

Communications par satellite

Les communications par satellite utilisent ceux-ci comme relais hertziens : comme tout corps céleste, les satellites obéissent aux lois de Kepler et l'on distingue 3 types d'orbites, selon l'altitude.

Low Earth Orbit (LEO) : orbite basse, jusqu'à 1 500 km

Medium Earth Orbit (MEO) : orbite allant de 5 000 à 15 000 km et au-delà de 20 000 km (les ceintures de Van Hallen, entre 1 500 et 5 000 km puis entre 15 000 et 20 000 km, rendent ces altitudes inexploitable)

Geostationary Earth Orbit (GEO) : orbite à 35 786 km au-dessus de l'équateur.

La durée d'une révolution est fonction de l'altitude et varie de 100 minutes à basse altitude pour atteindre 24 heures à 35 786 km.

Communications par satellite

Bande	Fréquences	Services
L	1 - 2 GHz	Communications avec les mobiles.
S	2 - 3 GHz	Communications avec les mobiles.
C	4 - 6 GHz	Communications civiles nationales et internationales, télévision.
X	7 - 8 GHz	Communications militaires.
Ku	11 - 14 GHz	Communications civiles nationales et internationales, télévision.
Ka	20 - 30 GHz	nouveaux systèmes d'accès aux réseaux large bande.
EHF	21 - 45 GHz	Communications militaires.

Communications par satellite

La transmission satellite est caractérisée par une forte atténuation et une puissance limitée dans le satellite.

C'est donc le rapport C/N qui est critique et non pas l'efficacité spectrale (contrairement aux communications FH).

Les transmission dans les bandes Ku et au-delà sont très sensibles à la pluie (>10dB).

Communications par satellite

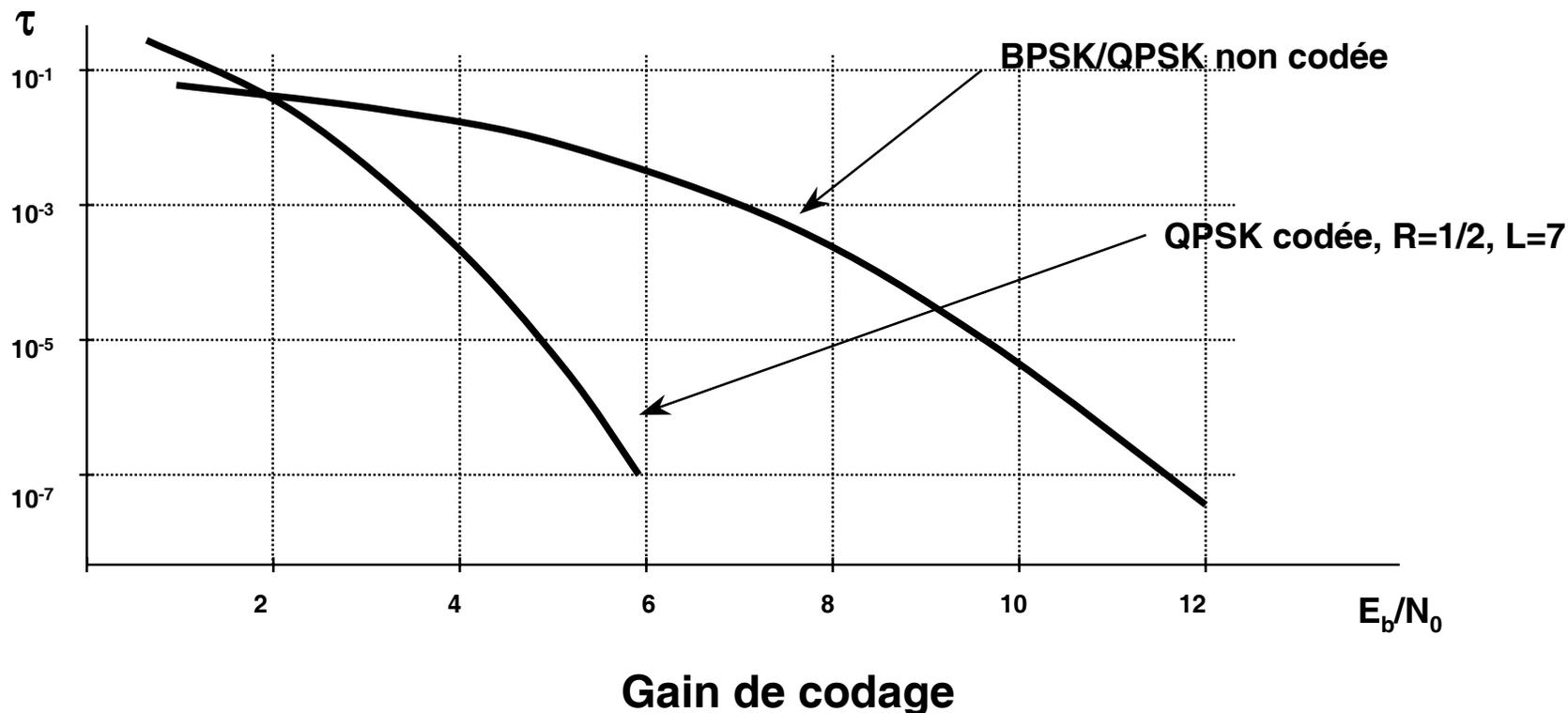
Afin d'optimiser le rendement énergétique dans le satellite, il est important que les amplificateurs puissent travailler en régime de saturation.

La modulation utilisée doit donc être particulièrement résistante aux non-linéarités.

En analogique (diffusion TV), la modulation utilisée est la FM (excursion de fréquence 8 ou 16 MHz).

En numérique, les modulations les plus utilisées sont les MDP-2, 4 et 8. Elles sont associées à un codage de canal permettant la correction des erreurs. Par exemple, pour la diffusion TV numérique, on associe un codage de Reed Solomon (204,188,8), un entrelacement de profondeur 12 et un code interne de rendement $R= 1/2$ et de longueur de contrainte $k=7$. Le codage interne apporte un gain de codage de l'ordre de 4 dB pour un taux d'erreurs de 10^{-3} .

Communications par satellite



Communications par satellite

En analogique.

Gain de modulation FM :

$$\left(\frac{S}{B}\right)_P = \left(\frac{C}{N}\right)_{1\text{MHz}} + 20\log(\Delta f_{CC})_{\text{MHz}} - 6 \text{ dB}$$

Pour une excursion de fréquence de 16 MHz crête-crête (ce qui correspond à une bande transmise de 20 MHz) le gain de modulation est de 18 dB. Il serait de 12dB pour 8 MHz d'excursion. Que devient la formule pour 16 MHz_{cc} avec le C/N dans 20 MHz ?

En numérique.

E_B/N_0 vs C/N : pour une modulation QPSK, avec codage externe RS (188,204) et code interne R, on a

$$\left(\frac{E_B}{N_0}\right) = \left(\frac{C}{N}\right)_{D_s} \cdot \frac{204}{188} \cdot \frac{1}{2R}$$

Rappel : En numérique la formule de Shannon devient

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{R_b E_b}{B N_0} \right)$$

Communications par satellite

En numérique.

E_B/N_0 vs C/N : pour une modulation QPSK, avec codage externe RS (188,204) et code interne R, on a

$$\left(\frac{E_B}{N_0}\right) = \left(\frac{C}{N}\right)_{D_s} \cdot \frac{204}{188} \cdot \frac{1}{2R}$$

Rappel : En numérique la formule de Shannon devient

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{R_b E_b}{B N_0} \right)$$

A la capacité maximale, $R_b = C$ et on trouve

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{\left(\frac{C}{B}\right)} - 1}{\left(\frac{C}{B}\right)}$$

Communications par satellite

- **Satellite géostationnaire ou à défilement**
 - **communications transocéaniques (1962 Early Bird, ...)**
 - **radiodiffusion**
 - **radiocommunications mobiles**
 - **observation de la terre (SPOT, ...)**
 - **téledétection des ressources naturelles**
 - **navigation maritime (INMARSAT)**
 - **localisation (GPS)**

Spécificités des communications par satellite

- **possibilité de liaisons grande distance**
- **grande capacité de trafic**
- **couverture de zones isolées et/ou faible densité de population**
- **simplification des communications avec les mobiles**
- **coût de communications indépendant de la distance**
- **complémentarité avec les réseaux terrestres**

Communications par satellite : les orbites possibles

- **Orbites basses (de 500 à 1500 km)**
orbites prévues pour les communications spatiales cellulaires
faible puissance nécessaire
facilité d'accès au satellite
- **Orbites inclinées**
orbites elliptiques peu utilisées, sauf pour les pays situés à des latitudes élevées (Russie)
nécessité de plusieurs satellites
utilisation de satellites de poursuite
effet Doppler
puissance moyenne

Communications par satellite : les orbites possibles

- **Orbites géostationnaires (36 000 km)**

**très utilisées en télécom, télévision, ou radiodiffusion
permettent d'assurer le service fixe ou mobile
puissances mises en jeu importantes
pas d'effet Doppler**

Différents types de satellite de télécommunications

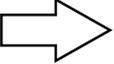
	GEO	MEO	LEO
Altitude	36 000km	13 000km	640 à 1600km
Temps de transit	0,25 s	0,1 s	0,05 s
Applications	Diffusion radio et TV	Téléphonie mobile Données à faible débit	Téléphonie mobile Données à faible et à haut débit
Débit binaire	jusqu'à 155 Mbit/s	de 9,6 à 38,4kbit/s	Petits : 2,4 à 300 kbit/s Gros : 2,4 à 9,6 kbit/s Large bande : de 16kbit/s à 155 Mbit/s

Communications par satellite : les principales missions

- **Service fixe :**
 - Téléphonie, transmission de données.**
 - 4 - 6 GHz (Intelsat, Arabsat)**
 - 12 - 14 GHz (Eutelsat, Astra, Telecom 2)**
 - Télévision directe - radiodiffusion**
 - 12 - 14 GHz (TDF, TeleX)**
- **Liaisons avec les mobiles :**
 - 1,5 - 1,6 GHz**
 - 4 - 6 GHz (Inmarsat)**
- **Localisation**
 - 1,5 - 2,6 GHz**

Communications par satellite : Particularités de la propagation

- Les distances parcourues par les ondes sont très élevées (36 000 à 41 000 km entre un satellite géostationnaire et une station terrienne, suivant son emplacement), alors l'atténuation due à la propagation est considérable : le terme $20 \log_{10} (4\pi d/\lambda)$ vaut 196 à 210 dB suivant la fréquence utilisée.

 Il faut augmenter la puissance des émetteurs, le gain des antennes et la sensibilité des récepteurs par rapport aux liaisons terrestres

Communications par satellite : Particularités de la propagation

Exercice :

On considère un satellite géostationnaire avec une fréquence porteuse de 14 GHz. La distance terre-satellite est prise égale à 36 000 km.

Quelle est la perte en espace libre?

Communications par satellite : Particularités de la propagation

Le phénomène spécifique aux liaisons par satellites est la présence de l'ionosphère entre 70 et 1 000 km d'altitude. Cette couche est réfléchissante en dessous de 30 MHz (exploitée pour les ondes courtes).

Au-delà, elle est transparente, mais crée néanmoins des perturbations :

- distorsion de temps de propagation de groupe, donc de phase.**
- rotation de la polarisation, à cause du champ magnétique terrestre.**

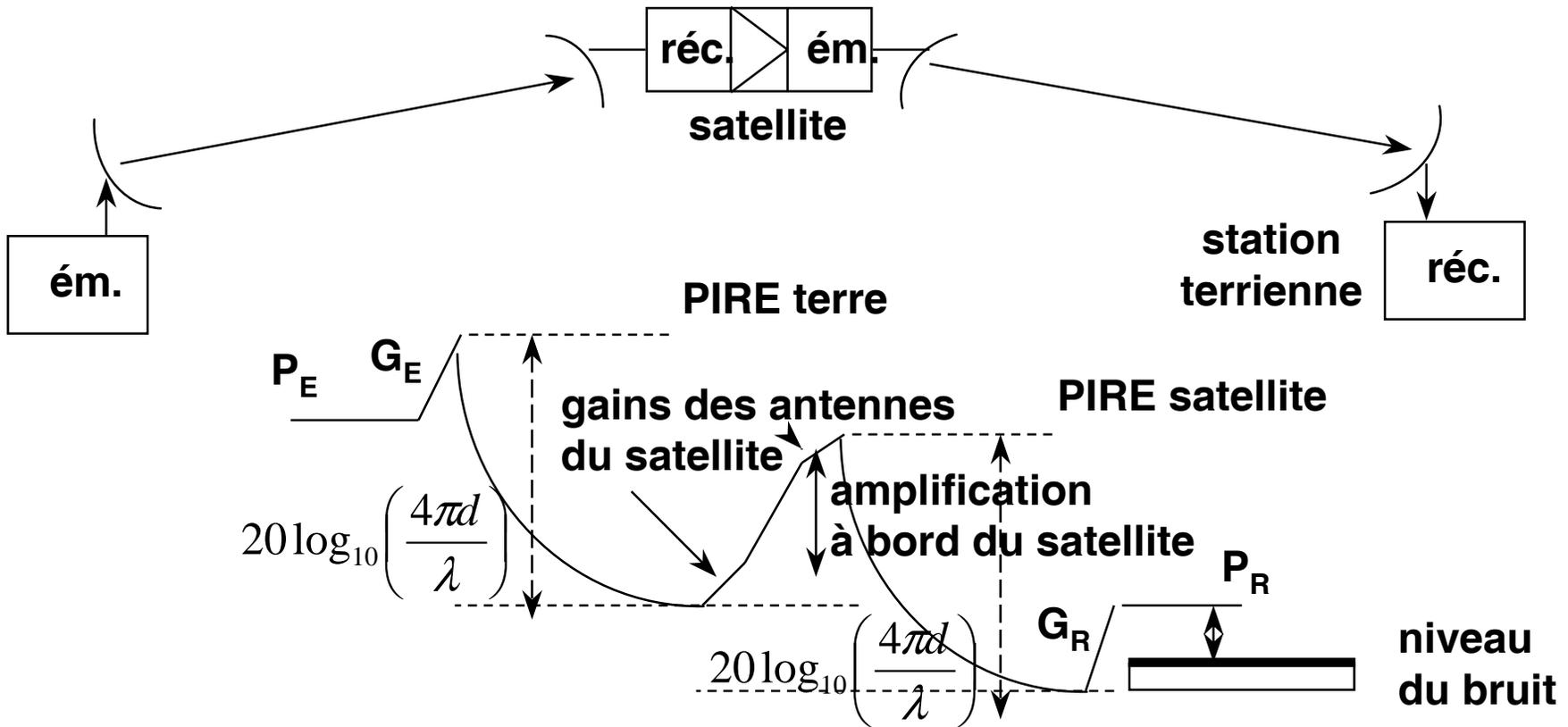
L'emploi de code correcteurs d'erreurs est fréquent sur les liaisons numériques par satellites, ainsi que les techniques numériques d'égalisation adaptative et d'annulation d'écho.

Bilan de liaison

Il se calcule comme pour les faisceaux hertziens terrestres, mais avec des ordres de grandeurs très différents.

- **l'émetteur de la station terrienne est de forte puissance (de l'ordre du kW) et l'antenne a un gain très élevé.**
- **le satellite reçoit un fort bruit de fond dû à l'émission thermique de la terre (facteur de mérite de l'ordre de 5dB/K)**
- **le récepteur équipé d'antenne de grand gain peut recevoir des signaux très faibles**

Bilan de liaison



Bilan de liaison

Les systèmes par satellites sont principalement limités par leur faible rapport porteuse à bruit.

- Transmission analogique (modulation de fréquence)**
- Transmission numérique (modulation de phase à 4 états)**

Rq : La modulation à spectre étalé commence à être utilisée pour les liaisons par satellite.

Bilan de liaison

La puissance reçue est $P_r = P_e G_e G_r A_{EL}$. Avec $N_0 = kT$,

$$\frac{P_r}{N_0} = \frac{P_e G_e A_{EL} G_r}{k T}$$

$\frac{G_r}{T}$ est le facteur de mérite du récepteur

Pour chaque type de modulation, il y a une valeur minimum du rapport E_b/N_0 pour pouvoir démoduler correctement.

Comme on a $P_r = E_b R_b$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{R_b} \frac{P_r}{N_0}$$

$$R_b = \frac{1}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\min}} \frac{P_e G_e A_{EL} G_r}{k T}$$

Effet Doppler

La vitesse de défilement v d'un satellite LEO est d'environ 7 km/s. L'écart de fréquence Δf qui résulte de cette vitesse est égal à v/c , où c est la vitesse de la lumière.

$$f_{\text{réelle}} = f_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right)$$

Pour $f_0 = 1,5$ GHz (GPS), $\Delta f = 35$ kHz. Cet écart de fréquence induit une rotation de la constellation de $2\pi\Delta f T_s$ où T_s est la durée d'un symbole.

Si l'on accepte une certaine dégradation du rapport E_b/N_0 , la modulation différentielle permet de compenser la rotation due à l'effet Doppler jusqu'à $\Delta f T_s = 10^{-2}$.

Antennes embarquées sur satellite

Les antennes sont de plusieurs types :

Des antennes cornet à faisceau large (17°) couvrant toute la terre et des antennes spot à réflecteur parabolique, plus directives, dont le faisceau est pointé vers un pays ou un groupe de pays. Les antennes à réseau permettent de donner à la zone couverte une forme plus complexe.

Antennes embarquées sur satellite

Largeur du faisceau ϕ d'une antenne à écran réflecteur parabololoïde est égale à :

$$\phi = \frac{70\lambda}{D}$$

avec λ la longueur d'onde émise
D le diamètre d'ouverture de l'antenne

Rq : Les dimensions de la zone de couverture sont inversement proportionnelles au diamètre de l'antenne

Ex : à 12 GHz, une antenne de 10 cm permet de couvrir la terre, elle doit avoir un diamètre de 1,20 m pour ne couvrir que la France

Antennes embarquées sur satellite

Exercice :

On considère une antenne parabolique de diamètre 60 cm.
Quelle est la valeur de l'ouverture à -3 dB de cette antenne pour une fréquence porteuse de 3 GHz?

Antennes embarquées sur satellite

Pour une antenne parabolique de diamètre D , le gain G est égal à :

$$G_{\text{lin}} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

$$G_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(G_{\text{lin}})$$

avec λ la longueur d'onde émise

D le diamètre d'ouverture de l'antenne

η l'efficacité, η égal à 50-60%

Antennes embarquées sur satellite

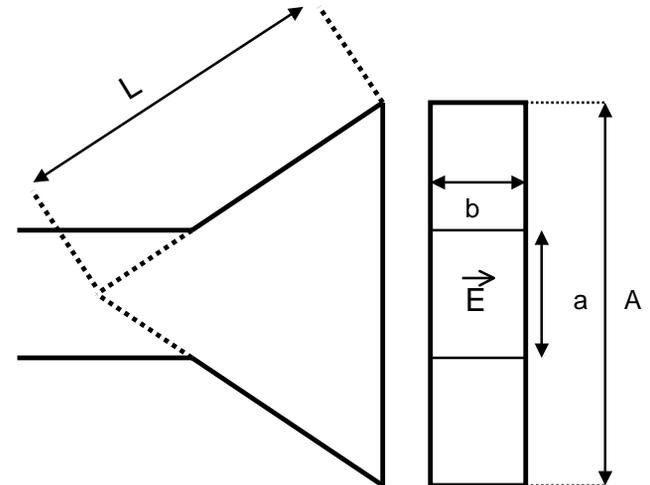
Pour une antenne cornet sectoriel H (faces parallèles perpendiculaires au champ électrique), λ étant la longueur d'onde émise le gain G est égal à :

$$G_H = \frac{4\pi Ab}{\lambda^2} F_H \frac{A}{\sqrt{\lambda L}}$$

Le gain est maximum pour $\frac{A}{\sqrt{\lambda L}} = \sqrt{3}$

On a alors $F_H = 0,63$.

$$G_H = 13,7 \frac{Ab}{\lambda^2}$$



Antennes embarquées sur satellite

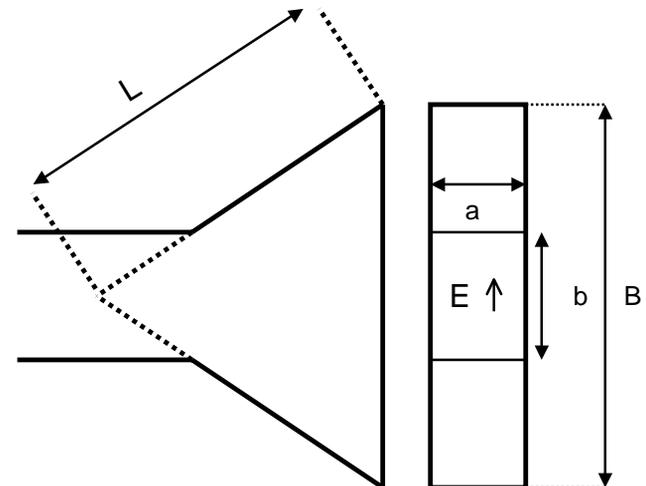
Pour une antenne cornet sectoral E (faces parallèles entre elles et au champ électrique), λ étant la longueur d'onde émise, le gain G est égal à :

$$G_E = \frac{4\pi a B}{\lambda^2} F_E \frac{B}{\sqrt{\lambda L}}$$

Le gain est maximum pour $\frac{B}{\sqrt{\lambda L}} = \sqrt{2}$

On a alors $F_E = 0,65$.

$$G_E = 11,5 \frac{aB}{\lambda^2}$$



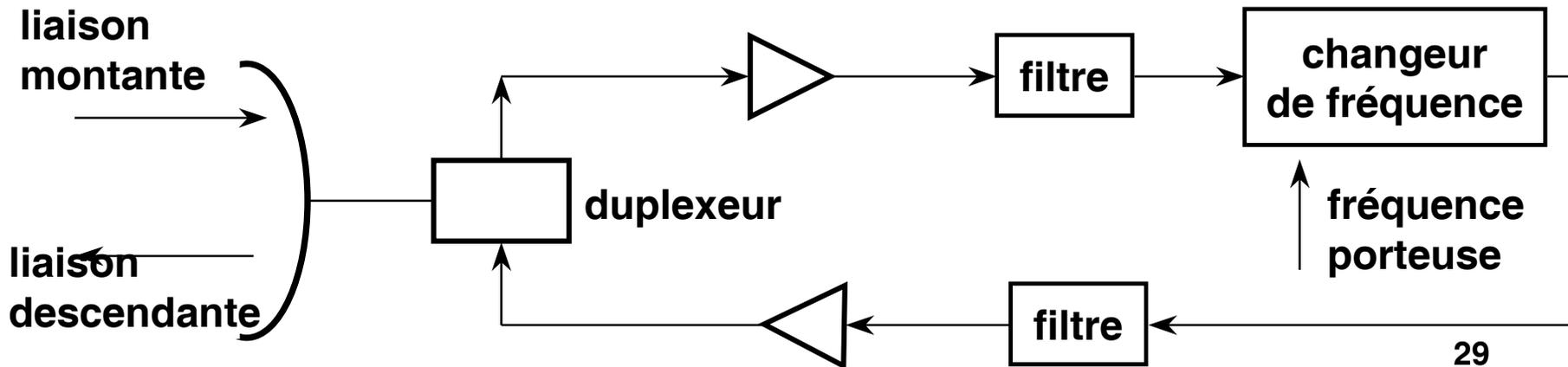
Antennes embarquées sur satellite

Afin de pouvoir modifier les missions à partir de la terre, des études sont actuellement faites pour développer des antennes actives (association d'éléments déphaseurs et amplificateurs en technologie intégrée monolithique (MMIC) à des antennes réalisées à partir de technologies compatibles avec l'intégration (antennes microruban de type "patch" par exemple)).

Les répéteurs

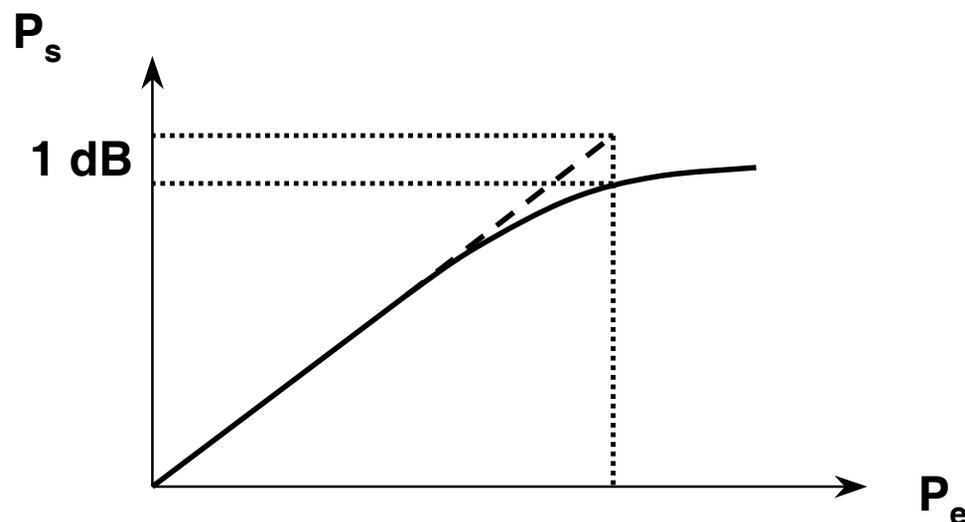
Répéteurs simples ou régénérateur

- amplification (RF ou FI)
- changement de fréquence : simple ou double
- commutation à bord (aiguillage de chaque paquet vers le destinataire final)

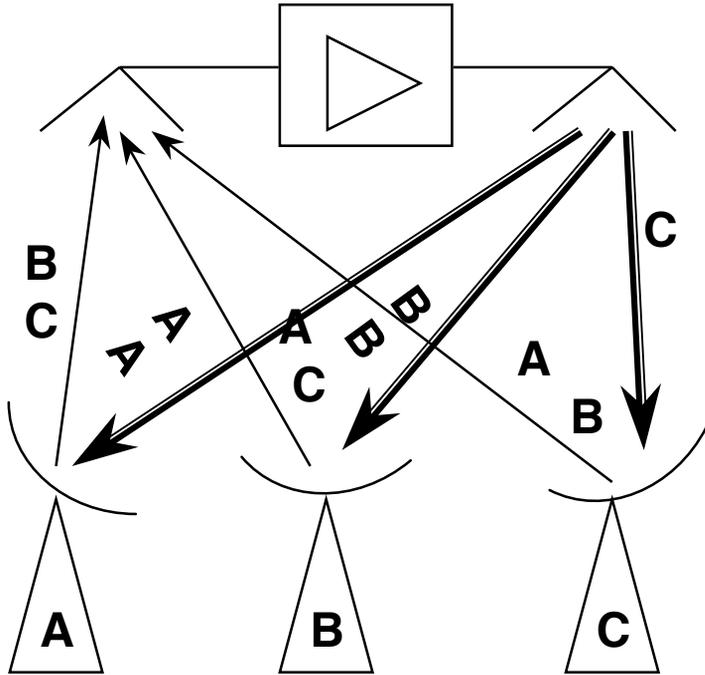
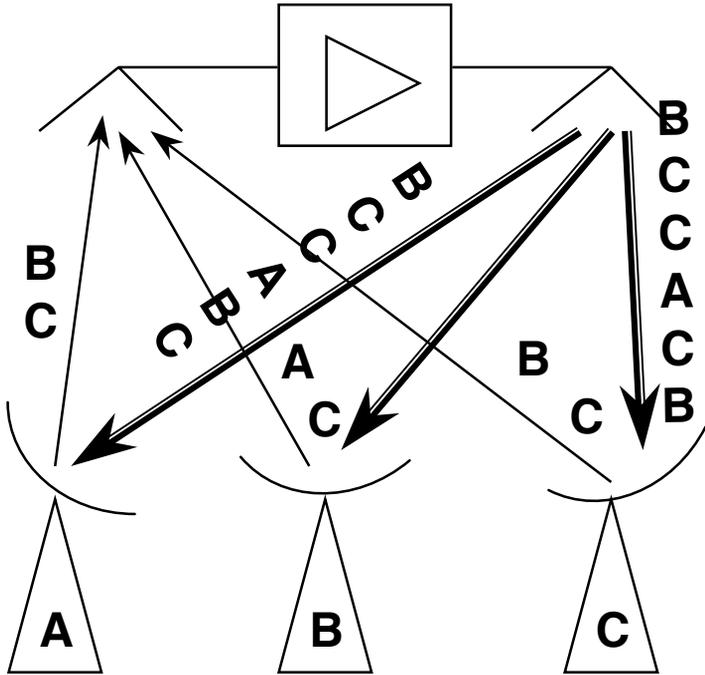


Les répéteurs

La non-linéarité des amplificateurs introduit de la distorsion harmonique dans le signal réémis. En prenant une marge IBO (Input Back-Off) et une marge OBO (Output Back-Off), fournies par les constructeur, il est possible de rester dans la partie linéaire. Cette marge correspond généralement au point de compression à 1 dB.



Les répéteurs



Communication par satellite

Antenne station terrienne (Emission/réception)

- extrémité du réseau national (gros débit/multi-destination)
 - à réflecteur parabolique : source primaire au foyer, Cassegrain
 - gain très grand $G = 60$ dBi (diamètre D : 13 m à 32 m)
- petite station (faible débit/temporaire ou non) : $D < 10$ m
- radiodiffusion (TV) : gain = 20 dB, $D < 1$ m

Communication par satellite

Exercice :

Soit un satellite géostationnaire avec une puissance émise de 100 W.

L'antenne d'émission a un gain de 17 dB.

L'antenne de réception de la station terrienne est une parabole de 3 m de diamètre avec une efficacité de 50 %. La fréquence porteuse est égale à 4 GHz. On supposera qu'il n'y a aucune perte atmosphérique à prendre en compte.

La température de bruit du récepteur est égale à 300 °K. Supposons que le rapport $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$ est égal à 10 dB.

Communication par satellite

- 1- Quelle est la PIRE de l'émetteur?**
- 2- Quel est le gain de l'antenne de réception de la station terrienne?**
- 3- Quelle est la perte en espace libre?**
- 4- Quelle est la puissance reçue à la station terrienne?**
- 5- Quelle est la densité de bruit?**
- 6- Quel sera le débit maximum exprimé en Mbit/s?**

Accès au satellite

Le problème posé : il s'agit d'assurer des liaisons simultanées entre plusieurs stations terriennes via un seul satellite.

Plusieurs techniques sont utilisées :

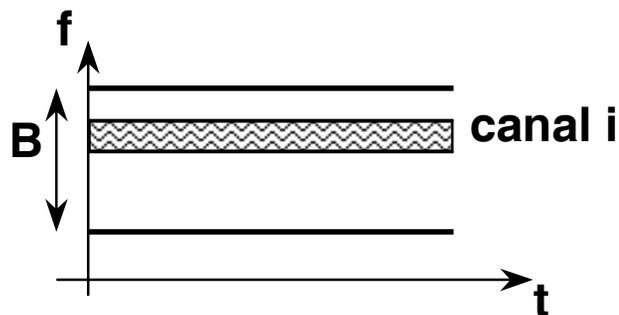
- Accès multiple par répartition de fréquence (AMRF/FDMA)**
- Accès multiple par répartition dans le temps (AMRT/TDMA)**
- Accès multiple par répartition codée (AMRC/CDMA)**

Le choix de la technique d'accès dépend essentiellement :

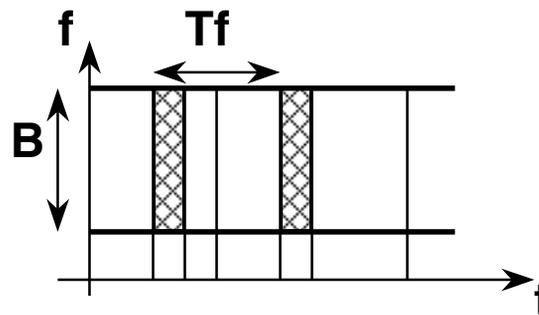
- de la quantité d'informations à transmettre**
- du nombre de stations à gérer**

Accès au satellite

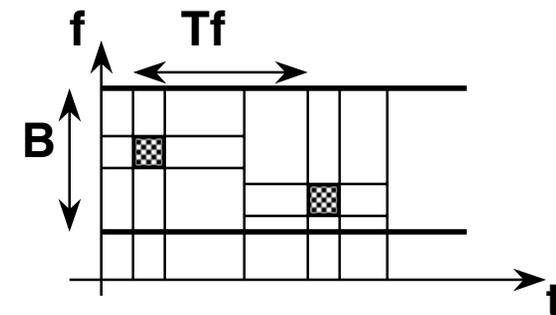
- Accès multiple AMRF, AMRT et AMRC
 - Liaisons bilatérales
 - Plusieurs stations vers le même satellite
 - Groupe de voies déjà multiplexées (n voies multiplexées en fréquence ou dans le temps)



AMRF



AMRT



AMRC

Accès au satellite

- **Accès AMRF**

- 1 porteuse émise par station terrienne
- Réémission satellite (après transposition) des n porteuses vers toutes les stations terriennes
- réception dans chaque station de toutes les porteuses :
démodulation et extraction des voies qui lui sont destinées

avantage : souplesse d'emploi

inconvénients : produits d'intermodulation

pertes de puissance si plusieurs porteuses sur un même canal

Accès au satellite

- **Accès AMRT**

- **information : impulsion analogique ou numérique**
- **émission (station i) sur toute la bande du répéteur pendant Δt_i et périodiquement**
- **synchronisation des N stations émettrices (station de référence)**
- **réception dans chaque station et tri des paquets**

avantage :

- **acheminer des quantités importantes de données**
- **satisfaire un grand nombre d'utilisateurs**

Accès au satellite

- **Accès AMRC**

- utilisation d'une ou plusieurs cellules «temps/fréquence»
- information : impulsion analogique ou numérique
- techniques : saut de fréquence
spectre étalé (porteuse unique)

avantage : très bonne insensibilité au brouillage

inconvénient : rendement faible

Principales fréquences utilisées dans les systèmes par satellite

Liaison	Montante	Descendante
Télémessure / Télécommande	2 GHz	2,2 GHz
Télécommunications	6 GHz 8 GHz 14 GHz	4 GHz 7 GHz 11 GHz
Nouveaux systèmes	30 GHz	20 GHz
Radiodiffusion / Télévision	10,7 à 11,7 GHz	11,7 à 12,7 GHz
Liaison avec les mobiles	1,6 GHz	1,5 GHz

Principaux organismes gérant des satellites

- France Télécom avec les satellites Telecom 2A et 2B
- Eumetsat (European Organisation for Exploitation of Meteorological Satellites) avec le satellite Météosat (16 pays)
- Eutelsat (European Telecommunication satellite) (34 pays d'Europe) France Télécom offre sur le satellite Euteltracs un service de messagerie unilatérale et des liaisons de données à 9600 bit/s
- Inmarsat (International maritime satellite) est un réseau de 6 satellites destinés à la communication avec les mobiles maritimes, aériens ou terrestre.
- Intelsat (International telecommunication satellite) gère 19 satellites et regroupe 164 pays.

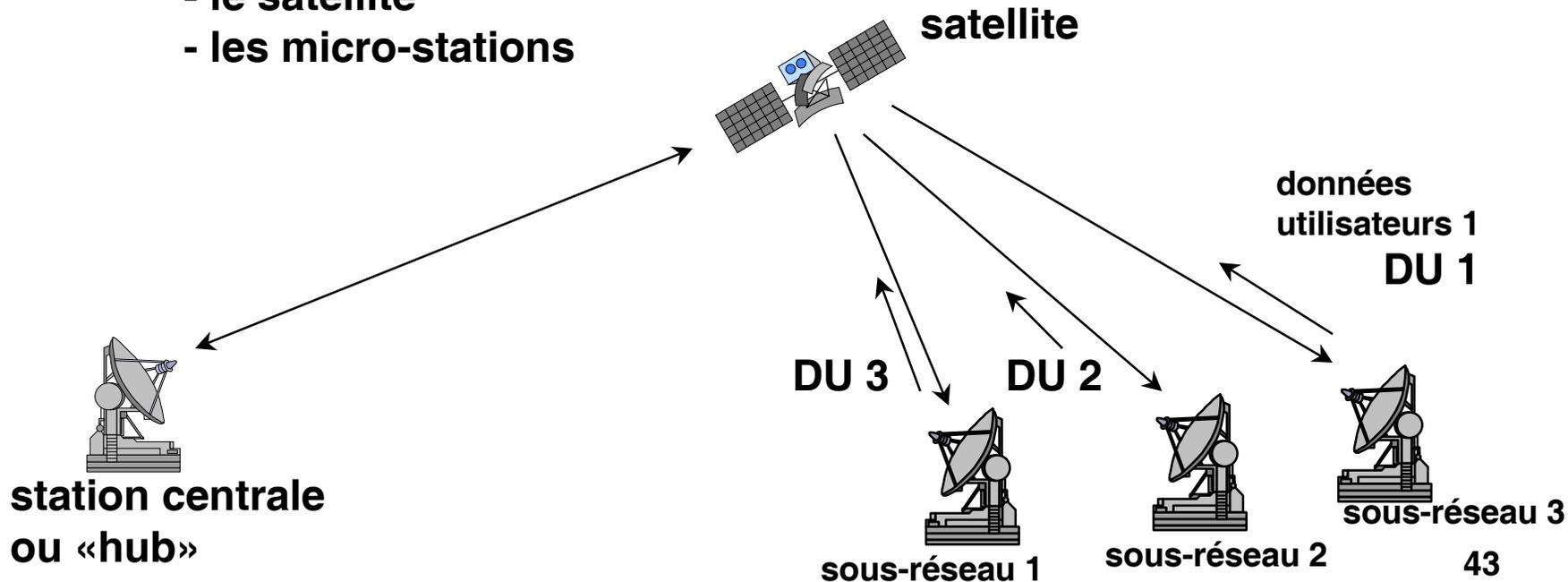
Exemple de satellite : Telecom II

Satellites Télécom II lancés en 1991 et 1992.

- 11 canaux, dans la bande des 12-14 GHz (bande Ku), diffusion d'émission de radio et de télévision, d'une puissance de 5 W, chaque canal ayant une bande passante de 36 MHz.
- 10 canaux, dans la bande 4-6 GHz (bande C) qui autorisent 9000 communications téléphoniques simultanées et 4 canaux de télévision vers les départements d'Outre-Mer, d'une puissance de 10 W, 4 canaux ont une bande passante de 90 MHz et 6 de 50 MHz
- 5 canaux de 20 à 40 W, dans la bande 7-8 GHz réservé au ministère de la défense.

Réseaux VSAT (Very Small Aperture Terminal)

- Utilisation du support satellite avec des antennes de faible diamètre
- Un réseau VSAT est composé de trois éléments :
 - la station principale ou «hub»
 - le satellite
 - les micro-stations



Réseaux VSAT

- **La station principale ou «hub»**
 - **Concentrateur d'informations destinées aux micro-stations**
 - **Elle communique avec un satellite via une liaison spatiale d'un opérateur public ou privé**
 - **Elle assure le contrôle du réseau et la coordination des transmissions**
- **Le satellite**
 - **Situé le plus souvent sur une orbite géostationnaire**
 - **Il communique par 2 liaisons distinctes avec les micro-stations et le hub.**
- **Les micro-stations**
 - **antennes paraboliques de 1,2 à 3,7m de diamètre.**

Réseaux VSAT

Caractéristiques des VSAT	Bande C	Bande Ku
Diamètre de l'antenne Fréquences d'émission Fréquences de réception Puissance d'émission	1,8 à 2,4 m 5,85 à 6,425 GHz 3,625 à 4,2 GHz 30W	1,2 à 1,8 m 14 à 14,5 GHz 10,7 à 12,75 GHz 1W
Avantages	Couverture mondiale possible Atténuations dues à la pluie plus faibles	Meilleure exploitation du satellite Technologie moins coûteuse Antennes plus réduites
Inconvénients	Antennes de réception de grande taille (1 à 3m) Perturbations possibles par les équipements terrestres ou satellites utilisant la même bande	Couverture régionale Terminaux plus coûteux Perturbations possibles dues à la pluie

Bibliographie

- Hikmet Sari, Techniques de l'Ingénieur, Transmission des signaux numériques.
- " Les faisceaux hertziens analogiques et numériques " E. Fernandez et M. Mathieu, Ed. Dunod
- M. Terré, Systèmes de Communications, Satellites, v2.1
<http://www.ico.com/>
<http://www.geolink.fr/>