

Radiocommunications

Spectre radioélectrique et propagation des ondes

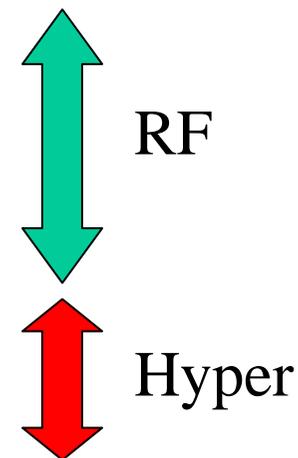
Joël Redoutey

Radiocommunications

- **Le spectre radioélectrique et ses applications**
- **Spécificités des systèmes RF et hyper**
- **Propagation des ondes en espace libre**
- **Propagation dans l'environnement terrestre**
- **Modulations analogiques**

Le spectre radioélectrique

| Fréquences | λ [m] | Dénomination |
|------------------|-----------------------|--------------|
| < 3 [kHz] | > 100 [km] | ELF |
| 3 – 30 [kHz] | 10 – 100 [km] | VLF |
| 30 – 300 [kHz] | 1 – 10 [km] | LF |
| 300 – 3000 [kHz] | 100 – 1000 [m] | MF |
| 3 – 30 [MHz] | 10 – 100 [m] | HF |
| 30 – 300 [MHz] | 1 – 10 [m] | VHF |
| 300 – 3000 [MHz] | 10 – 100 [cm] | UHF |
| 3 – 30 [GHz] | 1 – 10 [cm] | SHF |
| 30 – 300 [GHz] | 1 – 10 [mm] | EHF |
| 300 – 3000 [GHz] | 0,1 – 1 [mm] | |
| 3 – 30 [THz] | 10 – 100 [μ m] | |
| 30 – 430 [THz] | 0,7 – 10 [μ m] | |
| 430 – 860 [THz] | 0,35 – 0,7 [μ m] | |



Utilisation du spectre

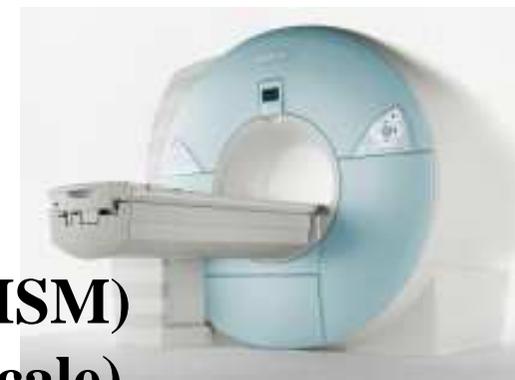
Applications rayonnantes

- Télécom (ex: téléphonie mobile, télévision, radio ...)
- Non télécom (ex: radar, GPS)



Applications non rayonnantes

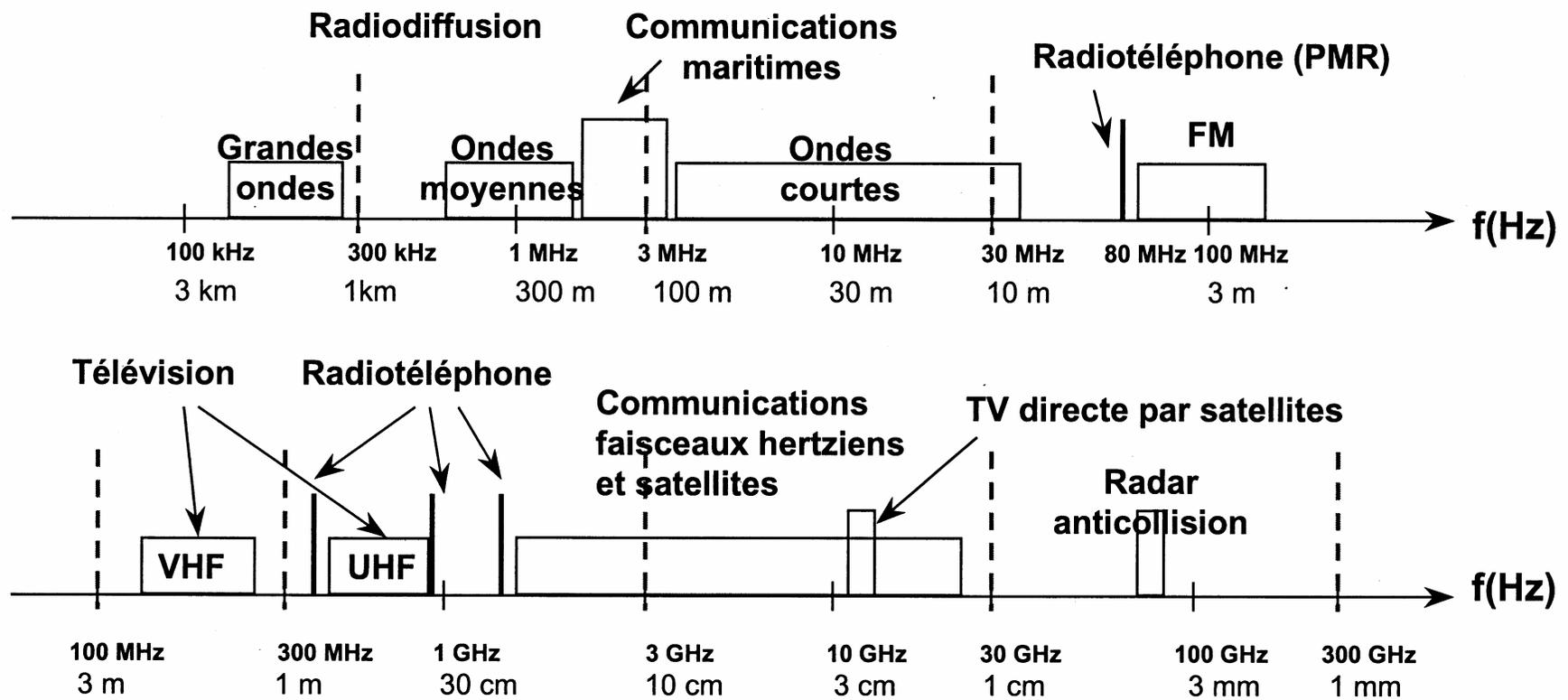
- Industrielles, scientifiques, médicales (ISM)
(ex: four à micro-ondes, imagerie médicale)



Principaux services utilisateurs du spectre radioélectrique

- **Radiodiffusion et télévision**
 - **Radiocommunications fixes et mobiles**
 - **Météorologie (radars, satellites, diffusion des bulletins)**
 - **Radioastronomie**
 - **Applications militaires**
 - **Surveillance aérienne et de l'environnement (Radar)**
 - **Sécurité en mer et dans les airs**
 - **Radiolocalisation (GPS, ...)**
 - **Applications industrielles et médicales**
 - **Applications civiles "sans fil" (Wifi, carte à puce,...)**
- Etc**

Spectre radioélectrique



Gestion internationale du spectre

Les ondes électromagnétiques, dont le spectre utile s'étend de quelques kHz à plusieurs dizaines de GHz, se propagent dans l'espace sans tenir compte des frontières des états.

L'utilisation des fréquences doit donc faire l'objet d'une concertation internationale et doit être strictement réglementée.

L'Union Internationale des Télécommunications (ITU)



est une organisation internationale, basée à Genève, dont le rôle est de coordonner les réseaux et les services de télécommunication entre les gouvernements des états membres et les acteurs économiques du secteur.

Tableau national de répartition des bandes de fréquences

Le *Règlement des radiocommunications* de l'**Union Internationale des Télécommunications** (UIT), élaboré par les conférences mondiales des radiocommunications (CMR), attribue des bandes de fréquences aux différents services de radiocommunication.

En France, les bandes ainsi attribuées sont réparties entre neuf affectataires (sept administrations et deux autorités indépendantes) par la commission de Planification des fréquences de l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR). Cette commission a pour mandat d'établir et de tenir à jour le *Tableau national de répartition des bandes de fréquences* (TNRBF) qui fixe les règles nationales d'utilisation des bandes de fréquences sur l'ensemble du territoire français et mentionne les droits (statuts) des affectataires.

Ce document de référence est public, approuvé par arrêté du Premier Ministre et disponible à l'ANFR (contre participation financière!).

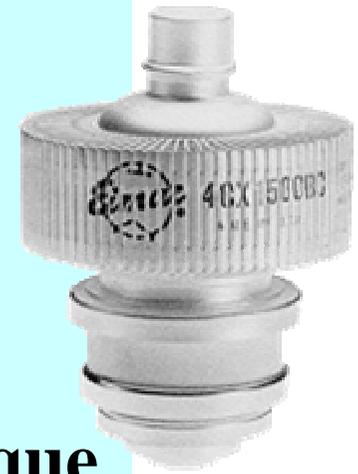
GESTION DU SPECTRE EN FRANCE

La **gestion du spectre** est répartie entre sept ministères et deux autorités attributaires de fréquences (inscrits au **Tableau national de répartition des bandes de fréquences**) :

- L'Administration de l'aviation civile
- L'Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes ARCEP (fréquences des télécommunications)
- Le Conseil Supérieur de l'Audiovisuel (fréquences de radiodiffusion)
- Le Ministère chargé de l'Espace
- Le Ministère de la Défense (forces armées)
- Le Ministère de l'Intérieur (police, sapeurs-pompiers)
- L'Administration de la météorologie
- L'Administration des ports et de la navigation maritime
- Le Ministère chargé de la Recherche (radioastronomie)

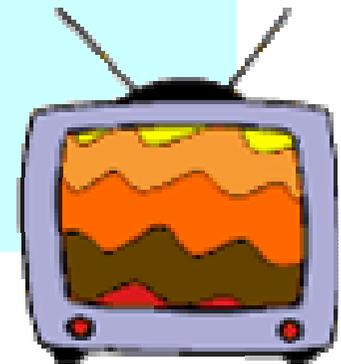
Principales fonctions d'une chaîne RF d'émission

- Génération de la fréquence RF (porteuse)
- Modulation de la porteuse par le signal à transmettre (audio, vidéo, data)
- Amplification de puissance
- Transport de l'énergie RF vers l'antenne
- Rayonnement d'une onde électromagnétique



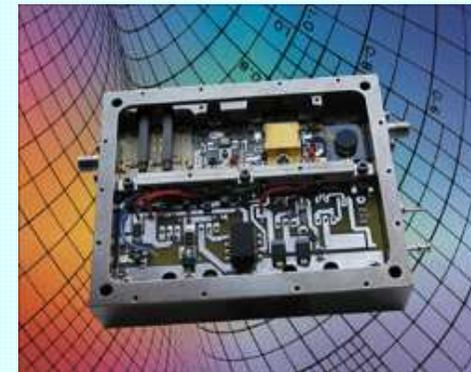
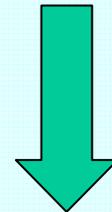
Principales fonctions d'une chaîne RF de réception

- **Captation des signaux (antenne et *feeder*)**
- **Amplification sélective (en fréquence)**
- **Sélection du signal utile (filtrage)**
- **Démodulation**
- **Interface utilisateur (HP, écran, ...)**



Difficultés liées aux fréquences élevées

- Effet de peau → pertes dans les conducteurs
- Pertes dans les circuits magnétiques et les diélectriques
- Chute du gain des composants semi-conducteurs avec la fréquence
- Éléments parasites dans les circuits (capacités, inductances, couplages)
- Difficultés des mesures



Outils spécifiques, technologies de pointe

Impédance normalisée

- Tous les équipements fonctionnant en RF ou en hyper possèdent une impédance d'entrée et/ou de sortie de 50Ω (75Ω en vidéo et télévision).
- Les interconnexions sont toujours adaptées en impédance de manière à procurer un transfert d'énergie maximal.



Expression de la puissance

Le domaine de puissance traité en RF ou en hyper est extrêmement étendu: de plusieurs dizaines de MégaWatts pour des émetteurs de radiodiffusion à quelques picoWatts reçus par une antenne de télécommunications par satellites.

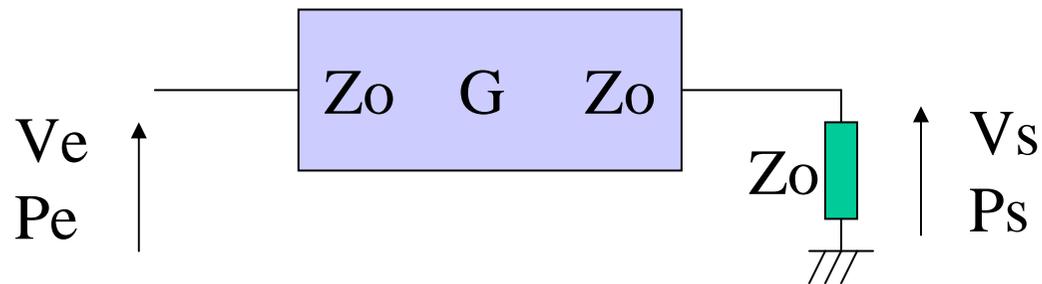
On préfère donc utiliser des échelles logarithmiques et on exprime la puissance en déciBel par rapport à un niveau de référence de 1milliWatt ou de 1 Watt:

$$P \text{ en dBm} = 10 \log (P \text{ en mW})$$

$$P \text{ en dBW} = 10 \log (P \text{ en Watt})$$

$$P(\text{dBm}) = P(\text{dBW}) + 30$$

Intérêt de la notation



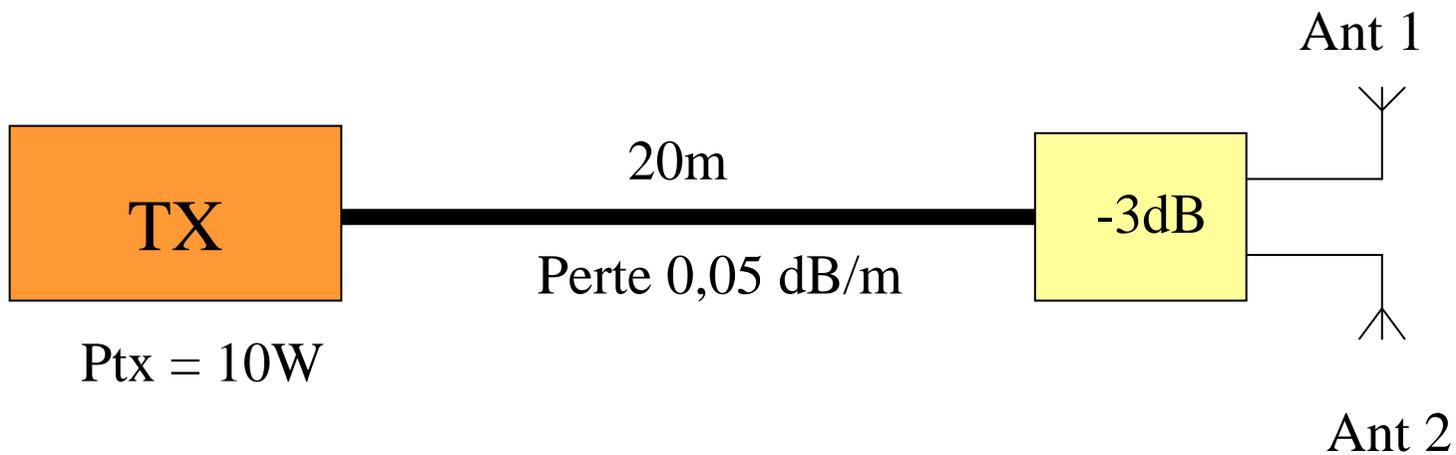
$$P_e = \frac{V_e^2}{Z_0}$$

$$P_s = \frac{V_s^2}{Z_0}$$

$$G(\text{dB}) = 20 \log(V_s/V_e) = 10 \log(P_s/P_e)$$

$$\mathbf{P_s(\text{dBm}) = P_e(\text{dBm}) + G(\text{dB})}$$

Exemple



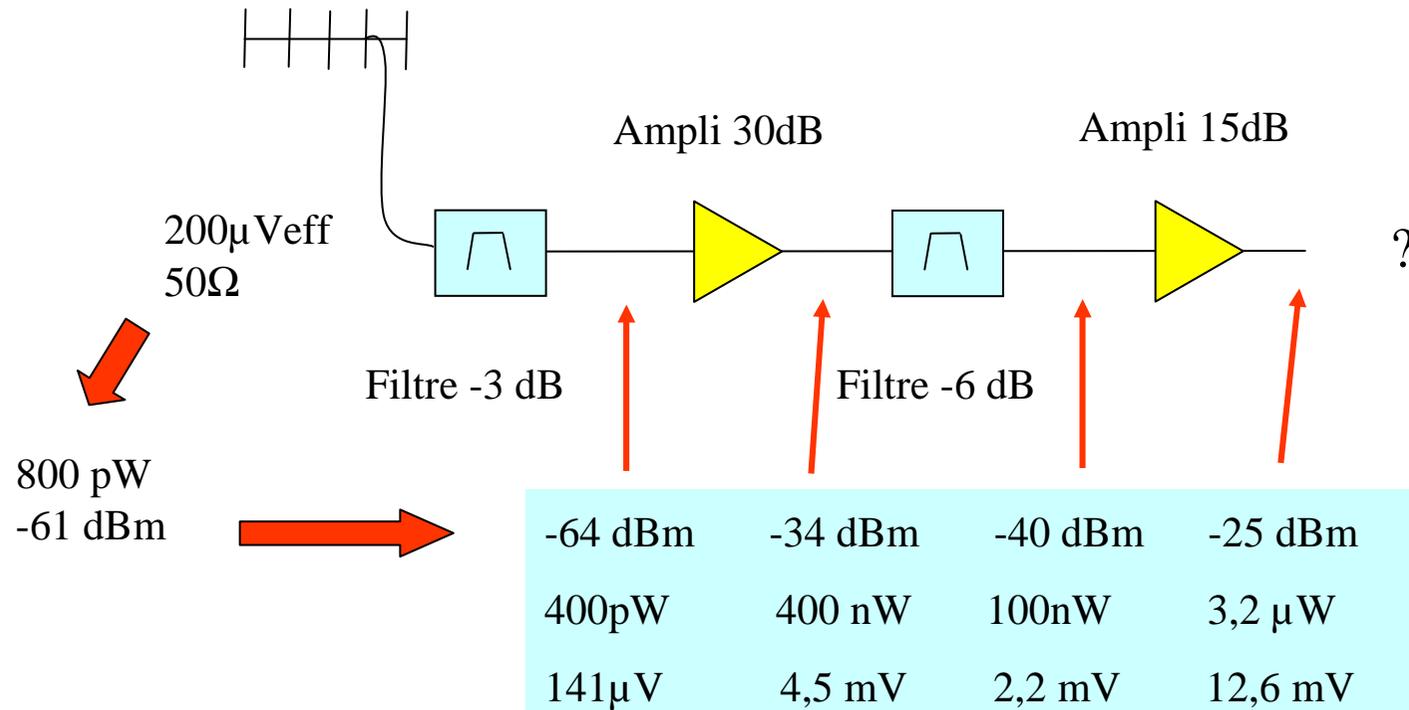
Puissance rayonnée par l'antenne 1 ?

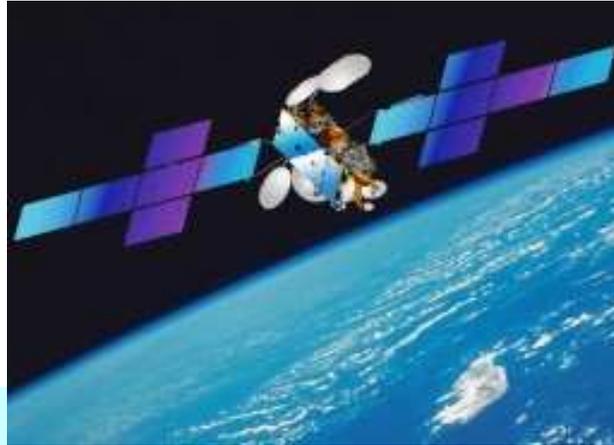
$$P_{tx} = 40 \text{ dBm} \quad \text{Pertes dans le câble} = 1 \text{ dB}$$

$$P_{ant1} = P_{ant2} = 40 - 1 - 3 = 36 \text{ dBm}$$

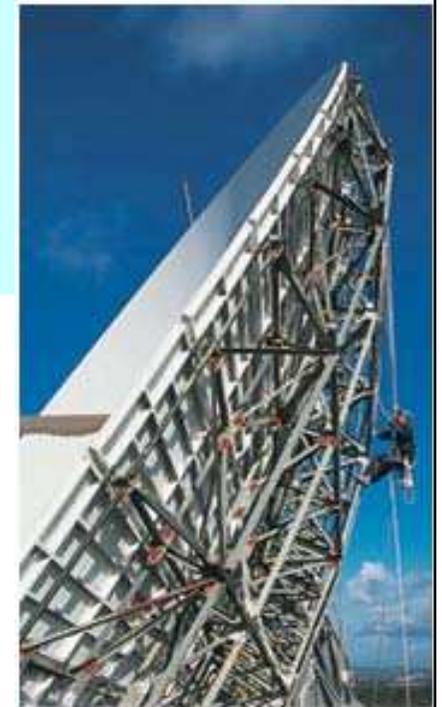
$$P_{ant1} = P_{ant2} \approx 4W$$

Exemple: amplificateur d'antenne TV





Propagation d'une onde électromagnétique en espace libre



Antenne isotrope

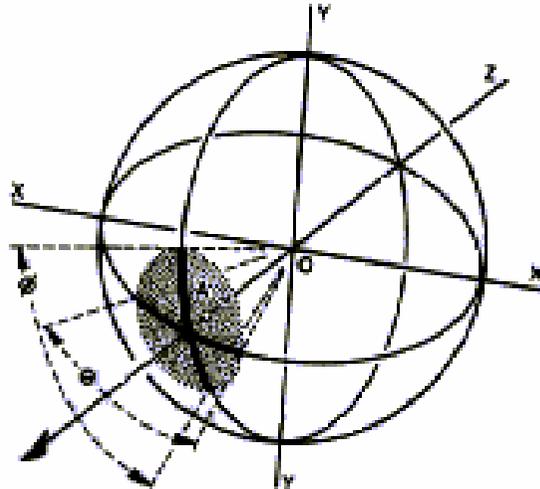
Définition

Antenne ponctuelle qui rayonne de la même manière dans toutes les directions.

C'est un modèle théorique de référence qui n'est pas physiquement réalisable.



Densité de puissance émise



La puissance P_t est distribuée uniformément sur la surface de la sphère

La **densité de puissance** émise à la distance d est

$$S = P_t / 4\pi d^2$$

Puissance reçue à la distance d

Étant donnée une onde sphérique de densité de puissance S en un point, une antenne placée en ce point captera une certaine puissance P_r , proportionnelle à S . $P_r = AS$

Le coefficient de proportionnalité A , qui a les dimensions d'une aire, s'appelle l'**Aire équivalente** de l'antenne.

Pour l'antenne isotrope l'aire équivalente est:

$$A = \lambda^2 / 4\pi \quad \text{où } \lambda \text{ est la longueur d'onde}$$

La **Puissance reçue par l'aérien isotropique** à la distance d de la source est : $P_r = S\lambda^2 / 4\pi$ Soit

$$P_r = P_t (\lambda / 4\pi d)^2$$

Atténuation en espace libre

Atténuation de parcours (en dB)

$$L_p \text{ (dB)} = 10 \log(P_t/P_r)$$

Cas de l'antenne isotrope

$$P_t/P_r = (4\pi d/\lambda)^2 \quad \lambda = c / f$$

$$P_t/P_r = (4\pi/c)^2 f^2 d^2$$

$$L_p \text{ (dB)} = 10 \log (4\pi/c)^2 f^2 d^2$$



$$L_p \text{ (dB)} = 32,44 + 20 \log f \text{ (MHz)} + 20 \log d \text{ (km)}$$

Polarisation de l'Onde

On sait qu'à une grande distance des sources l'onde électromagnétique peut être assimilée à une onde plane représentée par deux vecteurs orthogonaux: le champ électrique E et le champ magnétique H .

Par convention: la polarisation de l'onde est la direction du champ électrique E .

Si le vecteur champ électrique conserve une direction fixe durant une alternance de l'onde on parle de **Polarisation Rectiligne**.

Polarisation **horizontale** ou **verticale** selon que le champ électrique est parallèle ou perpendiculaire à la surface de la terre

Lorsque ce vecteur tourne d'un tour complet pendant une alternance, son extrémité décrit alors une ellipse, et on parle de **Polarisation Elliptique**.

Un cas particulier de polarisation elliptique est la **Polarisation Circulaire**.

Antennes polarisées



Antenne yagi en polarisation horizontale



Dipôles en polarisation verticale

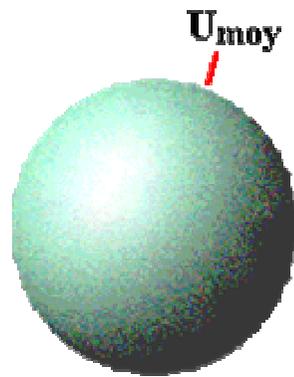
Directivité d'une antenne réelle

La **directivité** d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace.

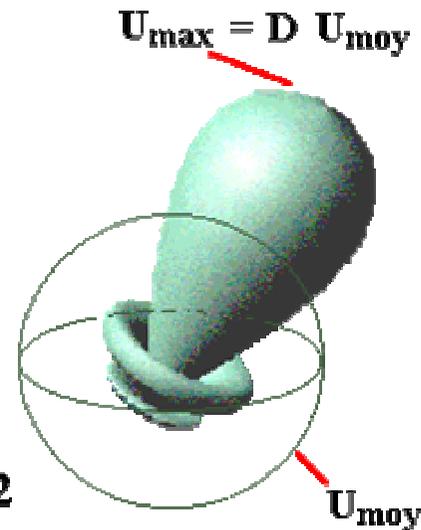
La directivité peut être définie comme le **quotient de l'intensité** de rayonnement dans une direction donnée **par la valeur moyenne de cette intensité** de rayonnement pour toutes les directions de l'espace. On l'exprime de décibels (**dB**).

Une antenne isotrope a une intensité de rayonnement égale dans toutes les directions de l'espace. Sa directivité est nulle (0 dB).

Rayonnement directif



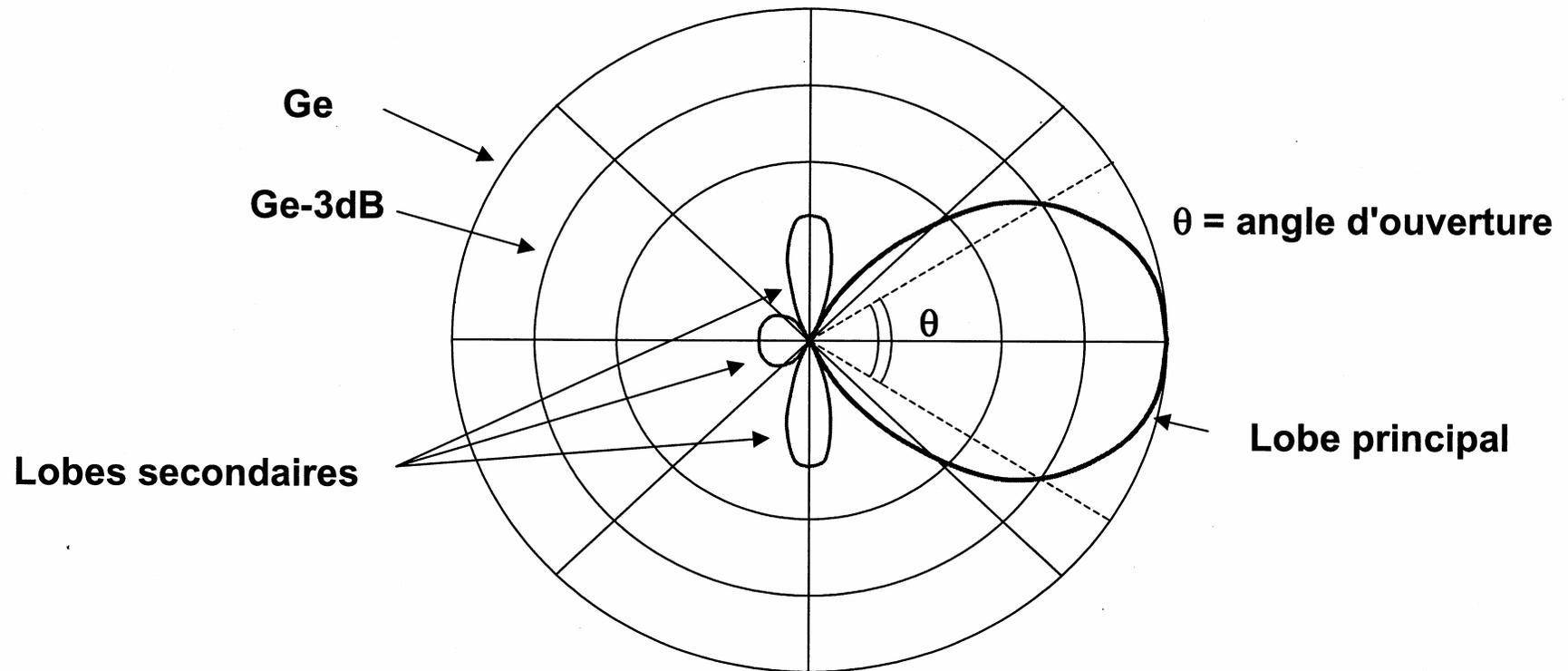
1



2

- 1 - **Rayonnement Isotrope**: rayonnement de même intensité dans toutes les directions, la directivité est nulle
- 2 - **Rayonnement Directif**: une direction de rayonnement est privilégiée, la directivité D est le quotient de l'intensité dans cette direction par l'intensité moyenne

Diagramme de rayonnement



Gain d'une antenne

Le gain d'une antenne est le rapport entre la **Puissance** qu'il faudrait fournir à une antenne de référence et celle qu'il suffit de fournir à l'antenne considérée pour produire la même intensité de rayonnement dans **une direction donnée**.

Le gain est défini pour une fréquence (ou une bande de fréquences) donnée.



Antenne directive Yagi

Gain isotrope d'une antenne

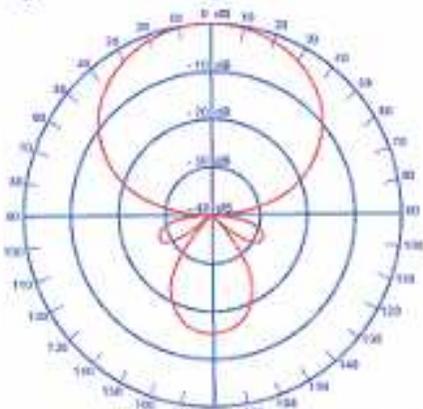
- Si l'antenne de référence est l'**antenne isotrope** on parle alors de **Gain Absolu** (dit aussi *Gain Isotrope*), qui s'exprime en **dBi**.
- Dans le cas où l'on prend comme référence une **source étalon réelle**, on parle de **Gain Relatif**, en **dB**.

Si l'antenne est **sans pertes**, son **gain absolu** est égal à sa **directivité**

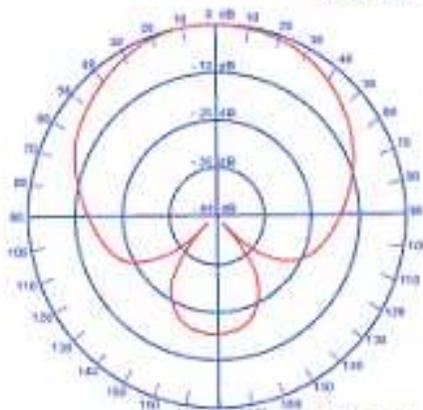


Exemples: antennes yagi

Diagrammes de rayonnement



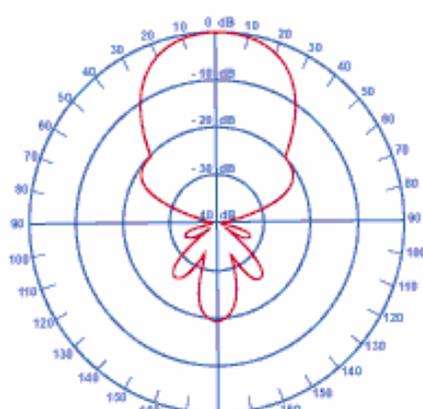
Plan E



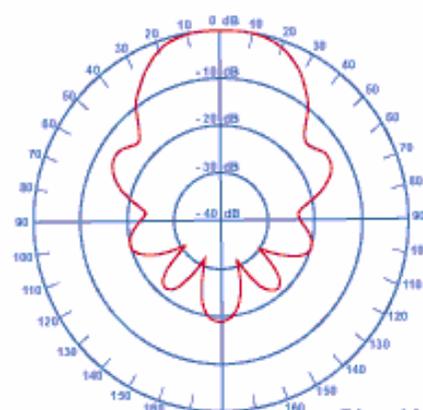
Plan H

$$L=0,37\lambda \quad G=9,1\text{dBi} \quad \theta=2 \times 29^\circ$$

Diagrammes de rayonnement



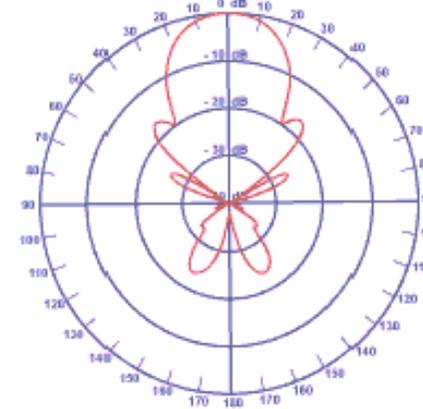
Plan E



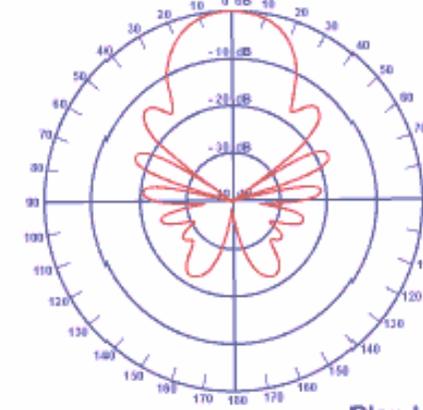
Plan H

$$L=1,65\lambda \quad G=13,1\text{dBi} \quad \theta=2 \times 20^\circ$$

Diagrammes de rayonnement



Plan E



Plan H

$$L=3,14\lambda \quad G=15,3\text{dBi} \quad \theta=2 \times 16^\circ$$

Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente (PIRE)

On appelle **Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente (PIRE)** d'une antenne, le produit de la puissance p fournie à l'antenne par le gain isotrope g , c'est à dire : $\mathbf{pire} = p \cdot g$
Elle caractérise la puissance rayonnée dans une direction donnée (ou dans la zone couverte).

La PIRE est la puissance qu'il faudrait fournir à une antenne isotrope pour produire la même puissance que l'antenne directive dans la direction considérée.

On l'exprime en dBm ou en dBW :

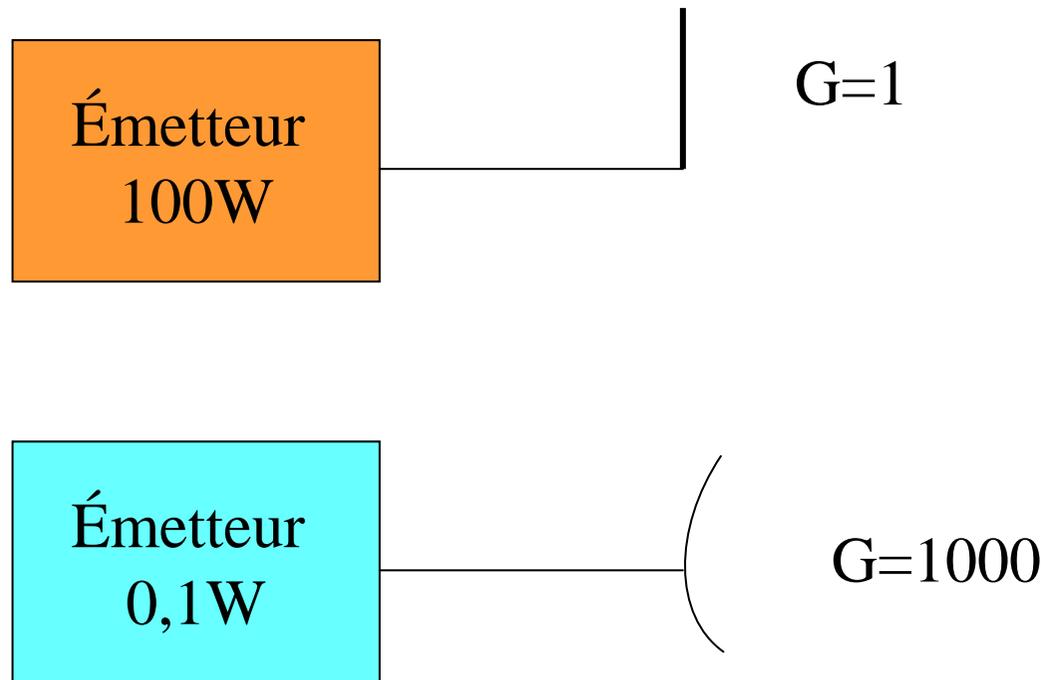
$$\text{PIRE (dBW)} = 10 \log \text{pire (W)} = 10 \log P_t(\text{W}) + 10 \log g$$

$$\mathbf{\text{PIRE (dBW)} = P_t \text{ (dBW)} + G(\text{dBi})}$$

PIRE (EIRP)

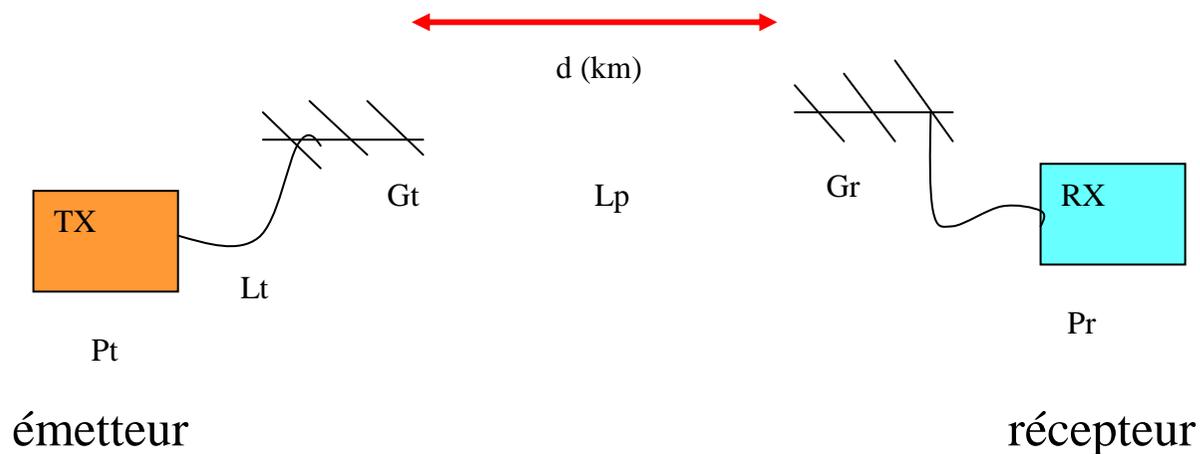
Exemple:

PIRE identique produite de deux manières différentes



Bilan de liaison

Il faut tenir compte du gain des antennes d'émission et de réception et des pertes dans les lignes de transmission



$$Pr(\text{dBm}) = Pt(\text{dBm}) - Lp(\text{dB}) + Gt(\text{dBi}) + Gr(\text{dBi}) - Lr(\text{dB}) - Lt(\text{dB})$$

$$Pr(\text{dBm}) = \text{PIRE}(\text{dBm}) - Lt(\text{dB}) - Lp(\text{dB}) + Gr(\text{dBi}) - Lr(\text{dB})$$

Liaison WIFI à 2,4 GHz

Distance : 3 km

Puissance d'émission : 10mW

Gain de l'antenne d'émission : 6dBi

Pertes dans le câble d'émission : 2dB

Gain de l'antenne de réception : 6dBi

Pertes dans le câble de réception : 2 dB



Calculer la Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente PIRE (dBm)

Calculer l'atténuation de parcours

La sensibilité du récepteur est -100 dBm, la liaison est elle possible ?

Quelle est la portée maximale de l'installation ?

Liaison WIFI à 2,4 GHz

| | | |
|------------------------|------|-----|
| Distance | 3 | km |
| Fréquence | 2400 | MHz |
| Puissance d'émission | 10 | mW |
| Gain antenne émission | 6 | dBi |
| pertes dans le feeder | 2 | dB |
| | | |
| Gain antenne réception | 6 | dBi |
| pertes dans le feeder | 2 | dB |

| | | |
|-------------------------|--------|-----|
| PIRE | 16,00 | dBm |
| Atténuation de parcours | 109,59 | dB |
| Puissance reçue | -91,59 | dBm |

| | |
|------|-----|
| 7,9 | km |
| 2400 | MHz |
| 10 | mW |
| 6 | dBi |
| 2 | dB |
| | |
| 6 | dBi |
| 2 | dB |

| | |
|---------|-----|
| 16,00 | dBm |
| 118,00 | dB |
| -100,00 | dBm |

Bruit thermique

L'agitation thermique des électrons se traduit par l'apparition d'un bruit blanc, gaussien de valeur moyenne nulle.

La **puissance de bruit** est donnée par :

$$P_b = kTB$$

K : constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/°K

T : Température en degrés Kelvin

B : Bande passante du système en Hz ($B = \Delta f$)

Bruit et bande passante

Pour $T=290^{\circ}\text{K}$ et $B=1\text{Hz}$ on a:

$$P_b = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290 = 4 \cdot 10^{-21} \text{ W} = 4 \cdot 10^{-18} \text{ mW}$$

Soit en dBm:

$$P_b \text{ (dB)} = 10 \log 4 \cdot 10^{-18} = -174 \text{ dBm}$$

Pour une bande passante BW:

$$\mathbf{P_b \text{ (dB)} = -174 \text{ dBm} + 10 \log \text{ BW(en Hz)}}$$

Facteur de bruit

Rapport signal sur bruit S/N

C'est le rapport de la puissance du signal S sur la puissance de bruit N

Bruit d'un quadripôle

Un quadripôle réel génère du bruit. Il dégrade donc le rapport signal/bruit. On le caractérise par son facteur de bruit F

Figure de bruit

$$F = (S/N)_{\text{entrée}} / (S/N)_{\text{sortie}}$$

Facteur de bruit

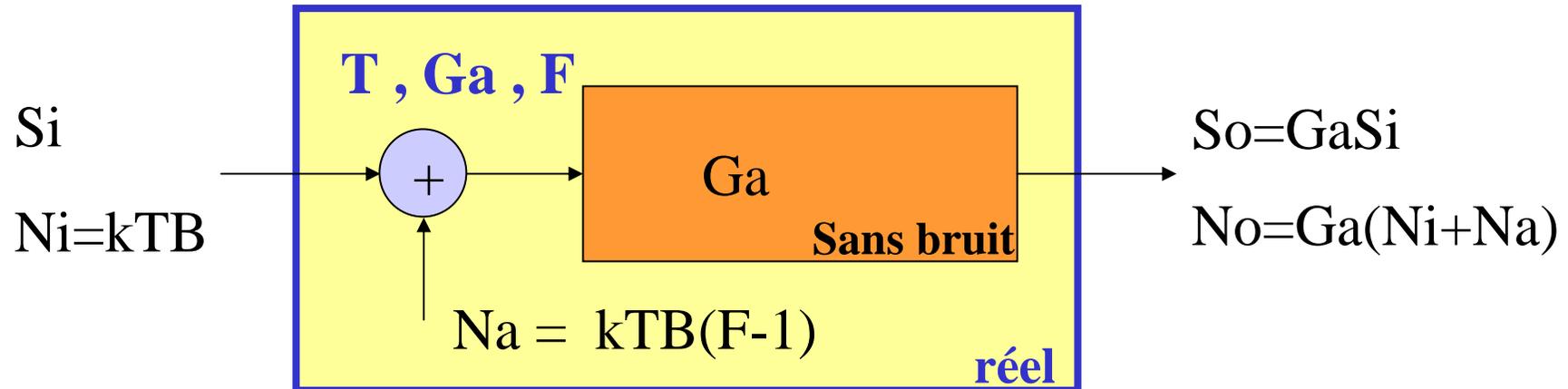
$$NF = F_{\text{dB}} = 10 \log[(S/N)_{\text{entrée}} / (S/N)_{\text{sortie}}]$$

Exemple: Low Noise Bloc



LNB: tête de réception télévision par satellite
F: 10,7 -12,75 GHz G: 55dB NF: 0,3 dB

Modélisation d'un quadripôle



Rapport signal/bruit en sortie

$$S_o/N_o = GaS_i/Ga(N_i+N_a) = S_i/(N_i+N_a)$$

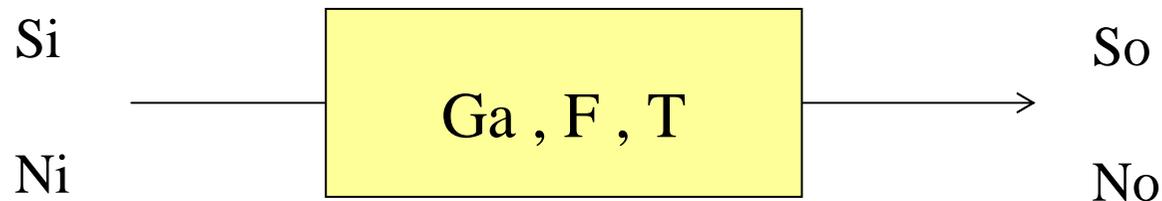
Figure de bruit

$$F = (S_i/N_i)/(S_o/N_o) = S_iN_o/N_iS_o = (N_i+N_a)/N_i$$

Puissance de bruit du quadripôle en entrée

$$N_a = N_i(F-1) = kTB(F-1)$$

Puissance de bruit en sortie



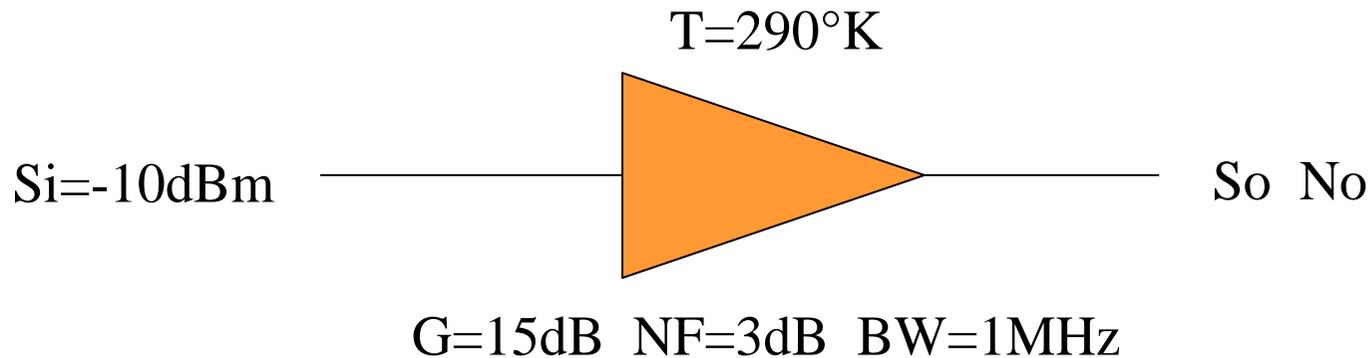
$$F = (S_i/N_i)/(S_o/N_o) = S_i N_o / N_i S_o = S_i N_o / N_i G_a S_i$$

$$F = N_o / G_a N_i \rightarrow N_o = G_a F N_i = G_a F k T B$$

$$N_o \text{ (dBW)} = N_i \text{ (dBW)} + G_a \text{ (dB)} + NF \text{ (dB)}$$

$$N_i \text{ (dBW)} = 10 \log k T B$$

Exemple



Calculer le rapport signal/bruit en entrée et en sortie

Puissance de bruit en entrée: $N_i = -174 + 10\log(1\text{e}6) = -114 \text{ dBm}$

Puissance de bruit en sortie: $N_o = N_i + G + NF = -114 + 15 + 3 = -96 \text{ dBm}$

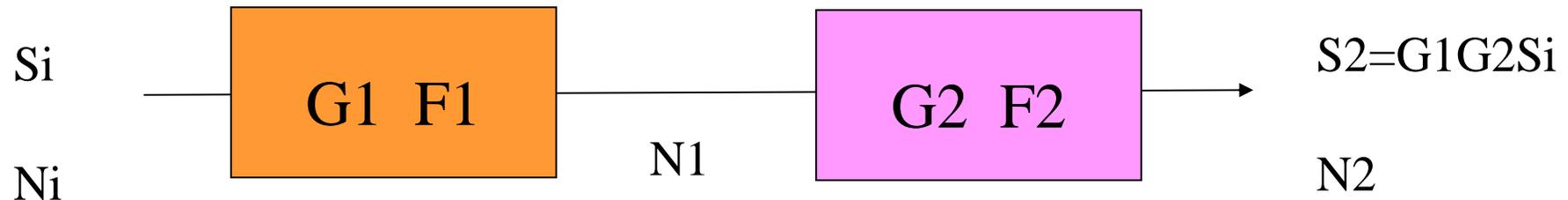
Puissance du signal d'entrée: $S_i = -10 \text{ dBm}$

Puissance du signal de sortie: $S_o = -10 + 15 = 5 \text{ dBm}$

$S_i/N_i = -10 - (-114) = 104 \text{ dB}$ $S_o/N_o = 5 - (-96) = 101 \text{ dB}$

Le rapport signal/bruit s'est dégradé de $3 \text{ dB} = NF$

Figure de bruit d'un système à plusieurs étages



Puissance de bruit à la sortie du premier étage

$$N_1 = G_1 N_i F_1$$

Puissance de bruit à la sortie du second étage

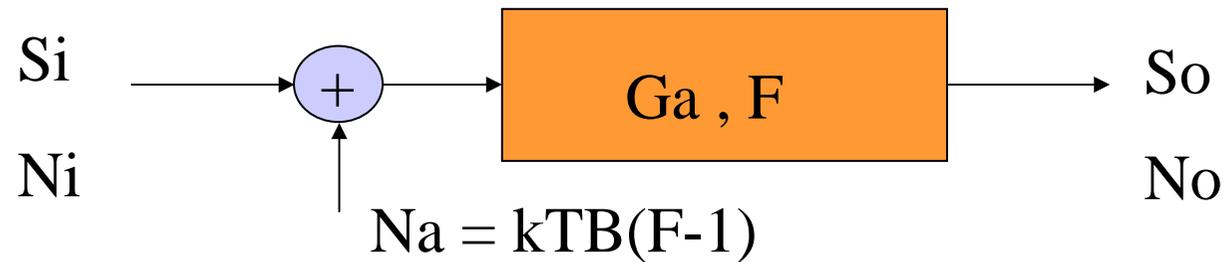
$$N_2 = G_2 (N_1 + N_i (F_2 - 1)) = G_2 N_i (G_1 F_1 + F_2 - 1)$$

$$F = (S_i / N_i) / (S_2 / N_2) = S_i N_2 / S_2 N_i = S_i N_2 / S_i G_1 G_2 N_i$$

$$F = G_2 N_i (G_1 F_1 + F_2 - 1) / G_1 G_2 N_i = F_1 + (F_2 - 1) / G_1$$

Si G_1 est grand, c'est le premier étage qui conditionne le facteur de bruit du système

Température de bruit



Puissance de bruit en sortie

$$N_o = G_a(N_i + N_a) = G_a[kTB + kTB(F-1)] = G_a k B [T + T(F-1)]$$

On pose **$T_a = T(F-1)$**

T: Température en °K **F**: Figure de bruit du quadripôle

T_a est la Température de bruit du quadripôle

La température de bruit est une autre manière de caractériser un dispositif.

Dans un système, les températures de bruit s'ajoutent.

Température de bruit d'une antenne

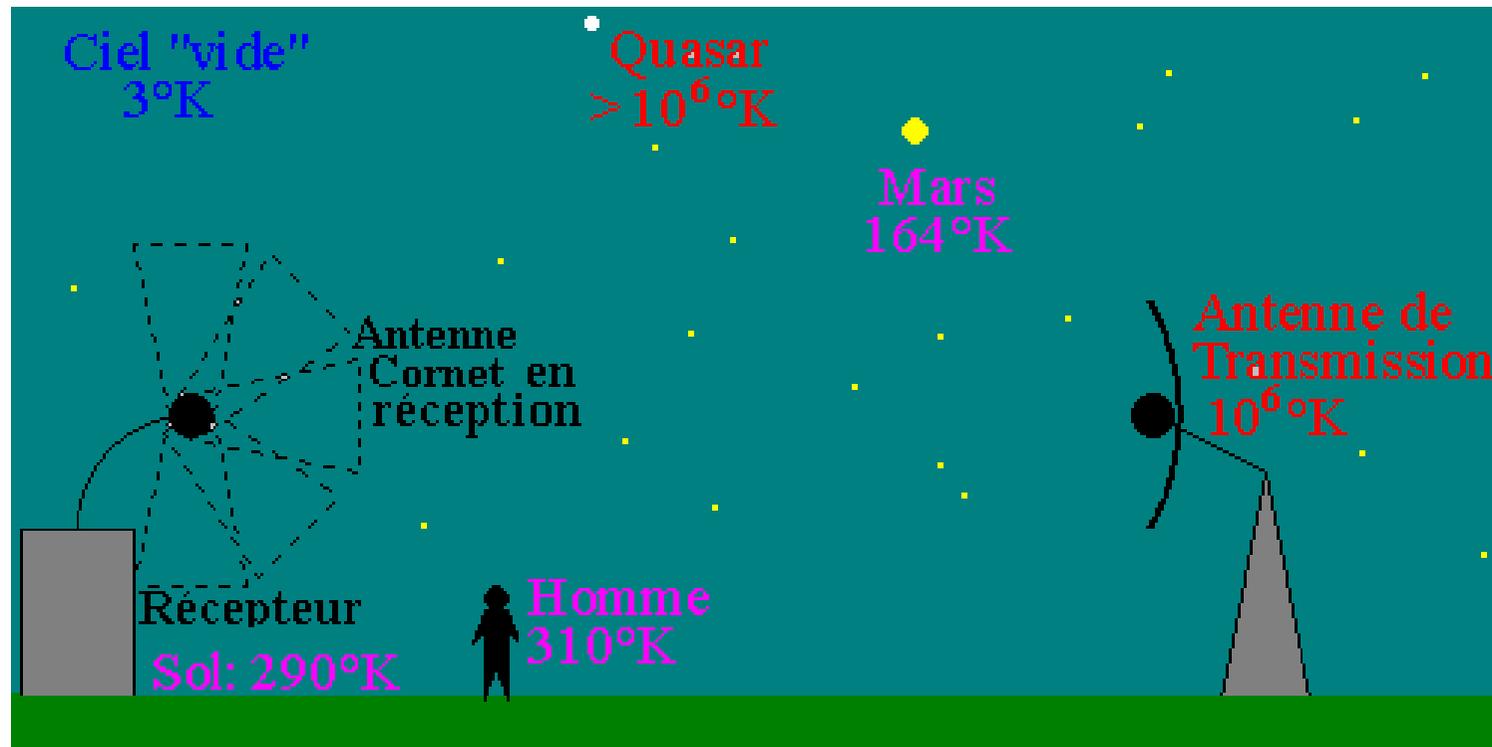
La **Température de bruit** d'une antenne a une grande importance pour les antennes utilisées en réception, notamment lorsqu'elles captent un signal provenant d'un satellite.

On la définit comme : **$T_{ant} = P_b/kB$**

où **P_b** est la **puissance de bruit** disponible à l'entrée du récepteur *en Watt*, **K** la **constante de Boltzmann** soit *$1,38.E-23$ Joules/°C* et **B** la **largeur de bande** du récepteur *en Hz*.

Si l'antenne est parfaite, ce bruit provient des sources de bruit externes, célestes ou terrestres.

Exemples de températures de bruit mesurées à 9,5GHz



Le sol se comporte comme un corps noir à 290°K

Rapport porteuse à bruit

En espace libre on a:

Puissance du signal reçu : $P_r = P_{IRE} \cdot G_r(\lambda/4\pi d)^2$

Puissance de bruit totale : $P_b = k(T_{ant} + T_{rx})B$

$$\frac{P_r}{P_b} = \frac{C}{N} = P_{IRE} \frac{G_r}{(T_{ant} + T_{rx}) k B} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$



G/T : Facteur de mérite
du système de réception

Rapport porteuse à bruit

$$\frac{P_r}{P_b} = \frac{C}{N} = \text{PIRE} \frac{G_r}{(T_{\text{ant}} + T_{\text{rx}}) k B} \frac{1}{\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2}$$

Soit en dB:

$$\frac{C}{N} (dB) = \text{PIRE}(dBW) - L_P (dB) + G_r(dBi) - 10 \log(T_{\text{ant}} + T_{\text{rx}}) - 10 \log B + 228,6$$

$L_p = 10 \log(4\pi d/\lambda)^2$ atténuation en espace libre

$T_{\text{rx}} = T_{\text{amb}}(F-1)$ F : figure de bruit du récepteur

G_r : gain isotrope de l'antenne de réception

$10 \log K = -228,6$ $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$

Bilan de réception du satellite de télévision ASTRA 19,2°EST

Marseille: lat 43°N, long 5°E d=38 100 km

Satellite: F=11GHz Pt=100W Gt=30dBi

Antenne de réception: parabole $\varnothing=80\text{cm}$

Gr=36dBi Tant= 80°K

Récepteur: NF=1dB BW=36MHz

Tamb=300°K (27°C)



Calculer le rapport porteuse/bruit C/N

Bilan de réception du satellite de télévision ASTRA 19,2°EST

$$\frac{C}{N} (dB) = \text{PIRE}(dBW) - L_P (dB) + G_r(dBi) - 10 \log(T_{\text{ant}} + T_{\text{rx}}) - 10 \log B + 228,6$$

$$\text{PIRE} = 10 \log(P_t) + G_t = 50 \text{dBW}$$

$$L_p = 32,44 + 20 \log f (\text{MHz}) + 20 \log d (\text{km}) = 204,9 \text{dB}$$

$$\text{Figure de bruit du récepteur } F = 10^{\text{NF}/10} = 1,26$$

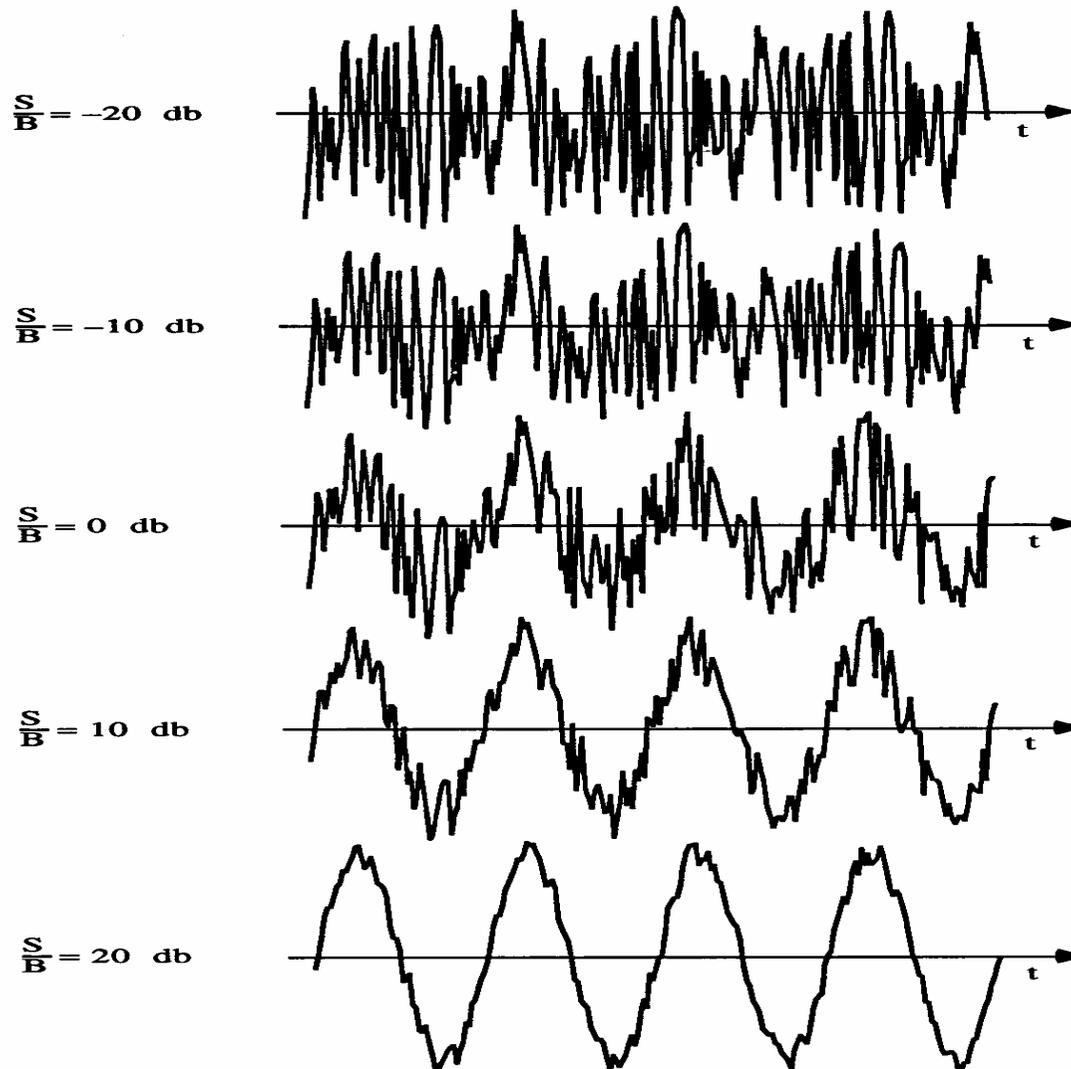
$$\text{Temp. de bruit du récepteur } T_{\text{rx}} = T_{\text{amb}}(F-1) = 77,7^\circ\text{K}$$

$$\text{Temp. de bruit du système } T_{\text{sys}} = T_{\text{ant}} + T_{\text{rx}} = 157,7^\circ\text{K}$$

$$C/N = 50 - 204,9 + 36 - 10 \log(157,7) - 10 \log(36 \times 10^6) + 228,6$$

$$\mathbf{C/N = 12,17 \text{ dB}}$$

Rapport signal /bruit



Sensibilité du récepteur

Le bruit limite la sensibilité.

La sensibilité est définie comme la puissance du signal en entrée au seuil de détectabilité (défini par un certain rapport signal/bruit)

Sensibilité = Nentrée F (S/N)désiré en sortie

Nentrée = kTB puissance de bruit en entrée du récepteur

F : figure de bruit du récepteur (valeur linéaire)

$$\text{Sensibilité(dBW)} = 10\log(kTB) + F(\text{dB}) + (\text{S/N})\text{désiré (dB)}$$

Pour $T=290^\circ\text{K}$ et $B=1\text{Hz}$ $N=-174\text{dBm}$

Exemple

Soit un récepteur de bande passante 1MHz, de facteur de bruit de 20dB à la température de 17°C.
On désire un rapport signal sur bruit de 6dB en sortie ;
Quelle est sa sensibilité ?



Correction

PARAMETRES

| | | |
|-----------------------------|------|-----|
| Température | 17 | °C |
| Bande passante | 1,00 | MHz |
| Facteur de bruit | 20 | dB |
| Rapport signal/bruit désiré | 6 | dB |

RESULTATS

| | | |
|--------------------------|----------|-----|
| Température | 290 | °K |
| Puissance de bruit N_e | 4,00E-15 | W |
| | -143,98 | dBW |
| | -113,98 | dBm |
| Sensibilité | -117,98 | dBW |
| | -87,98 | dBm |

Radiotélescope d'Arecibo



Antenne parabolique de 305 m de diamètre

Propagation dans l'environnement terrestre

Les ondes électromagnétiques subissent en se propageant :

- Réflexion
- Réfraction
- Absorption
- Diffraction

Si le milieu est homogène, la propagation s'effectue en ligne droite comme en optique géométrique. Le passage entre deux milieux homogènes donne lieu à la **réflexion** et à la **réfraction** des ondes.

La présence d'un obstacle, discontinuité brutale du milieu, entraîne une discontinuité du champ électromagnétique : il y a **diffraction**.

Propagation dans l'atmosphère terrestre

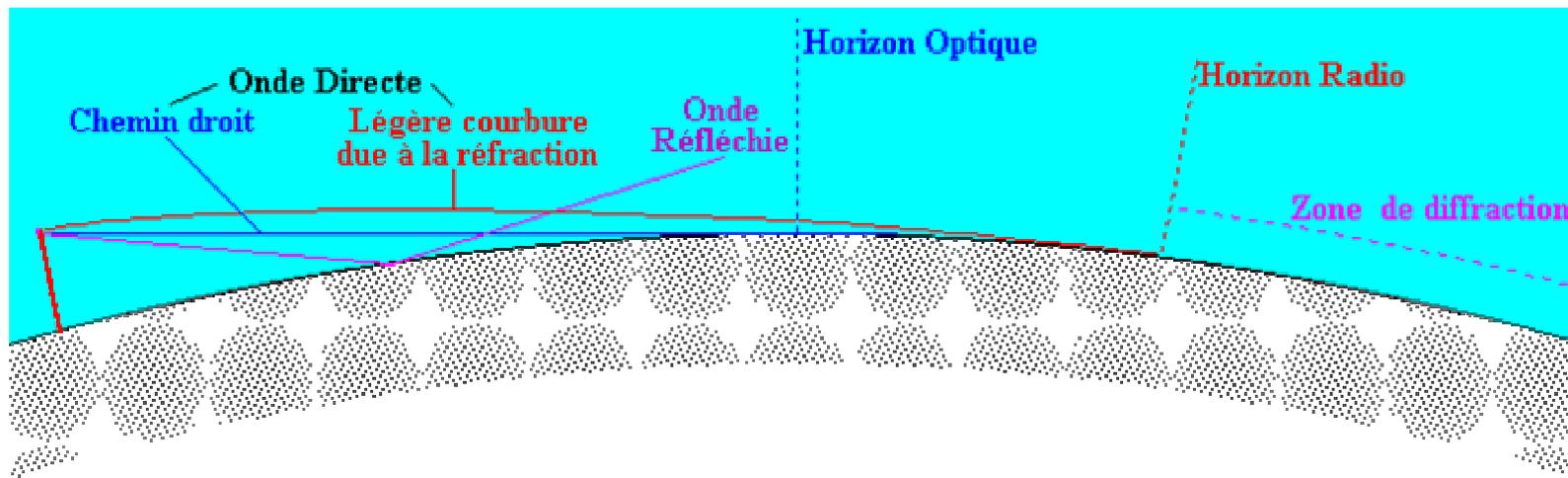
La troposphère

Zone dans laquelle la température décroît quand l'altitude augmente. Elle culmine à 6 km aux pôles et à 18 km à l'équateur.

Elle dévie les ondes, les affaiblit par absorption et les diffuse
On peut la représenter par un modèle stratifié dont l'indice de réfraction n décroît avec l'altitude et devient égal à l'unité vers 8 km d'altitude.

Cette variation courbe les trajectoires avec un rayon de courbure qui vaut quatre fois le rayon de la terre. De ce fait l'horizon radioélectrique est plus éloigné que l'horizon optique.

Propagation troposphérique



A des fréquences supérieures à 30 MHz, la propagation se fait à travers les couches basses de l'atmosphère terrestre.

On distingue l'onde directe et l'onde réfléchi.

Il peut également y avoir présence d'une onde à trajet multiple, qui atteint le récepteur après avoir subi des réflexions sur les couches limites de la troposphère

Propagation dans l'atmosphère terrestre

L'ionosphère

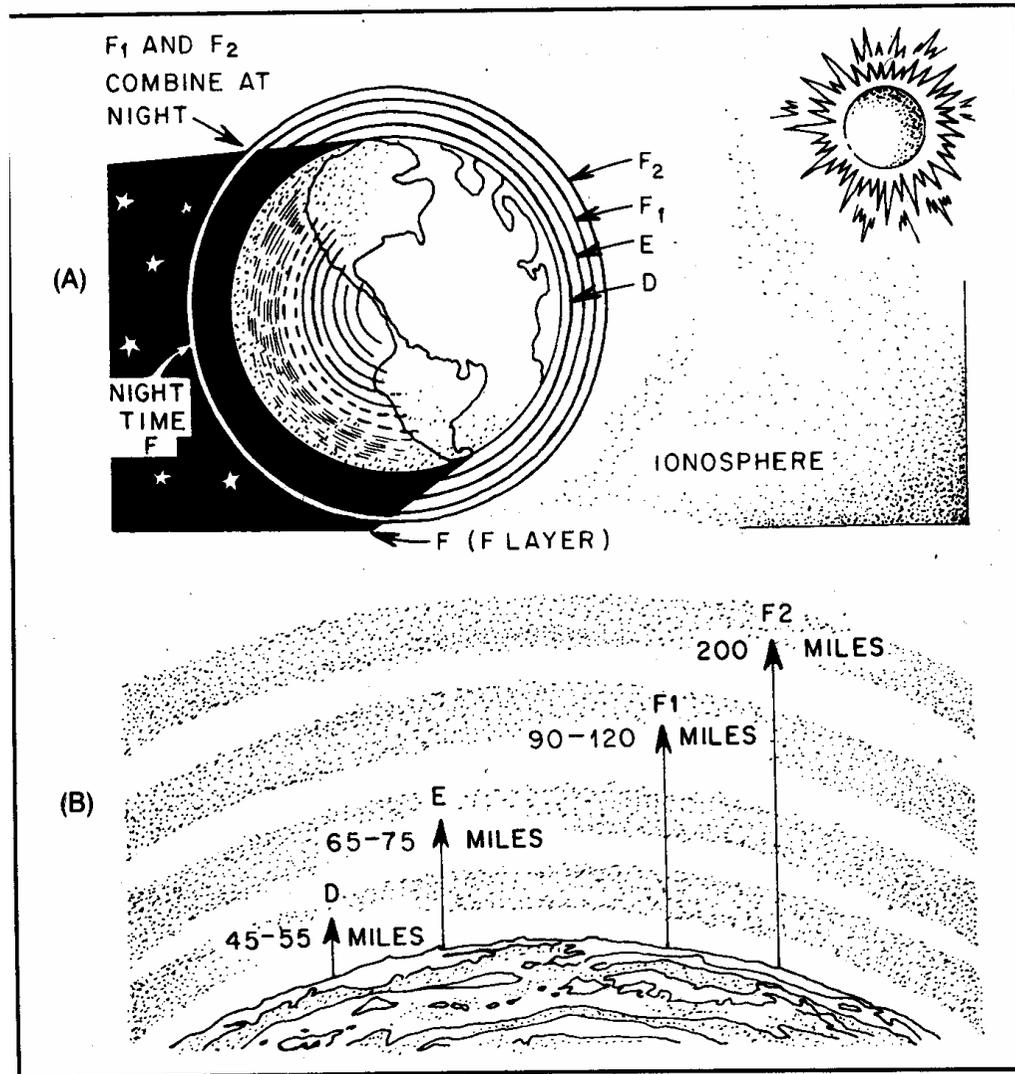
C'est la partie haute de l'atmosphère (50 à 400 km). Elle contient des particules libres et la densité d'électrons varie de $10^8/\text{m}^3$ à $10^{11}/\text{m}^3$

Elle comporte quatre couches (D, E, F1, F2) liées au gradient d'ionisation et fortement influencées par l'activité solaire.

Très forte influence sur les fréquences inférieures à 30 MHz



Structure de l'ionosphère



Couche D:

Altitude : 50 à 90 km

Couche E:

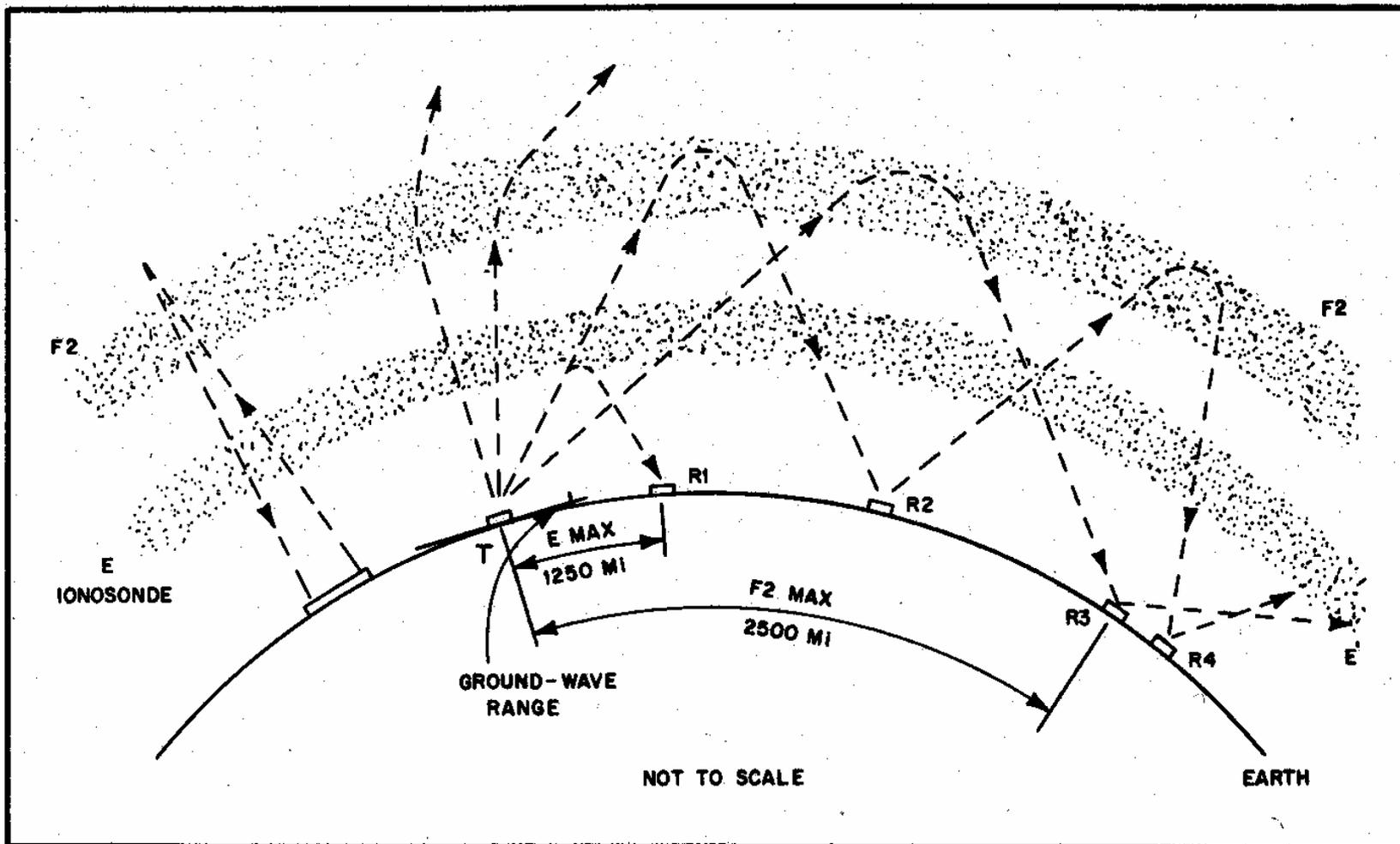
Altitude : 90 à 150 km

Couches F:

Altitude : 200 à 400 km

2 couches F1 et F2 le
jour, une seule la nuit

Propagation ionosphérique



Antenne log-periodic



LP-1010 Hy-gain

Log-periodic 14 éléments

Envergure: 15 m

Longueur: 9,5 m

Bande: 10MHz à 30MHz

$G = 7\text{dBi}$

Rapport avant/arrière: 17 dB

Ambassade du Canada à Bagdad (1976)

La modulation

But

Faire transporter par une onde électromagnétique appelée **porteuse** (Carrier) une ou plusieurs informations (analogiques ou numériques)

L'ensemble des informations transportées s'appelle la **bande de base**

Le milieu dans lequel s'effectue la transmission s'appelle le **canal**

La modulation (analogique)

Onde Porteuse

$$s(t) = A(t) \cdot \cos [2\pi f_c(t) t + \varphi(t)]$$



AM



FM



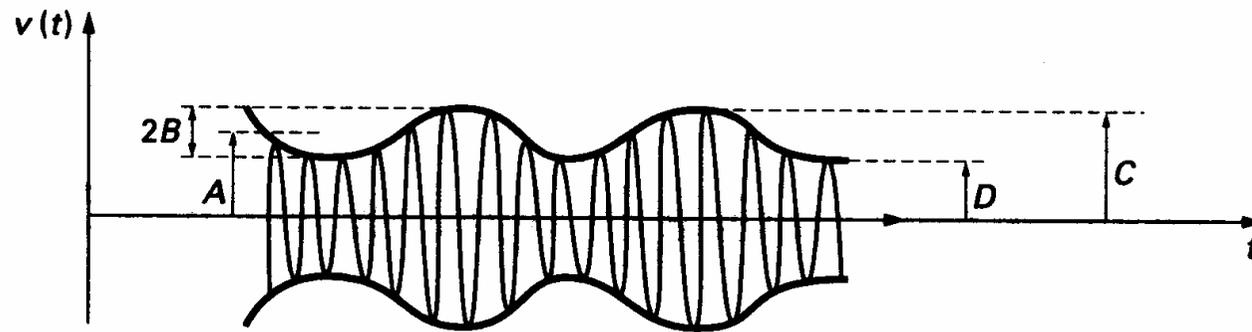
PM

Type de modulation

$$g(t) = G(t) \cos [2\pi f_m(t)]$$

Signal à transmettre

Modulation d'amplitude



$$e(t) = A(1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_c t$$

$f_m = \omega_m / 2\pi$ fréquence de modulation

$f_c = \omega_c / 2\pi$ fréquence de la porteuse

m est appelé **taux de modulation** ($0 < m < 1$)

Spectre d'un signal AM

$$e(t) = A(1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_c t$$

$$e(t) = A \cos(\omega_c t) + mA \cdot \cos(\omega_m t) \cdot \cos(\omega_c t)$$

transformons le produit de cosinus en somme

$$2 \cdot \cos a \cdot \cos b = \cos(a+b) + \cos(a-b)$$

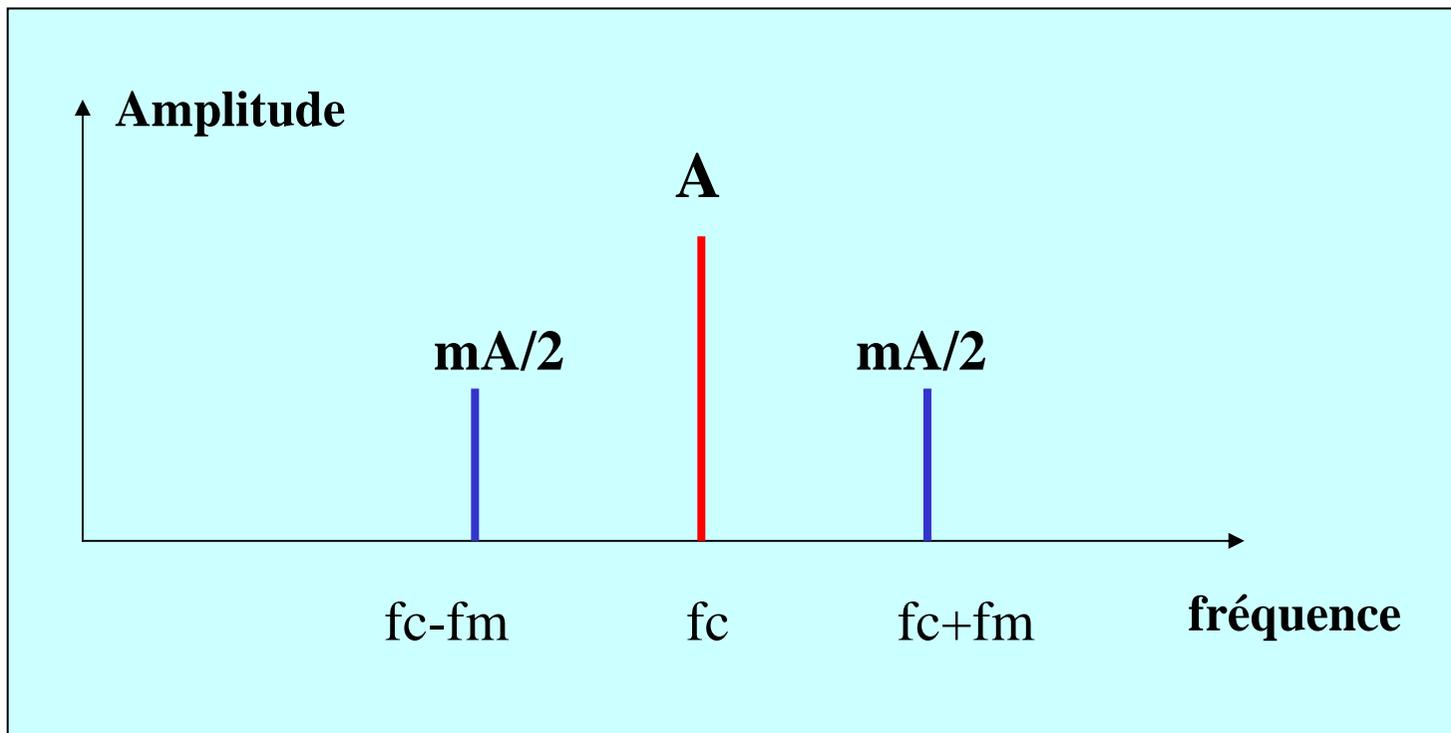
il vient:

$$e(t) = A \cos(\omega_c t) + (mA/2) \cdot \cos(\omega_c - \omega_m)t + (mA/2) \cdot \cos(\omega_c + \omega_m)t$$

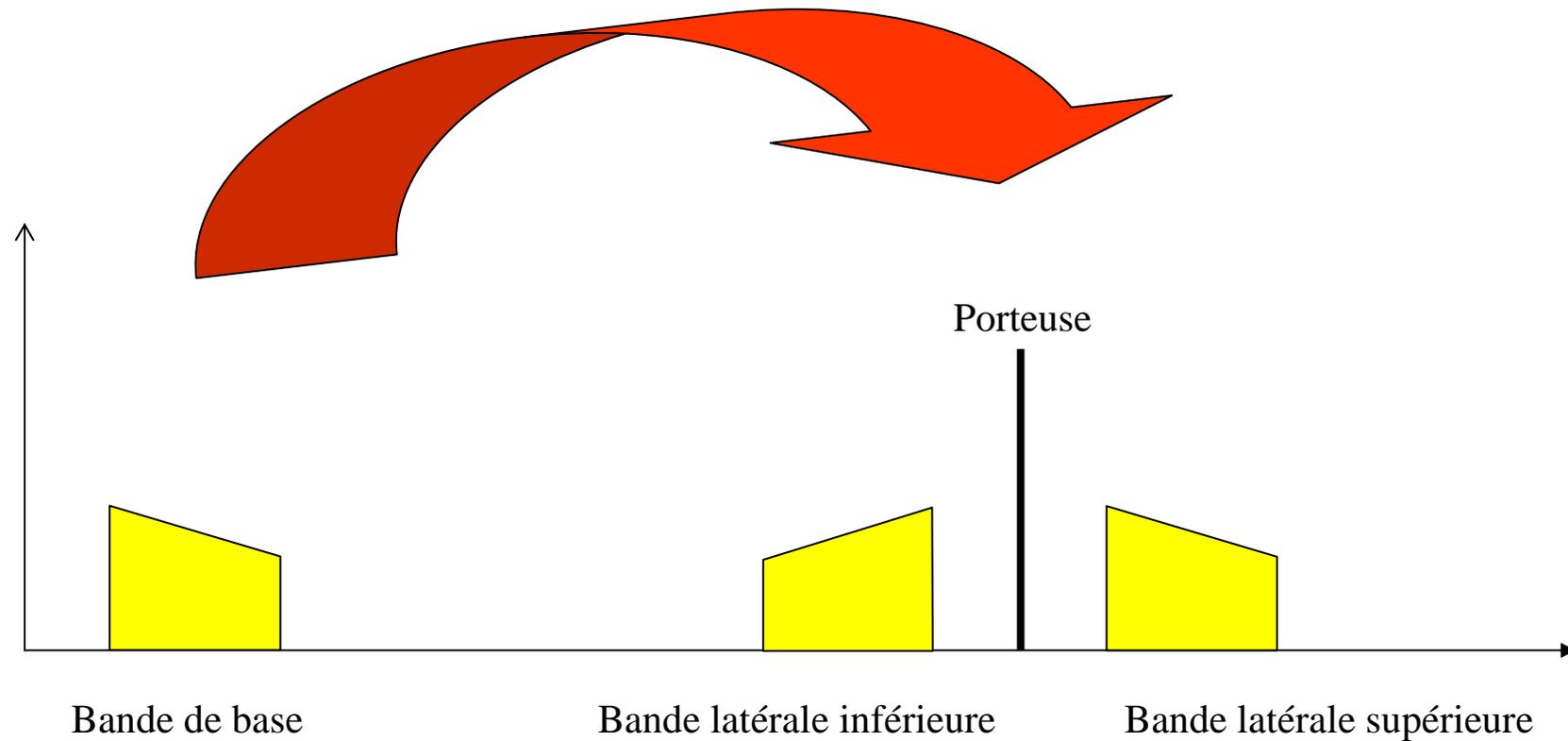
On voit apparaître trois termes:

- Une composante à la fréquence de la **porteuse f_c**
- Une composante à la fréquence **$f_c - f_m$**
- Une composante à la fréquence **$f_c + f_m$**

Spectre d'un signal AM



Modulation d'amplitude



Bilan énergétique de l'AM

L'examen du spectre d'un signal modulé en amplitude montre que:

- Toute l'information est contenue dans les bandes latérales
- Les deux bandes latérales sont redondantes
- La porteuse ne contient pas d'information mais représente la majeure partie de la puissance du signal

Bande latérale unique (BLU)

Pour augmenter l'efficacité des systèmes à modulation d'amplitude et en réduire l'encombrement spectral, on peut :

- Atténuer ou **supprimer la porteuse**
- **Supprimer une des bandes latérales**

Ceci s'effectue à l'émission par un traitement du signal entre le modulateur et les étages de puissance

Relation phase - fréquence

$$s(t) = A \cos(\omega_c t + \varphi_0) = A \cos \Phi(t)$$

$\Phi(t)$: Phase

$$\omega_i(t) = d\Phi(t)/dt$$

$\omega_i(t)$: pulsation instantanée

$f_i(t) = \omega_i(t)/2\pi$: fréquence instantanée

La fréquence est la dérivée de la phase

Modulations angulaires

Porteuse

$$s(t) = A \cos(\omega_c t + \varphi_0) = A \cos \Phi(t)$$

Signal à transmettre

$$g(t) = a \cos(\omega_m t)$$

Si $\Phi(t)$ est une fonction de $g(t) \rightarrow$ modulation angulaire

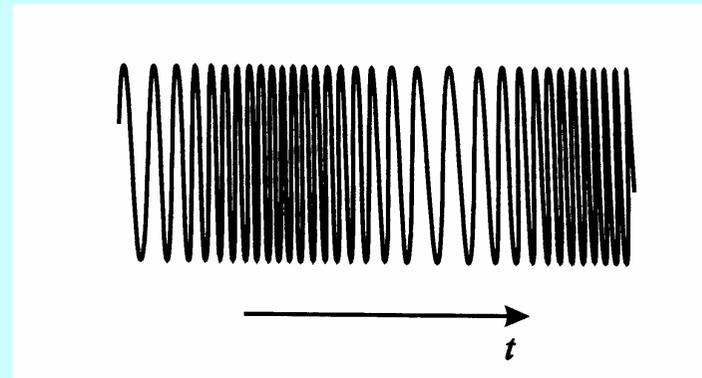
Modulation de phase

$$\Phi(t) = \omega_c t + \varphi_0 + k_1 g(t)$$

Modulation de fréquence

$$\omega_i(t) = \omega_c + k_2 g(t)$$

$$\Phi(t) = \omega_c t + \varphi_0 + k_2 \int g(t)$$



Modulation de fréquence FM

Porteuse

$$s(t) = A \cos(\omega_c t + \varphi_0) = A \cos \Phi(t)$$

$$\Phi(t) = \omega_c t + \varphi_0 + k_2 \int g(t) dt = \omega_c t + \varphi_0 + k_2 a \int \cos(\omega_m t) dt$$

$$\Phi(t) = \omega_c t + (\Delta\omega/\omega_m) \sin(\omega_m t) \quad \text{en prenant } \varphi_0 = 0$$

On pose:

$m = (\Delta\omega/\omega_m) = (\Delta f/f_m)$ est l'**indice de modulation**

Δf est la déviation maximale (shift) de la fréquence de la porteuse et dépend de l'amplitude du signal modulant et du circuit

$$\Delta f \ll f_c$$

Signal à transmettre

$$g(t) = a \cos(\omega_m t)$$

Expression du signal modulé en fréquence

$$e(t) = A \cos(\omega_c t + m \sin(\omega_m t))$$

$$e(t) = A[\cos(\omega_c t)\cos(m \sin(\omega_m t)) - \sin(\omega_c t)\sin(m \sin(\omega_m t))]$$

Deux cas:

- **FM à bande étroite** (radiotéléphonie, taxi, VHF marine, pompiers, ...)
- **FM à bande large** (radiodiffusion, télévision analogique par satellite)

FM à bande étroite

$$m \ll \pi/2$$

$$e(t) = A[\underbrace{\cos(\omega_c t)}_{\approx 1} \cos(m \sin(\omega_m t)) - \underbrace{\sin(\omega_c t) \sin(m \sin(\omega_m t))}_{\approx m \sin(\omega_m t)}]$$

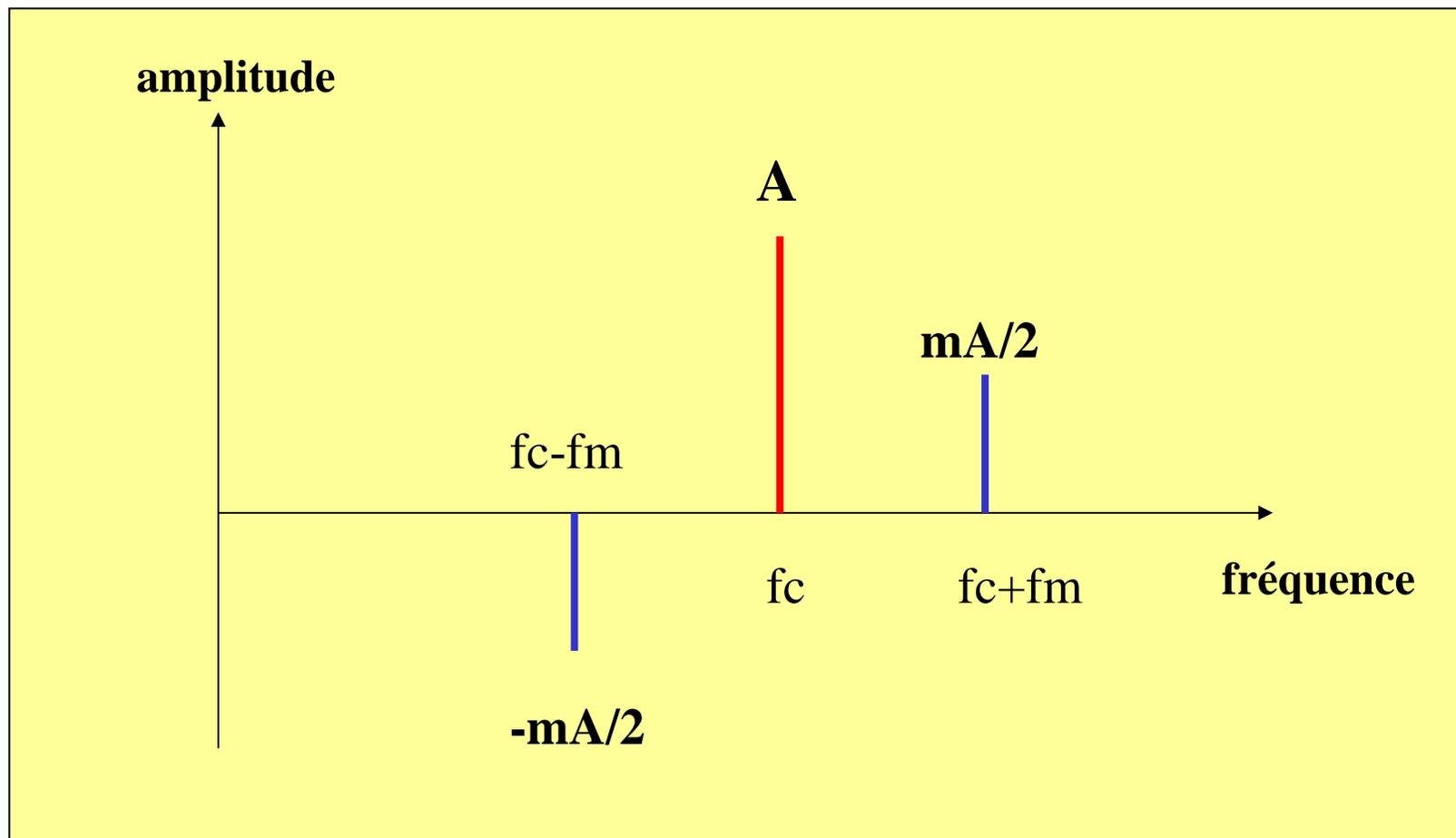
$$e(t) = A[\cos(\omega_c t) - m \sin(\omega_c t) \cdot \sin(\omega_m t)]$$

$$e(t) = A \cos(\omega_c t) + (mA/2) \cdot \cos(\omega_c + \omega_m)t - (mA/2) \cdot \cos(\omega_c - \omega_m)t$$

Expression très similaire à celle du signal modulé en amplitude:

Une porteuse et deux bandes latérales

Spectre d'un signal FM à bande étroite



Spectre d'un signal FM à large bande

$$e(t) = A[\cos(\omega_c t)\cos(m \sin(\omega_m t)) - \sin(\omega_c t)\sin(m \sin(\omega_m t))]$$

développement à l'aide des fonctions de Bessel:

$$\cos(m \sin \omega_m t) = J_0(m) + 2J_2(m)\cos(2\omega_m t) + J_4(m)\cos(4\omega_m t) + \dots$$

$$\sin(m \sin \omega_m t) = 2J_1(m)\sin\omega_m t + 2J_3(m)\sin 3\omega_m t + \dots$$

où J_n représente la fonction de Bessel du $n^{\text{ème}}$ ordre.

$$e(t) = J_0(m) - J_1(m)[\cos(\omega_c - \omega_m)t - \cos(\omega_c + \omega_m)t] + J_2(m)[\cos(\omega_c - 2\omega_m)t + \cos(\omega_c + 2\omega_m)t] - J_3(m)[\cos(\omega_c - 3\omega_m)t - \cos(\omega_c + 3\omega_m)t] + J_4(m)[\cos(\omega_c - 4\omega_m)t + \cos(\omega_c + 4\omega_m)t] + \dots$$

Spectre d'un signal FM à large bande

On obtient un spectre constitué de la *fréquence porteuse* et d'une *infinité de raies latérales* dont l'amplitude est proportionnelle à $J_n(m)$.

Plus m augmente, plus le spectre est large et donc plus la bande passante doit être importante.

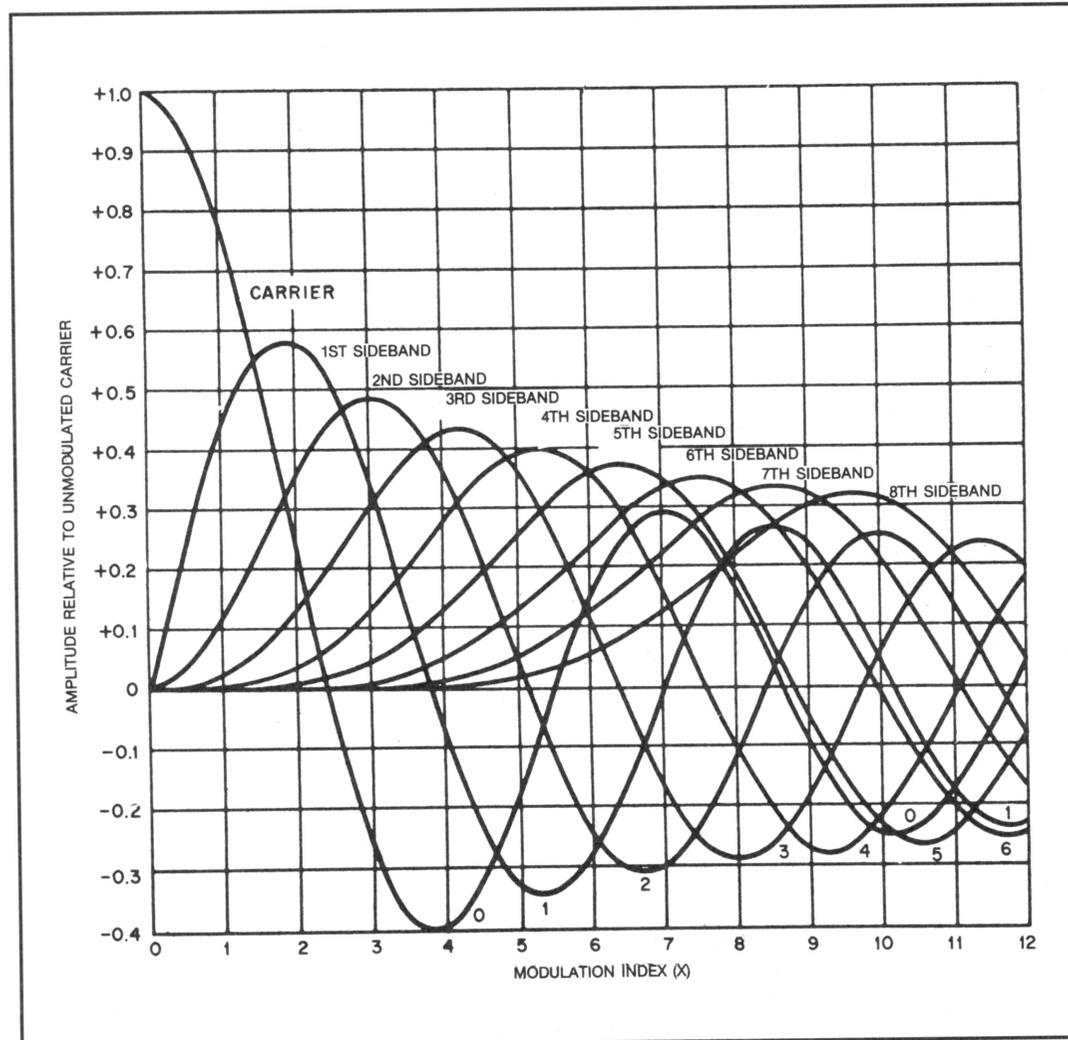
Pour m très grand ($m > 100$) la bande passante nécessaire est égale à $2\Delta f_{\text{crête}}$

Relation de Carson

Dans le cas général, la bande passante nécessaire pour la réception correcte d'une émission FM peut être approximée par la relation de Carson:

$$\mathbf{B} \approx 2(\Delta f_{\text{crête}} + f_m) \quad \text{soit} \quad \mathbf{B} \approx 2f_m (1+m)$$

Amplitude relative des raies en fonction de l'indice de modulation



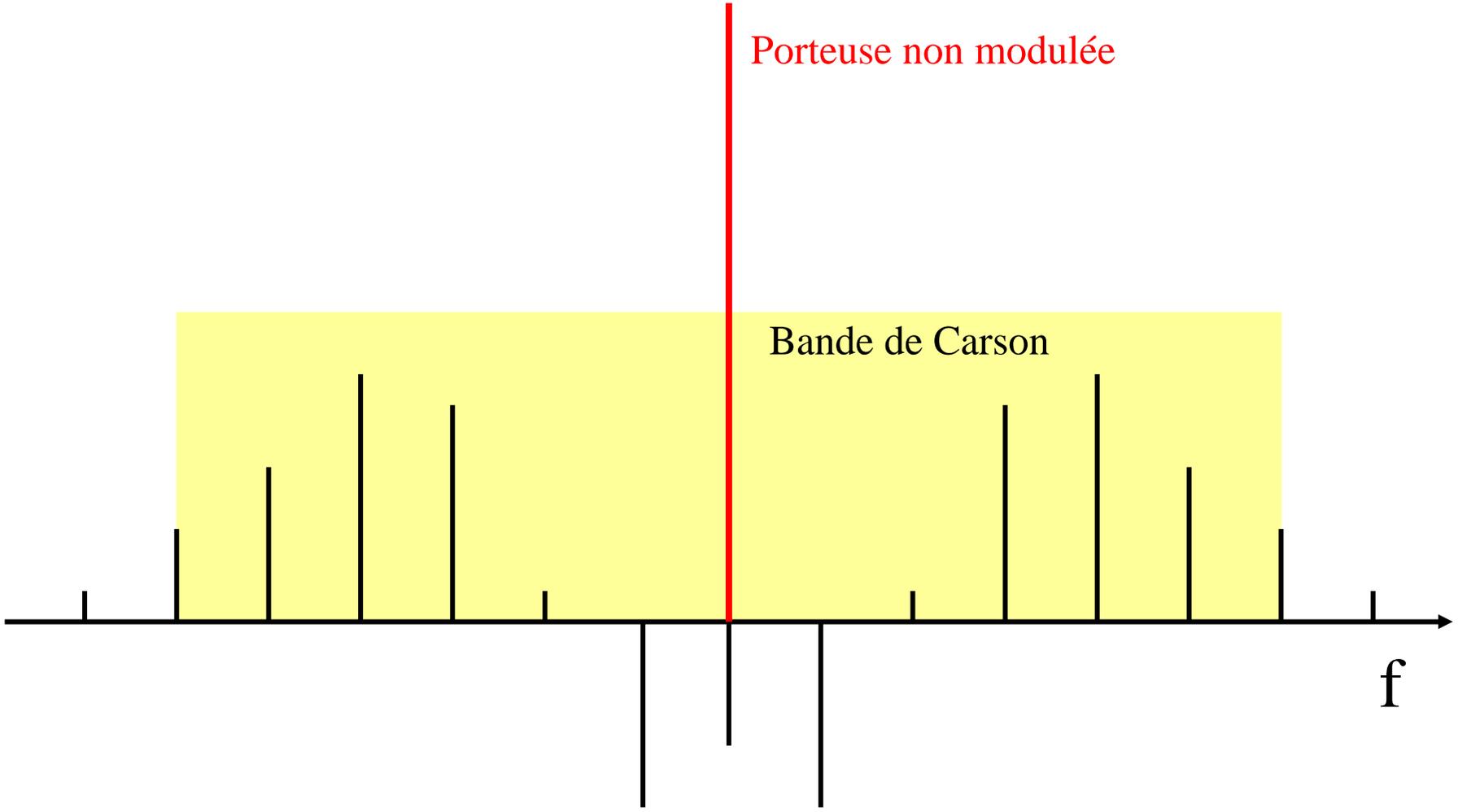
Exemple: radiodiffusion en bande FM

Fréquence de la porteuse : $F = 100$ MHz.

Modulation par un signal audio, dont la bande passante est limitée à 15 kHz, avec une déviation maximale de 75 kHz.

- Calculer l'indice de modulation m
- En déduire l'occupation spectrale de cette émission (on utilisera la formule de Carson)
- Tracer le spectre jusqu'à la septième raie latérale

Spectre pour $m=5$



Glossaire

| Français | Anglais |
|---------------------------|-------------------------|
| Porteuse | Carrier |
| Bande latérale unique BLU | Single side band SSB |
| Bande de base | Base band |
| Modulation d'amplitude | Amplitude modulation AM |
| Modulation de fréquence | Frequency modulation FM |
| Modulation de phase | Phase modulation PM |
| | |

Antenne de réception satellite



Université de Dundee (Écosse)