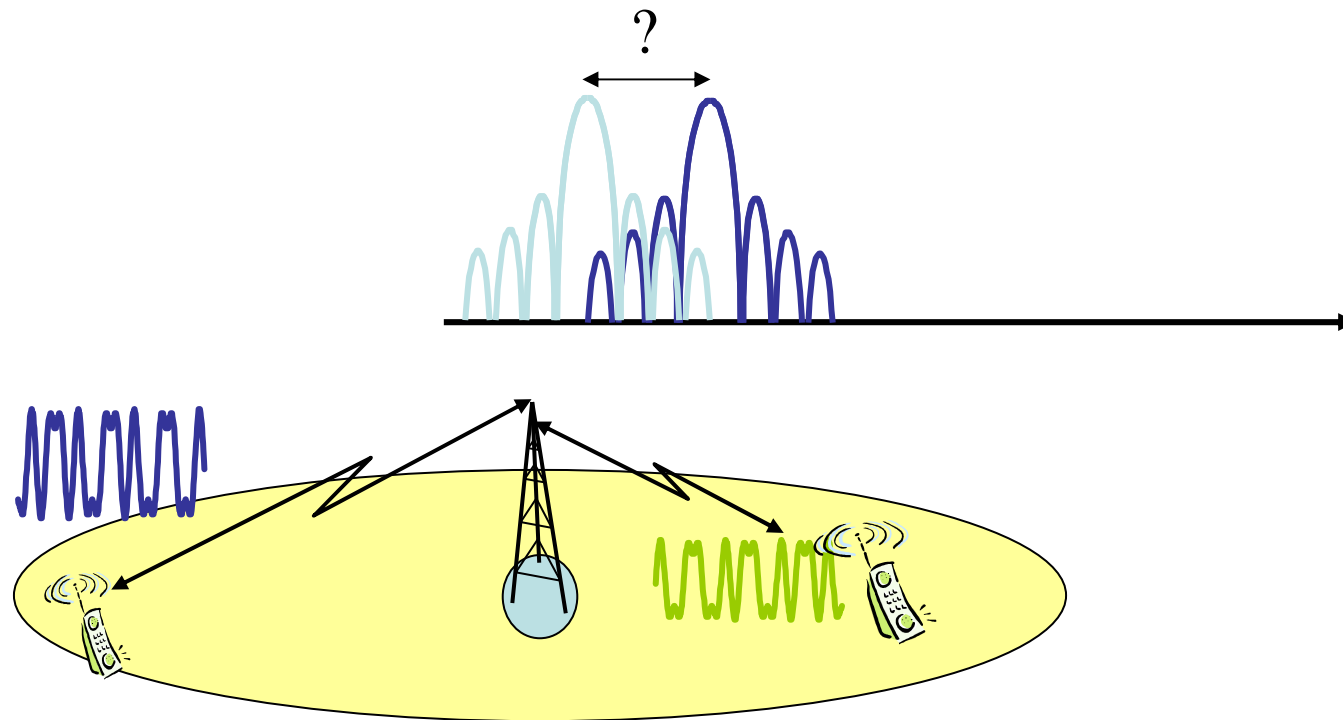
$$\frac{C}{I} \geq SIR + 3dB$$

Icc :



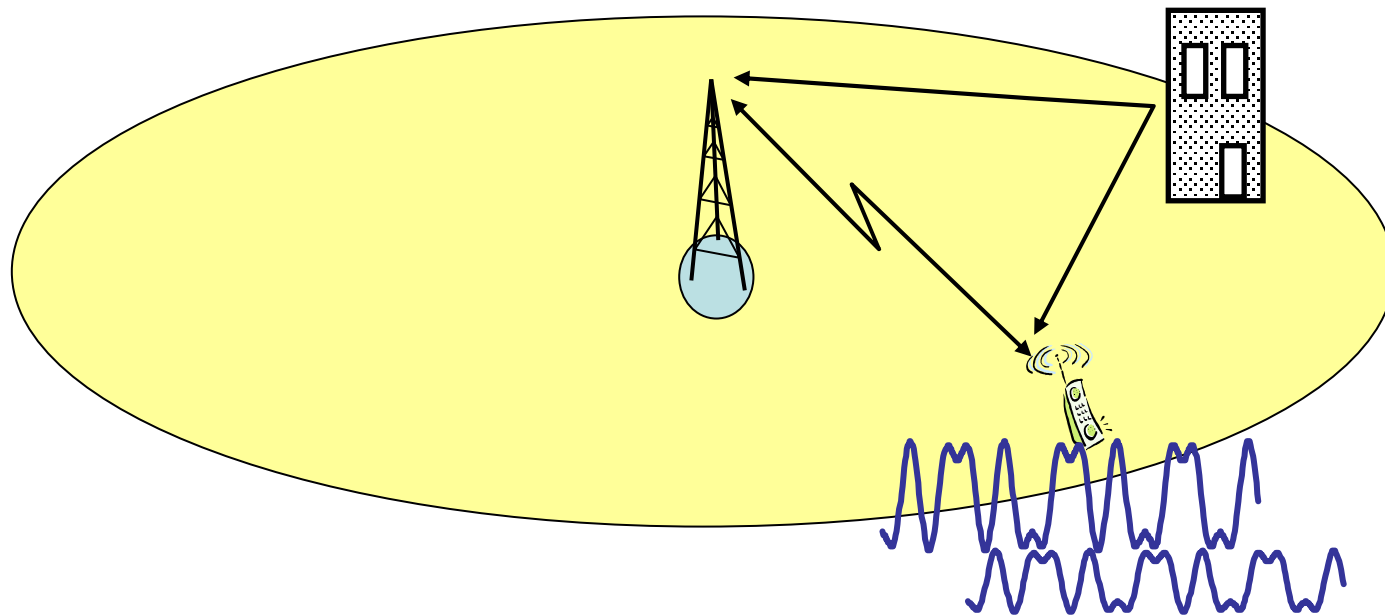
## B) Interférences canaux adjacents (*fréquentiel*)

Ica :



## C) Interférences inter-symboles (*temporel*)

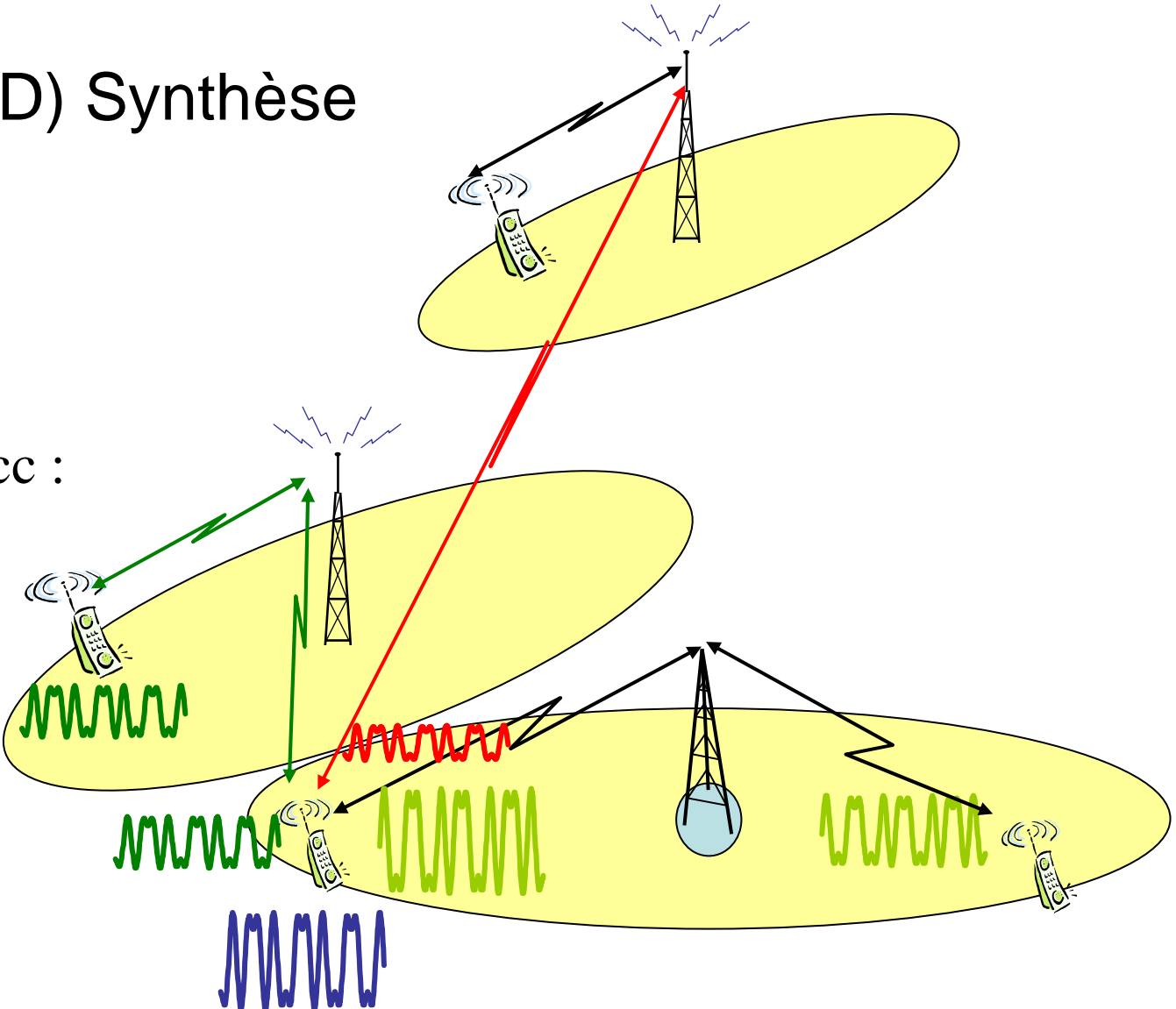
Iis :





# D) Synthèse

Icc :

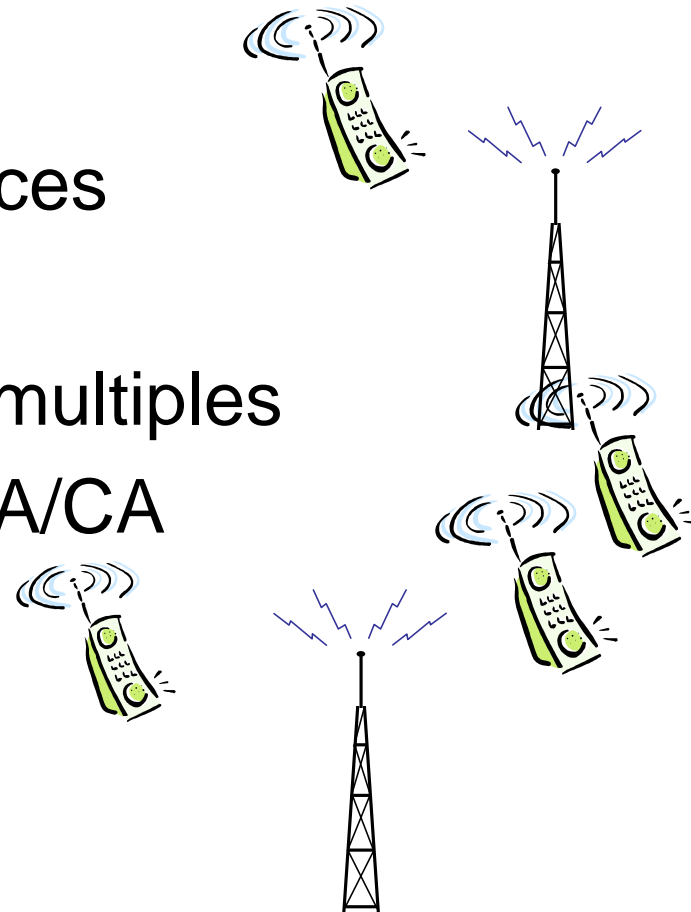


# 9 – Partage des ressources



## « *resource sharing* »

- A) Attribution de ressources
- B) Duplexage
- C) Techniques d'accès multiples
- D) Cas particulier : CSMA/CA





### A) Attribution de ressources globales

- La bande de fréquence est choisie en fonction :
  - de la portée voulue, de la capacité souhaitée...
- Partage entre sous-réseaux

<p>Approche centralisée réserver des ressources spécifiques à différents opérateurs</p>	<p>Approche partagée Interférences non contrôlables, QoS non garantie</p>
---	---

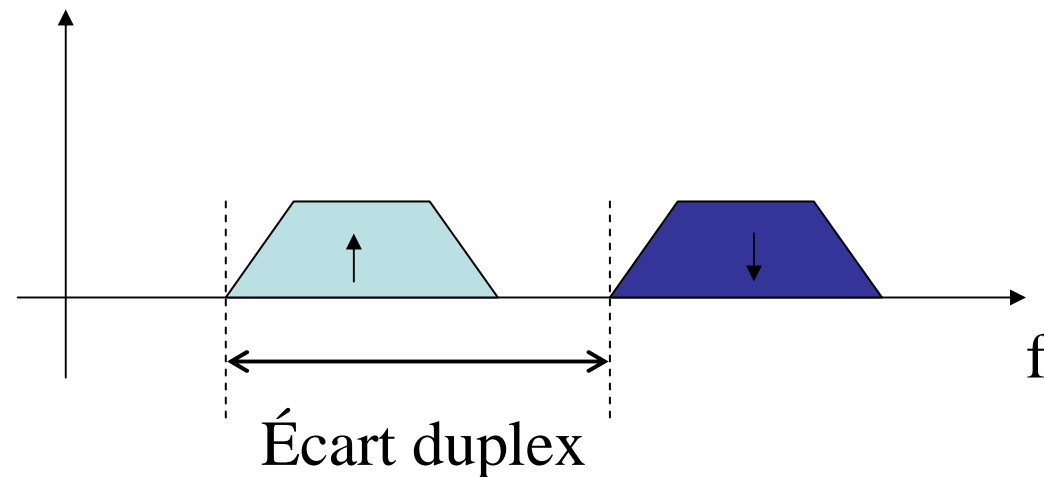
- exemples
  - GSM : 880-915/925-960 MHz
  - DCS1800 : 1710-1785/1805-1880 MHz
  - DECT : 1880-1900MHz
  - WiFi: ISM ~2,4GHz



## B) Duplexage (voix montantes/descendantes)

- duplexage en fréquence (FDD

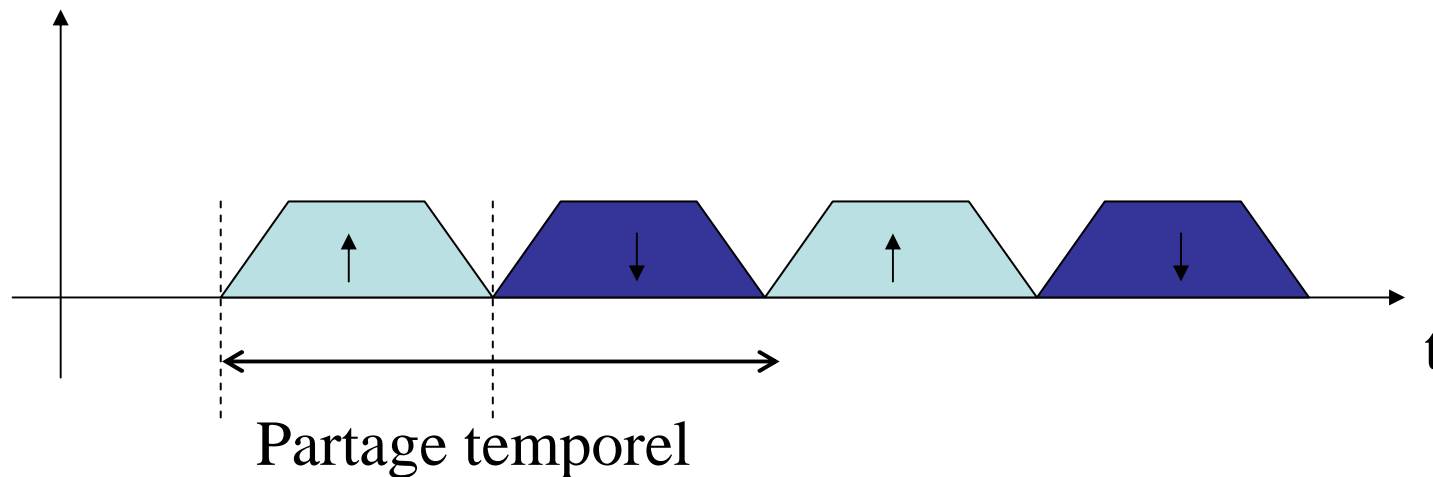
*: frequency division duplexing)*



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



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



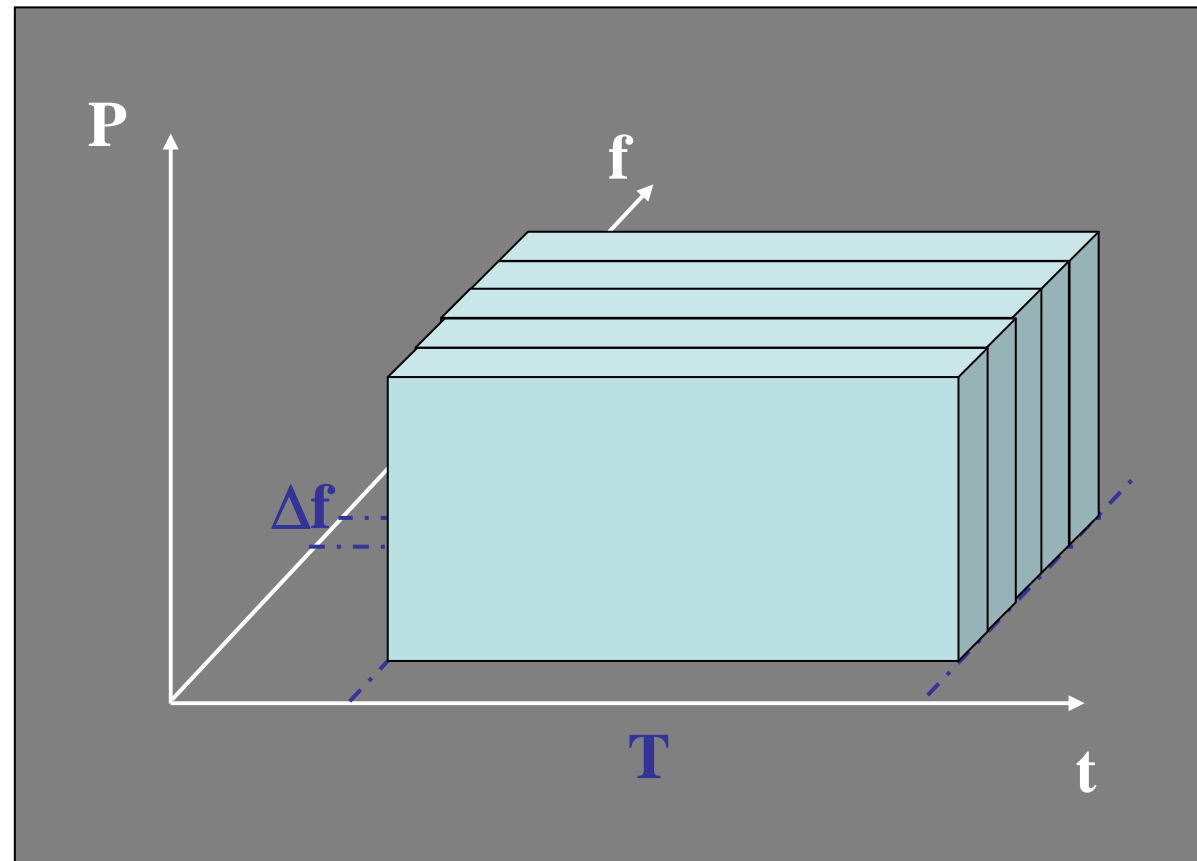
Intérêt : un seul canal fréquentiel à gérer  
rem : attention aux interférences entre lien montant et lien descendant



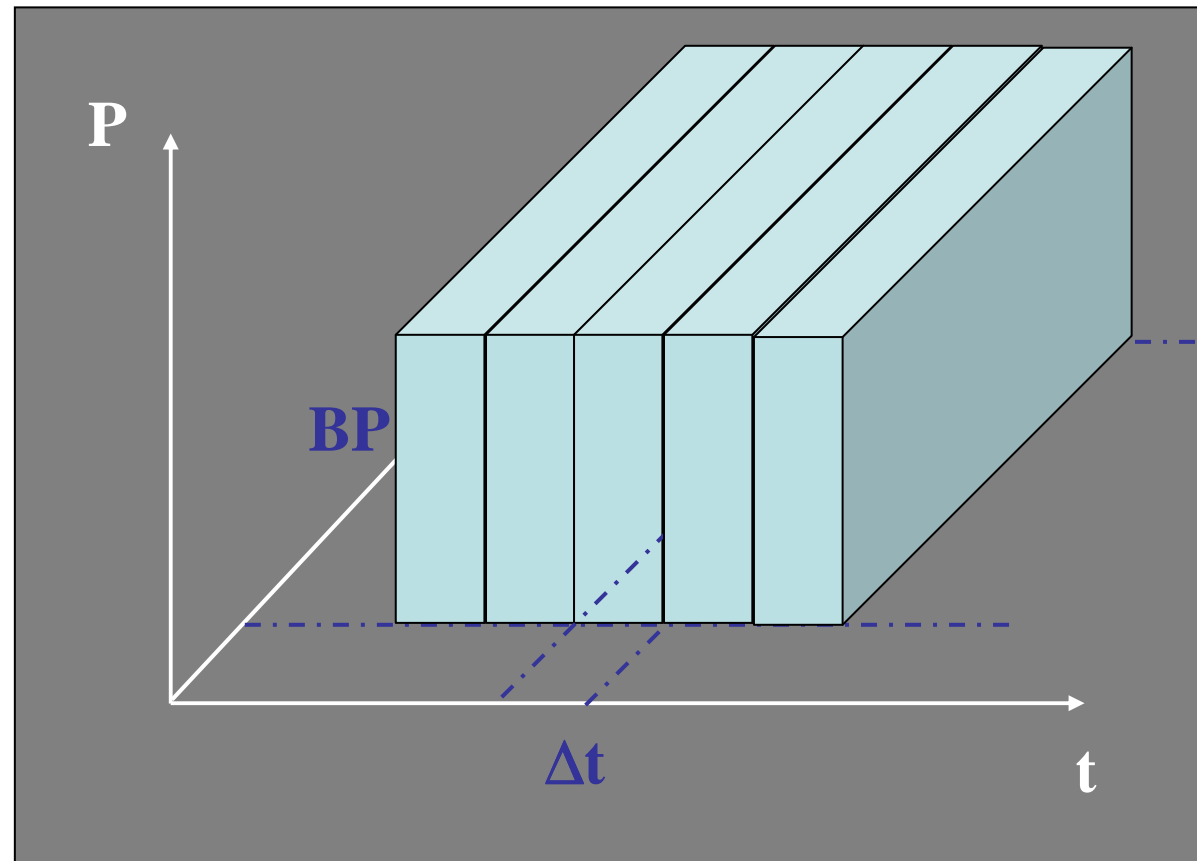
### C) Méthodes d'accès multiples

- 1 bande globale :  $W$  ;  $C = R_s \times N_b$  ;  $N_b = f(\text{SNR})$ 
  - théorique  $C = 2 \times W$  (2 porteuses, 1 bit/porteuse)
  - pratique :  $W = 1,6 R_s$  ;  $C = 2 / 1,6 \times W = 1,25 \times W$ .
    - »  $\text{BER} \sim 10^{-4} \Rightarrow E_b/N_0 = 8\text{dB}$  ;  $\text{SNR} = 9\text{dB}$ .
- On veut partager ce débit global :
  - choix parmi : FDMA, TDMA, FTDMA (GSM) ou CDMA (IS-95, UMTS).
- Critères :
  - Maximiser l'utilisation des ressources (bits/s/hertz)
  - Gérer le niveau d'interférences

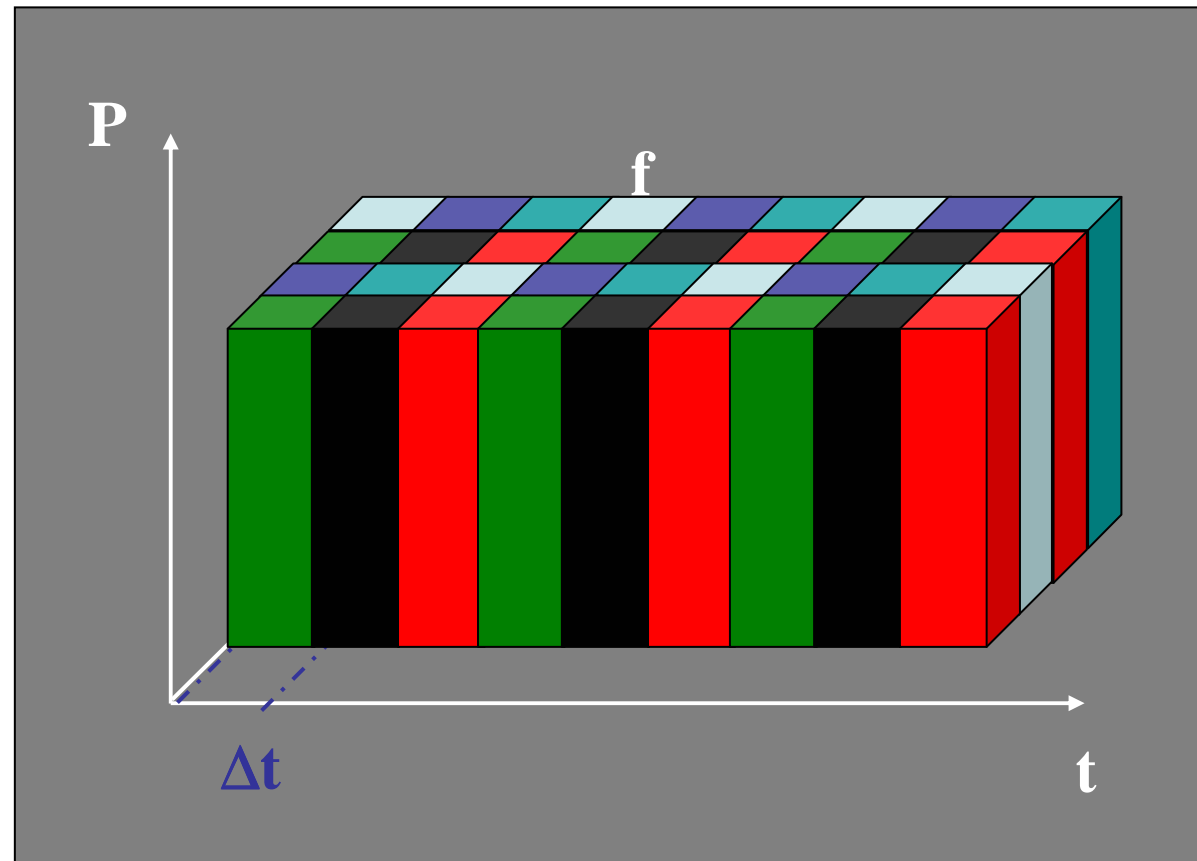
– FDMA (AMRF)



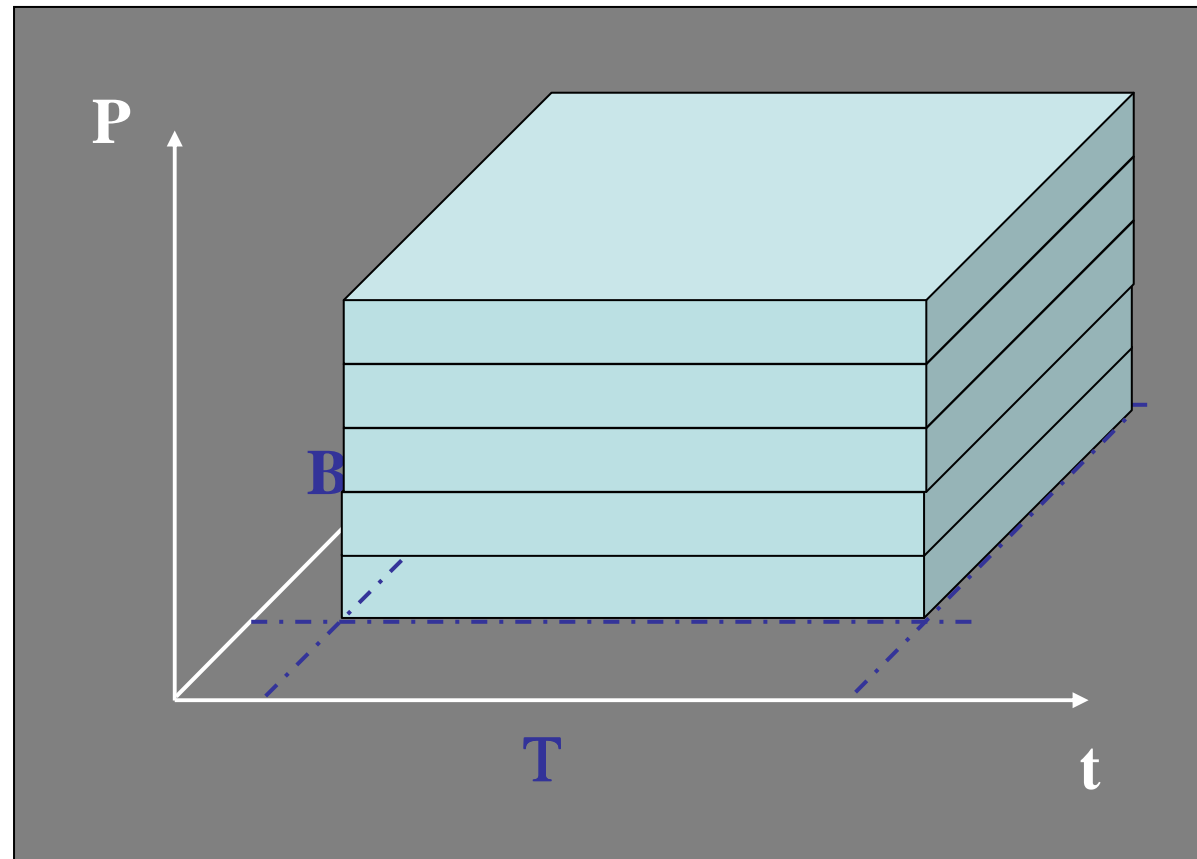
# - TDMA (AMRT)



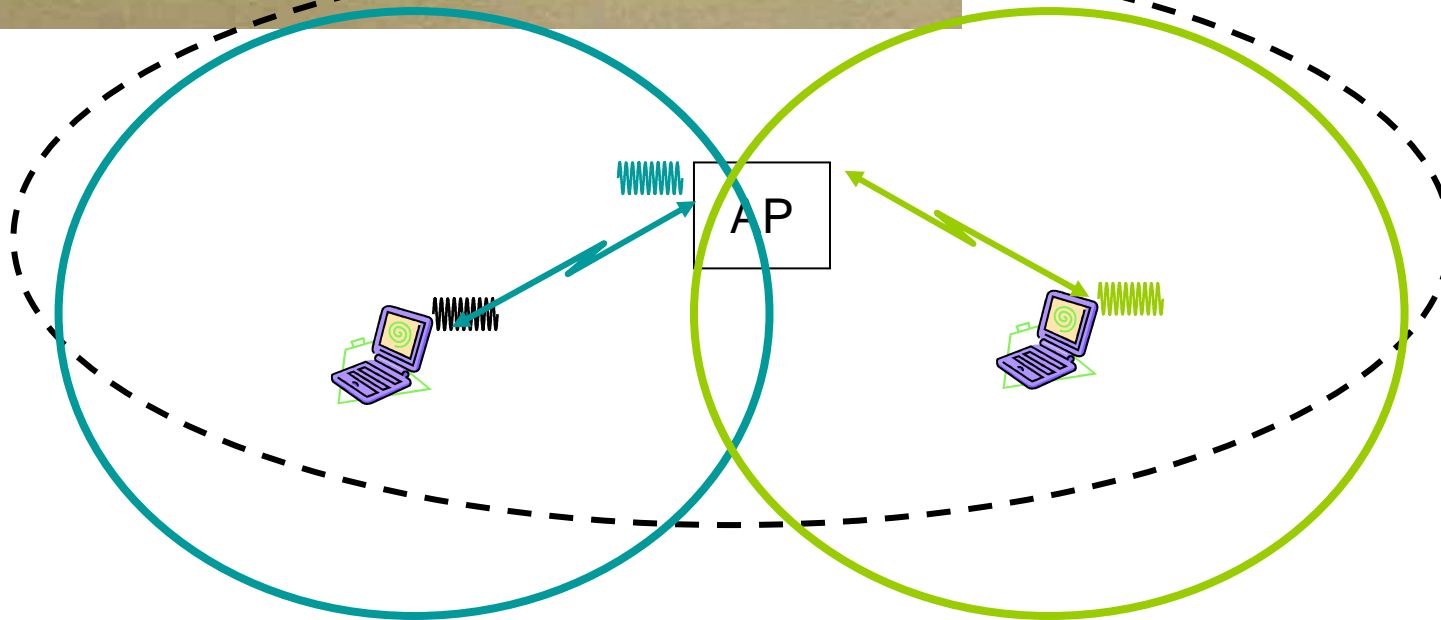
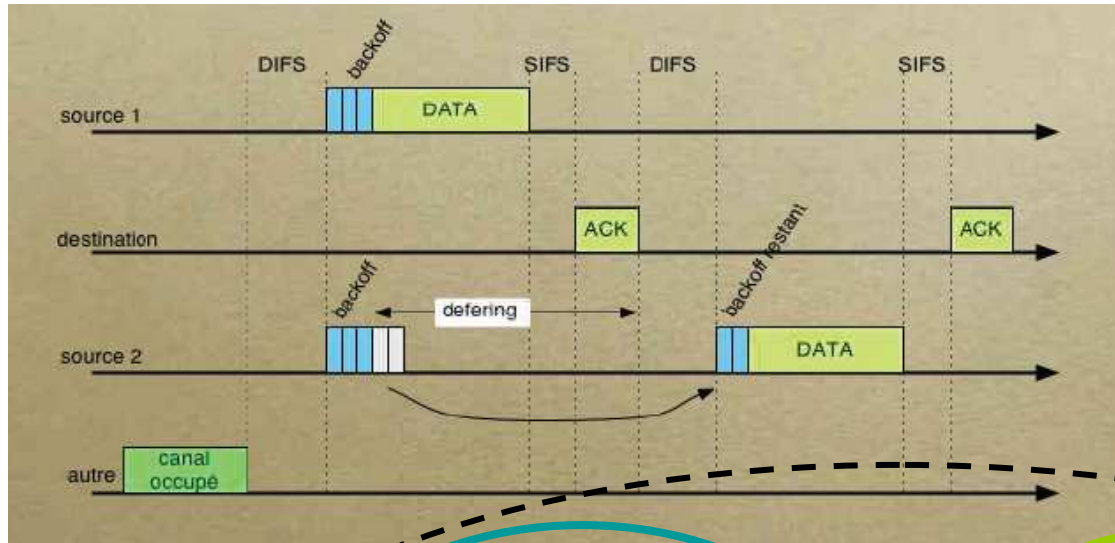
# - F-TDMA



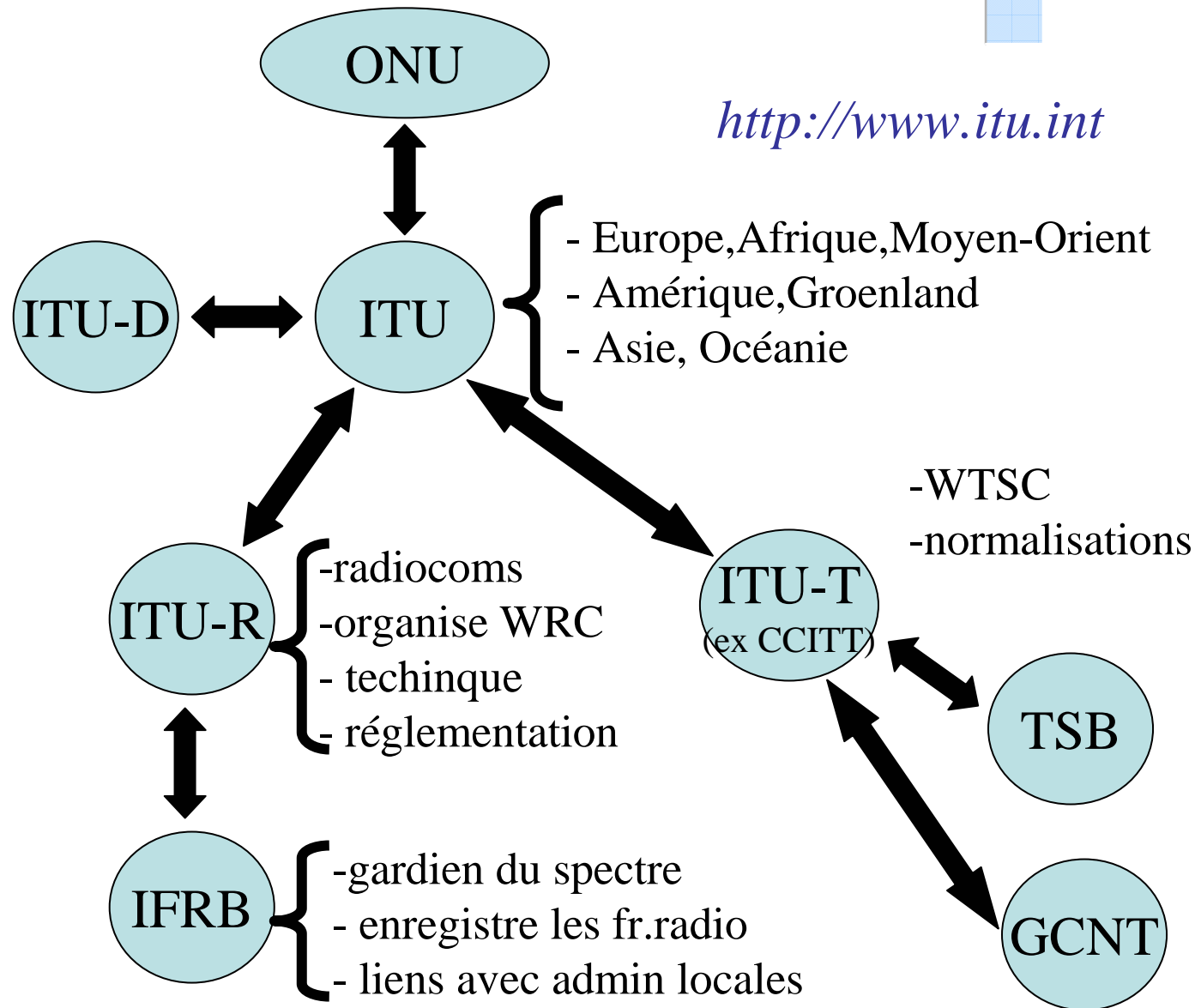
– CDMA (AMRC)



# D) Cas particulier : CSMA/CA



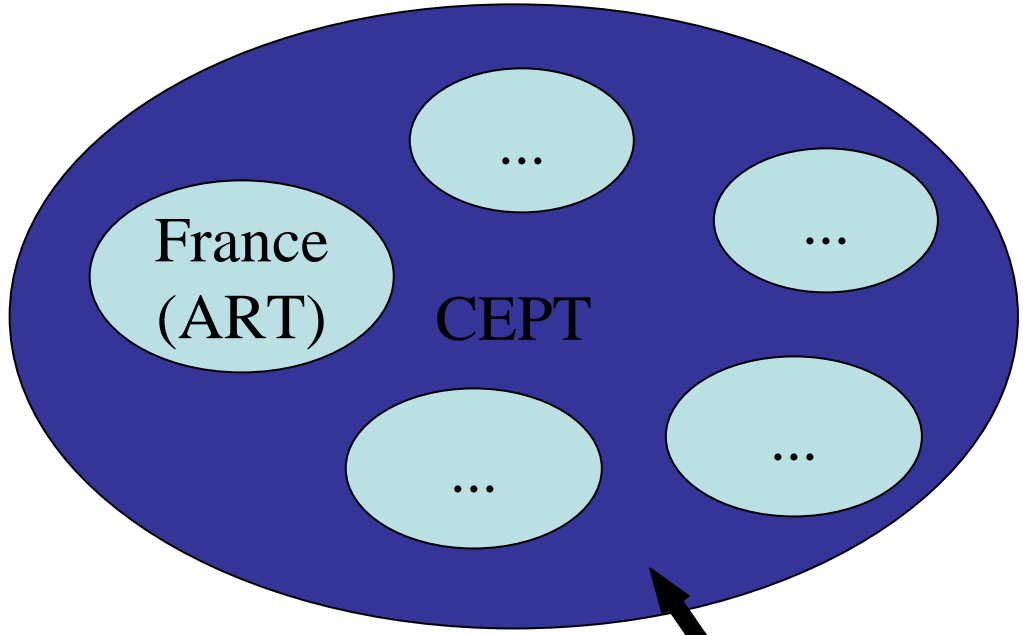
# 10 – Normalisation





# Introduction

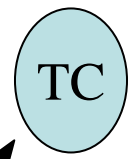
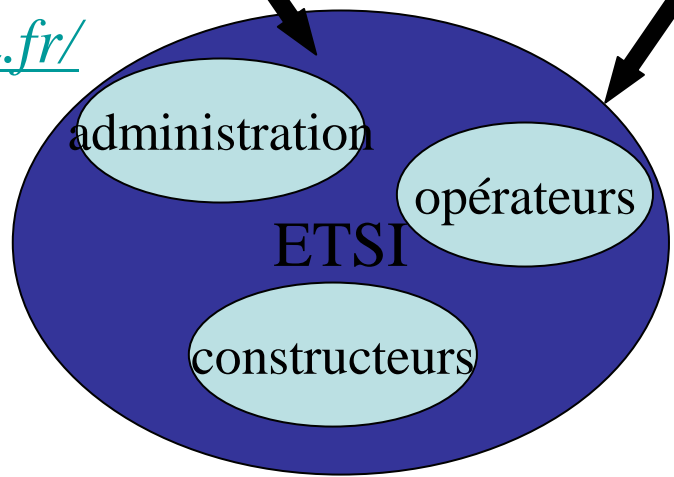
<http://www.etsi.org>



- Rapports
- Recommandations
- Décisions

<http://www.art-telecom.fr/>

<http://www.anfr.fr>



- standards (ETS)
- rapports (ETR)

CITI - Dept Télécoms - INSA Lyon



## Résumé de l'introduction (à savoir 😊 )

- Les bandes de fréquences ( $f$ ,  $\lambda$ )
- La modélisation en blocs (pour se repérer dans le cours)
- Les grands principes/théorèmes de propagation
- Modulation/capacité : qu'est-ce qui limite les systèmes?
- Les familles de systèmes radio
- Les types d'interférences
- Les méthodes de partage de ressources
- Qui régule l'utilisation des fréquences