



LE SATELLITE ALGÉRIEN DE TÉLÉCOMMUNICATIONS ALCOMSAT-1

Cours

Télécommunication spatiale

Pr. D. BENATIA

- 1. Principe de transmission par satellites**
- 2. Les liaisons ascendante et descendante et stations terriennes**
- 3. Orbites terrestres**
- 4. Constellations de satellites**
- 5. Bandes allouées**
- 6. Etude du bilan de la liaison spatiale**

1. PRINCIPE DE TRANSMISSION PAR SATELLITES

La transmission par satellites se divise en deux parties :

- Une base d'émission (station de transmission) : liaison ascendante (Emetteur-satellite)
- Une base de réception (station de réception) : liaison descendante (Satellite- recepteur)

1.1 LE SATELLITE

On distingue deux types de satellites, les satellites actifs et les satellites passifs.

1.1.1 Les satellites passifs

Ils servent de réflecteur, ils n'agissent pas sur le signal à transmettre. Le signal est réfléchi par le satellite dans toutes les directions et peut donc être reçu n'importe où dans le monde. La capacité de ces satellites est très restreinte car elle nécessite des émetteurs puissants et de grandes antennes au sol. Les premiers satellites de communication étaient des satellites passifs.

1.1.2 Les satellites actifs

Ce sont les satellites les plus utilisés aujourd'hui. Tout d'abord ils reçoivent le signal émis par l'antenne. Ensuite ils amplifient, filtrent, changent de fréquence (pour éviter les interférences) du signal pour le retransmettre dans une zone précise du globe.

1.2 UTILISATION DES SATELLITES DE COMMUNICATION

Les satellites de communications sont utilisés dans cinq configurations de base :

- Les communications publiques
- Les communications d'entreprises
- Les communications mobiles
- Les communications de remplacement
- Les communications militaires

1.2.1 Les communications publiques

a)- Le satellite relie les réseaux téléphoniques de deux continents, de deux îles ou de deux régions très éloignées dans un pays vaste et peu dense (Canada, Australie, Russie, ...) (Fig. I.1).

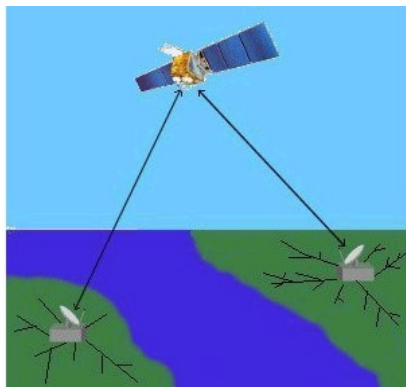


Fig. I.1 : Transmission par satellite

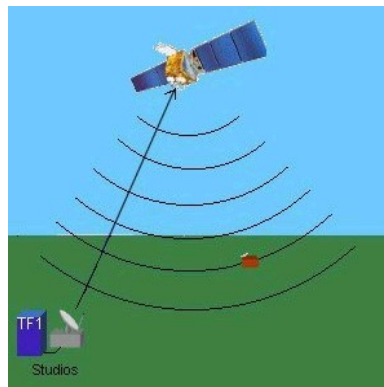


Fig. I.2 : Transmission par satellite
à partir d'un studios

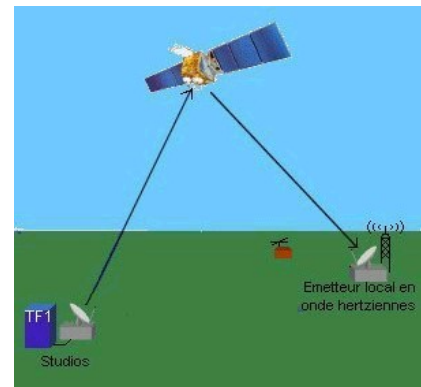


Fig. I.3 : Transmission par satellite en
mode diffusion

b)- Un satellite très puissant reçoit des programmes télévisés de studios au sol et les ré-émet sur une large région, pour les particuliers équipés d'une antenne parabolique. Ce procédé permet une transmission numérique, avec une qualité d'image bien meilleure, et l'accès à une palette de chaînes bien plus large (Fig. I.2).

c)- Le satellite transmet les programmes télévisés des studios de la chaîne à l'émetteur local, qui les renvoie par ondes hertziennes à destination des particuliers de la région. La plupart des programmes hertziens passent ainsi par satellite. Cela est particulièrement intéressant pour les pays étendus ou quand des obstacles empêchent la diffusion directe (Fig. I.3).

1.2.2 Les communications d'entreprises

Dans ce type d'application, une station maîtresse alimente via le satellite une série de stations en général de taille moins importante ou micro-stations, formant un réseau hiérarchisé. Les micro-stations réceptrices peuvent être disséminées sur des territoires relativement importants, les Etats-Unis par exemple.

1.2.3 Les communications mobiles

Les satellites sont à ce jour le seul moyen de fournir des services de télécommunication aux navires. Ils peuvent également être utilisés pour les communications avec des mobiles aériens et terrestres, camion dans un premier temps, voiture. En plus des communications mobiles, les satellites peuvent jouer un rôle important dans la localisation des mobiles tant terrestres que maritimes ou même aéronautiques.

1.2.4 Les communications de remplacement

Une partie des capacités de transmission d'un satellite peut être affectée à des moyens de communications de remplacement nécessaire à la suite de catastrophe (tremblement de terre par exemple), mais aussi à la suite de pannes des réseaux terrestres. Cet usage nécessite des stations terrestres mobiles et des capacités de transmission en réserve ou faisant l'objet de droit de reprise sur un satellite.

1.2.5 Les communications militaires

Les armées ont été les premiers gros utilisateurs de satellites de télécommunications. En Europe, seul la Grande-Bretagne a mis en œuvre des satellites réservés aux militaires. En France, elles ont été mises en œuvre que sur un satellite mixte: Civil/militaire: télécom 1 et 2. C'est la mission Syranuse qui couvre un tiers de la surface du globe. Mais c'est surtout aux Etats-Unis que sont apparus les systèmes performants occupants depuis des décennies deux armées : l'US army et l'US Air force.

2. LES LIAISONS ASCENDANTE ET DESCENDANTE

Un système de transmission d'information par satellite est composé des éléments suivants :

- La station terrienne d'émission ;
- Lien montant ;
- La station spatiale (satellite) ;
- Le lien descendant.

La figure (II.1) illustre les différentes composantes d'un système de télécommunication par satellite :

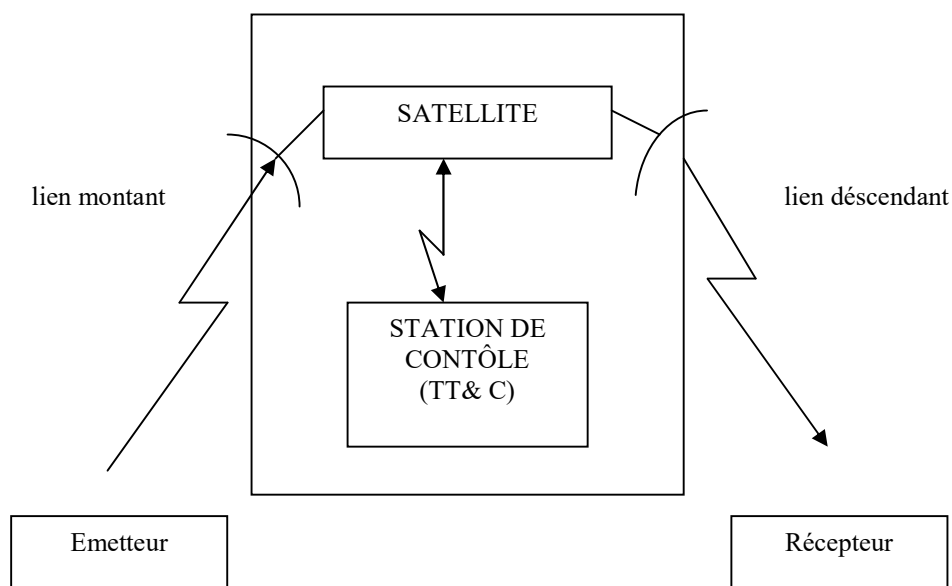


Fig. II.1 : Composantes d'un système de télécommunication par satellite

2.1 Station terrienne d'émission

Elle comprend le centre où sont élaborés les signaux d'informations à transmettre c'est-à-dire les signaux vidéo et audio pour la télévision ou d'autres signaux comme les signaux téléphoniques ou les données pour les communications professionnelles, les signaux sont transmis par câble, fibre optique ou relais hertzien à la station d'émission proprement dite où se trouve la liaison montante qui comprend l'émetteur.

2.1.1 Lien montant

L'élément principal à l'intérieur de la section du lien montant d'un système satellitaire est l'émetteur de la station terrestre.

2.1.2 Station spatiale

Elle comporte le satellite et l'ensemble des moyens de contrôle situés au sol c'est-à-dire l'ensemble des stations de poursuite, de télémétrie et de télécommande (TT&C : tracking, telemetry and command) ainsi que le centre de contrôle du satellite où sont décidées toutes les opérations liées au maintien à poste et vérifier les fonctions vitales du satellite.

- **Le satellite :**

Le satellite est naturellement la partie essentielle d'un système de communication par satellite. Au début des années 60, époque à laquelle diverses possibilités de télécommunications spatiales étaient expérimentées, le satellite n'était qu'un objet purement passif, une grande sphère réfléchissante se déplaçant dans le ciel dont la seule fonction était de réfléchir l'énergie reçue, mais les résultats médiocres obtenus ont entraîné l'abandon d'un tel système.

Le satellite maintenant est de type actif, il se comporte comme un véritable retransmetteur vers la terre (liaison descendante) après translation de fréquence et amplification .

- **Constitution du satellite :**

Le satellite est constitué d'une charge utile et d'une plate-forme, la charge utile comporte les antennes de réception et d'émission, et l'ensemble des équipements électriques assurant la transmission des signaux. La plate-forme comporte l'ensemble des sous-systèmes permettant à la charge utile de fonctionner. On y trouve :

1. La structure ;
2. L'alimentation électrique ;
3. Le contrôle thermique ;
4. Le contrôle d'altitude et d'orbite ;
5. Les équipements de propulsion ;
6. Les équipements de poursuite, de télémétrie et de télécommande (TT&C).

La charge utile d'un satellite comporte un ensemble de canaux (transpondeurs), chaque canal étant équipé d'un amplificateur d'émission opérant dans une sous-bande particulière de la bande allouée au satellite. Cette disposition de canaux permet d'offrir, dans chaque canal, une puissance en rapport avec l'état de développement technologique des amplificateurs micro-ondes embarqués, alors que la mise en œuvre d'un seul amplificateur pour l'ensemble de la bande conduisait à une dispersion de la puissance de cet amplificateur.

2.1.3 Lien descendant

L'élément principal à l'intérieur de la section du lien descendant d'un système satellitaire est le transmetteur à bord du satellite.

Le transmetteur du satellite est constitué par les étages finaux qui ont classiquement pour objet l'amplification en puissance du signal radiofréquence RF niveau bas et la transmission.

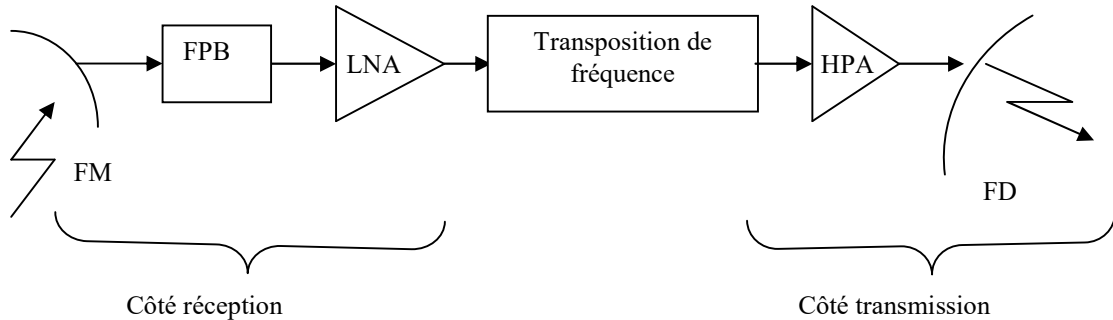


Fig. II.2 : Schéma bloc d'un transpondeur de satellite

Avec :

LNA : amplificateur d'entrée à faible bruit ;

FPB : filtre d'entrée passe-bande ;

HPA : amplificateur à haute puissance.

3. ORBITES

3.1 Orbites elliptiques

La quasi-totalité des satellites, qu'ils soient à usage d'observation ou de télécommunication, ont des orbites (Fig. III.1), c'est à dire des trajectoires spécifiques à un corps animé d'un mouvement périodique, propres à leur utilisation. On peut ainsi distinguer trois types d'orbites différentes : les orbites elliptiques, les orbites circulaires et l'orbite géostationnaire, chacune ayant des caractéristiques différentes des autres.

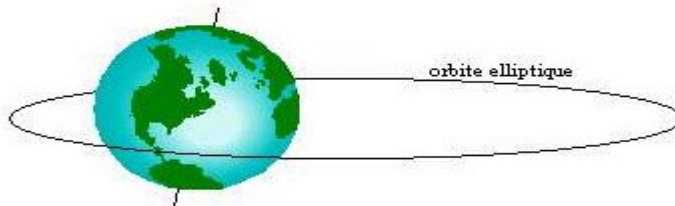


Fig.III.1 : Trajectoire

Comme son nom l'indique, un satellite placé dans une orbite de ce type décrit une trajectoire en forme d'ellipse autour de la terre. Afin de placer un satellite en orbite elliptique, la vitesse de lancement dans l'espace doit, d'après Newton et ses théories sur la gravitation, être supérieur à 7900 m/s. La principale caractéristique de ce type d'orbite est la grande variation en vitesse que subissent les satellites..

Un cas particulier intéressant est l'orbite elliptique inclinée sur l'équateur à environ 64° et ayant une période égale à la moitié de la période de rotation de la terre. L'axe de l'ellipse et l'orbite ne tournent pas autour du centre de la terre et l'apogée se situe donc toujours au-dessus du même lieu géographique. Le système " Molnya " utilisé par l'URSS, est un système de ce type, 3 satellites couvrent totalement la Sibérie car leur partie lente(apogée) correspondent au deux tiers de leur période et ils se situent alors à la verticale du territoire sibérien.

Les orbites elliptiques présentent des avantages, comme la couverture des zones éloignées de l'équateur, mais également des inconvénients tels que les aspects qualitatif et financier des équipements mobiles sur Terre. Cependant il existe des orbites où ce type d'inconvénients n'apparaît presque pas : ce sont les orbites circulaires.

3.2 Orbites circulaires

Il existe une infinité d'orbites circulaires, chacune correspondant à une inclinaison par rapport au plan orbital, mais on peut en distinguer 3 sortes : l'orbite circulaire polaire et les orbites circulaires inclinées.

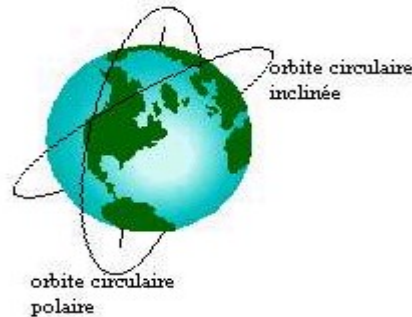


Fig. III.2 Orbites

L'orbite polaire est une orbite circulaire qui passe par-dessus les deux pôles de la Terre. L'inconvénient principal, pour les satellites inscrits dans ce type de trajectoire, est la lenteur de leur couverture mais cette faible vitesse permet tout de même au satellite de couvrir une grande partie de la surface du globe, voire la totalité de la terre, compte tenu de la rotation de la terre sur elle-même. On peut citer l'exemple des satellites d'observation français "Spot", situés à 800 km d'altitude, qui assurent la couverture de la surface totale du globe en 21 jours, ou encore un système américain constitué de 12 satellites et ayant une utilisation dans la messagerie.

Les orbites circulaires inclinées décrivent également un cercle autour de la Terre, mais chaque trajectoire est inclinée d'un certain angle par rapport au plan équatorial. De plus il est nécessaire d'imposer au satellite une vitesse de lancement d'environ 7900 m/s. Cependant, cette inclinaison présente un inconvénient majeur : étant donné que la plus haute latitude desservie par les satellites, dont les orbites sont inclinées, correspond à la déviation angulaire par rapport au plan de l'équateur, ces satellites ne peuvent pas couvrir la totalité de la surface du globe. Par contre, cette orbite possède un avantage : selon l'altitude du satellite, il est possible de cibler les zones du globe, c'est à dire que l'on peut desservir les parties intéressantes d'un point de vue économique, militaire ou autres applications...

Par exemple, le projet français "Globalstar" prévoit de lancer 48 satellites en orbite circulaire inclinée à 50° par rapport à l'équateur, afin d'assurer des communications mobiles dans la plupart des pays.

Ces deux types de trajectoires ont chacun des caractéristiques différentes, des usages propres suivant les inconvénients et les avantages. Néanmoins ils ne sont que très peu utilisés par

rapport à une autre orbite circulaire : l'orbite géostationnaire, qui possède actuellement le plus d'avantages aussi bien économiques que pratiques.

3.3 Orbite géostationnaire

L'orbite géostationnaire fait partie des orbites géosynchrones, ces orbites sont circulaire et ont une période égale à celle de la rotation de la terre L'orbite géostationnaire a comme particularité de tourner dans le même sens que celui de la terre et de posséder orbite placée dans le plan équatorial (Fig. III. 3)

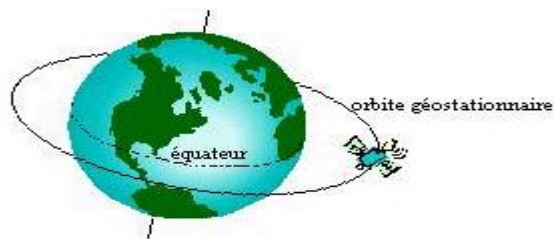


Fig. III.3 : Orbite géostationnaire

Ce nom vient de la caractéristique la plus importante de cette orbite : pour un observateur terrestre, un satellite placée en orbite géostationnaire a une apparence immobile dans le ciel. Cela vient en grande partie du fait que la période de révolution, c'est à dire le temps que met le satellite pour parcourir le périmètre du cercle représentatif de sa trajectoire, est exactement la même que celle de la Terre, soit exactement 23 heures 56 minutes 4 secondes. Mais le fait qu'il tourne dans le même sens que notre planète en est également une cause. De plus la troisième loi de Kepler permet aisément de déterminer l'altitude d'un satellite en orbite géostationnaire.

Cette orbite est la plus utilisée actuellement car la qualité des signaux est équivalente, voire supérieure à celle des autres orbites, mais il est beaucoup plus rentable d'utiliser ce type de satellite dans la mesure où l'avantage majeur est la possibilité d'employer sur Terre des antennes fixes. De plus, la position de cette trajectoire permet aux satellites d'avoir une grande couverture qui vaut à peu près un hémisphère, environ 40% de la surface de la terre. Un seul satellite permet de relier des stations d'on l'éloignement peut atteindre 17000 Km. Avec trois satellites géostationnaires on peut assurer une couverture globale de la terre, en excluant les régions polaires.

Par contre, son altitude élevée entraîne quelques inconvénients. En effet, plus les zones à couvrir sont éloignées de l'Equateur, plus le signal mettra de temps pour arriver, et plus il y aura d'interférences. Il y a également un autre problème qui se dessine déjà pour cette orbite : le nombre de satellites en orbite géostationnaire devenant de plus en plus grand au fil des années, cette trajectoire commence à être très chargée. Les scientifiques prévoient aussi un danger pour les

satellites en état de marche car les satellites dits " poubelles " qui n'ont plus d'énergie pour être opérationnels dérivent sans contrôler leur vitesse et peuvent alors détériorer les autres.

Tous les satellites en activité dans l'espace sont actuellement dans une de ces trois catégories d'orbites : Les orbites elliptiques, les orbites circulaires et l'orbite géostationnaire. Chacune de ces trois trajectoires possède des caractéristiques différentes et propres à des applications particulières. Cependant toutes ces utilisations nécessitent obligatoirement des équipements techniques aussi bien sur Terre que sur le satellite afin d'assurer les communications entre la Terre et les satellites.

On peut également distinguer sous un autre raisonnement :

1/- Orbites hautes (HEO) : (High Earth-Orbit)

Ce sont des orbites elliptique d'altitude d'environ 500Km et d'une apogée à une altitude d'environ 50000 Km ces orbites ont une inclinaison de $63^{\circ}.4$ afin de pouvoir communiquer avec des zones de l'hémisphère nord

2/- Orbites géostationnaires (GEO) : (Géostationnaire –Earth- Orbit)

Les orbites géostationnaires ont une orbite circulaire de 42164 Km de rayon dans un plans voisin de l'équateur et leur vitesse angulaire est égale a celle de la rotation de la terre.

3/- Orbites moyennes (MEO): (Medium Earth-Orbit)

Les orbites moyennes ont une altitude environ 10000Km et une inclinaison d'environ de 50° , la période de révolution de ces satellites est de 6H, et avec une constellation de 10 à 15 satellites pour assurer une couverture globale de la terre.

4/- Orbites basses (LEO) (Low Earth -Orbit)

Ce sont des orbites qui se situent a une altitude comprise entre quelques centaines de kilomètres et 2000 Km de la surface de la terre avec un délai de propagation du signal est de l'ordre des 10 à 20ms

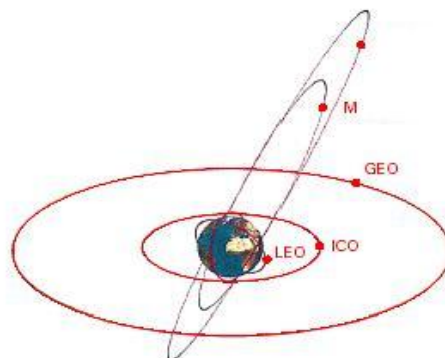


Fig. III.4 : Différents types d'orbites

4. CONSTELLATIONS DE SATELLITES

Les constellations sont constituées de satellites en basse et moyennes orbites dont l'altitude est environ 400 Km à 10.000 Km. A cette altitude, la taille des antennes est réduite d'un facteur de 20 par rapport à celle des satellites géostationnaires.

La difficulté majeure de ces constellations vient de la vitesse très importante des satellites par rapport à l'utilisateur terrestre : 7 Km/s (pour LEO). Il faut adopter des antennes directives qui peuvent changer leur orientation et traiter efficacement les problèmes de basculement entre satellites dont la période est une dizaine de minutes.

4.1 Caractéristique des différentes constellations

Caractéristiques	ICO	Global star	Iridium	Skybridge	Tele desic
Type d'orbite	MEO	LEO	LEO	LEO	LEO
Altitude...(Km)	10390	1414	780	1469	1375
Nbre. de satellites actifs	10	48	66	80	288
Période orbitale(min)	360	114	100	115	-
Basculement	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Couverture	70°latitude	Globale	Globale	Globale	Globale
Bandes de fréquences	S et C	L,S et C	L et Ka	Ku	Ka
Traitement à bord	Non	-	Oui	Non	Oui
Puissance(W)	2500	1000	1400	3500	-
Masse....(Kg)	1925	450	700	1250	700

On distingue deux types de constellations : les constellations polaires et les constellation inclinées.

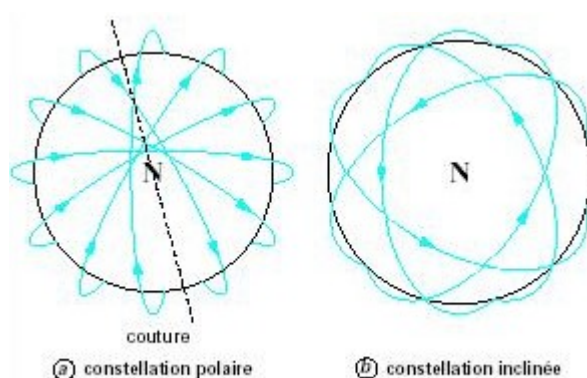


Fig. IV.1 Constellation de satellites

4.2 Constellations polaires

Ce sont celles dont le plan orbital fait un angle de 90° avec l'équateur ; l'intersection des plans orbitaux se faisant aux pôles. Les orbites polaires assurent une couverture importante des zones polaires, qui sont malheureusement des zones désertiques ne comptant pas beaucoup d'utilisateur

Exemple :

L'IRIDIUM est une constellation presque polaire l'angle d'inclinaison avec l'équateur est de $84,4^\circ$ la figure (IV.2) montre la répartition des satellites sur chacune des orbites et l'intersection des orbites au pôle.

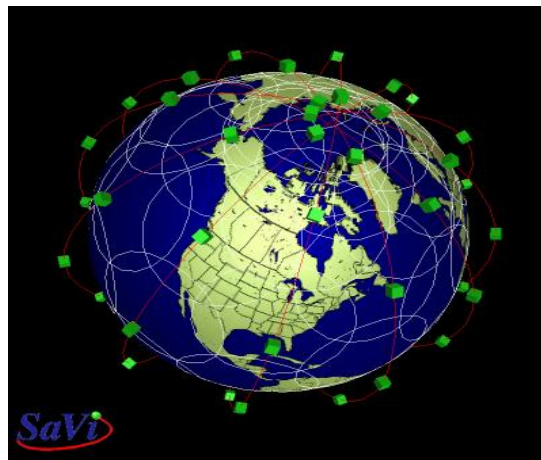


Fig. IV.2 Constellation de satellites

4.3 Constellations inclinées

Ce sont des constellations dont les plans orbitaux font un angle avec le plan équatorial très différents de 90° bénéficiant d'une meilleure répartition des satellites autour de la terre.

Exemple :

La constellation Globalstar dont les orbites ont une inclinaison de 52° .

Cette constellation tout autour de la terre (Fig. IV.2)

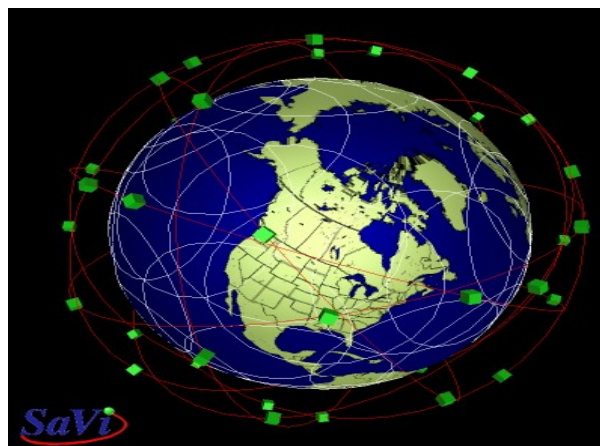


Fig. IV.3 Constellation inclinée

5. LES BANDES ALLOUEES

Le faisceau émis peut avoir une forme assez compliquée car il doit répondre à des spécifications précises des clients ou imposées par des règlements internationaux. En faisant attention que le faisceau ne déborde pas sur les pays voisins mais qu'il entoure le pays vers lequel il est orienté, en évitant de rayonner sur les océans ou l'énergie serait perdue inutilement.

Les répéteurs se différencient entre eux par leur puissance, leur nombre de canaux, leur fréquence d'émissions et de réceptions et leurs bandes passantes.

Les fréquences sont définies par des bandes attribuées en fonction des services fournis. Avec l'augmentation continue du nombre de systèmes, le problème de la détermination des fréquences devient aujourd'hui crucial.

Les principales bandes utilisées (fréquence de montée/fréquence de descente) sont actuellement les suivantes :

* **La bande L** : (1-2 GHz), de 80 MHz de largeur, réservée aux communications mobiles. Constituant la bande de fréquences la moins sujette aux perturbations atmosphériques, elle est utilisée par de petites stations terrestres mobiles (bateaux, véhicules terrestres et avions). Etant donné le nombre de projets en cours de téléphonie mobile, elle risque de devenir rapidement insuffisante. (Ex : Inmarsat)

* **La bande S** : (2-4 GHz) Utilisée pour certains canaux de télévision (Arabsat) et pour la communication (Météosat).

* **La bande C** : (4-8 GHz), d'une largeur de 500 MHz, très utilisée par les centaines de satellites actifs aujourd'hui en orbite. Elle est maintenant saturée. Son principal utilisateur est Intelsat.

* **La bande X** : (8-12.5 GHz), réservée aux applications militaires.

* **La bande Ku** : (12.5-18 GHz), également beaucoup utilisée, principalement par de grandes stations terrestres fixes.

* **La bande Ka** : (26.5-40 GHz), qui demeure la seule encore vacante. Mais l'utilisation de fréquences élevées induit un coût technologique important, ces derniers étant de plus en plus sensibles aux perturbations atmosphériques.

6. ETUDE DU BILAN DE LA LIAISON SPATIALE

Le calcul du bilan énergétique d'une liaison nous permet de déterminer la qualité du canal de transmission. En effet, ce calcul permet lors de la conception d'un système de définir les caractéristiques optimales de celui-ci en fonction des objectifs de la qualité désirée.

Autrement dit, le bilan de liaison consiste à comptabiliser l'ensemble des pertes et des gains le long du trajet de la porteuse radioélectrique de la station terrienne d'émission à la station terrienne de réception passant par la station spatiale.

6.1 Secteur terrien

Un système complet de télécommunications par satellites comporte en outre, un certain nombre d'équipements au sol, qui ont une technologie similaire aux équipements embarqués sur les satellites.

D'autre part, il est doté de stations d'émission qui assurent les liaisons montantes vers le satellite, et de stations de réception qui établissent les liaisons descendantes. A ces équipements, il faut ajouter les fonctions de modulation et de démodulation réalisées par un modem. Le modulateur transforme l'information de base à transmettre en un signal modulé. Plusieurs types de modulation sont employés à l'heure actuelle. Le démodulateur remet sous forme initiale l'information reçue par la station afin qu'elle soit exploitable.

Les stations terrestres peuvent être de diverses échelles. Les grandes stations, dont les antennes paraboliques peuvent avoir jusqu'à 30 m de diamètre, permettent de collecter les communications d'une zone à un niveau international. Très onéreuses, elles sont réservées aux grands opérateurs : on en dénombre actuellement plus de 150 dans le monde. On développe maintenant des stations plus légères, les VSAT (cf la technologie VSAT), qui sont dotées d'antennes paraboliques d'un mètre de diamètre. Accessibles à des entreprises et des particuliers en raison de leur coût relativement modeste, ces stations peuvent être installées en une demi-journée.

6.2 Secteur spatial

Un satellite de télécommunications est une sorte de relais hertzien placé en orbite autour de la terre. Des fréquences de longueurs d'ondes centimétriques sont utilisées pour acheminer les signaux. Son rôle est de palier à l'affaiblissement du signal qu'il reçoit, de le régénérer pour le transmettre amplifiés en fréquence vers la station terrienne réceptrice.

Il ne s'occupe pas de la compréhension des données qu'il reçoit et qu'il doit retransmettre. Il ne fait que les régénérer pour permettre à la station terrienne de les recevoir convenablement :

6.3 Rapport signal sur bruit

En anglais, Carrier to Noise ratio (C/N). S'exprime en décibels. On divise la valeur relative au signal d'origine par le bruit, qui est le signal non utile, composé de parasites provoqués par des perturbations externes ou les circuits électroniques. On obtient une valeur relative à l'élimination des résidus indésirables, généralement exprimée en dB. Plus la valeur du S/B ou C/N est élevée, plus le bruit est faible et plus la qualité de restitution est meilleur. En réception, il dépend de la puissance d'émission du satellite, mais aussi des caractéristiques de la réception : facteur de bruit du LNB (Low Noise Bloc), gain de l'antenne, seuil de sensibilité du tuner. Le C/N est un rapport logarithmique exprimé en décibels qui se calcule avec la formule suivante :

Le rapport signal /bruit (dB) = puissance du signal reçu (dBw) - puissance du bruit (dBw)

6.3.1 Puissance du signal reçu

Cette valeur caractérise le signal à l'entrée de l'équipement de réception.

Puissance du signal reçu (dBw) = PIRE de l'émetteur (dBw)

- Atténuation du signal dans le vide A0(dB)
- Absorption atmosphérique(dB)
- + Gain de l'antenne de réception(dBi)
- Pertes dans le guide d'onde de réception(dB)

6.3.1.1 PIRE de l'émetteur

a) Liaison montante

La PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) est la puissance de sortie de l'émetteur dans une direction donnée, elle est donnée par :

PIRE(dBw)= puissance de transmission (dBw)- Pertes du guide d'onde d'émission(dB)
+Gain de l'antenne d'émission(dBi)

a.1) Pertes du guide d'onde :

Valeurs typiques pour quelques câbles coaxiaux courants :

- RG 58 (très courant, utilisé pour les réseaux Ethernet par exemple): 1 dB par mètre.
- RG 213 (le gros noir, très courant): 0.6 dB par mètre.
- RG 174 (très fin, vraisemblablement celui qui est utilisé pour les câbles adaptateurs orinocco- fiche N): 0.9 dB par mètre.
- Aircom (en vente chez Conrad à 5.-/m): 0.21 dB par mètre.
- Aircell (en vente chez Conrad à 3.-/m):0.38 dB par mètre.
- LMR-400: 0.22 dB/m par mètre.

a.2) Gain de l'antenne :

Le gain d'une antenne est le rapport entre la puissance émise par une antenne dans une direction donnée et la puissance qu'émettrait une antenne omnidirectionnelle sans perte.

Le gain s'exprime en décibels (dB).

Le gain d'une antenne (*exprimé en dB*) peut également se calculer selon la formule suivante:

$$\text{Gain} = 10 \log [r (p D / \lambda)^2] \quad (\text{III.1})$$

En utilisant les paramètres suivants:

r = Rendement de l'antenne (exprimé en %), il est donné pour la fréquence centrale. Le rendement (appelé aussi efficacité) dépend principalement de la qualité de fabrication de la parabole. Certains modèles frisent les 60% de rendement alors que quelques autres flirtent vers les 70%. On considère une bonne antenne bande Ku avec un rendement de 65%.

D = Diamètre de l'antenne (*exprimé en mètres*).

λ = Longueur d'onde (*exprimé en m*) . $\lambda = 300 / f$ (f étant la fréquence médiane exprimée en MHz)

b) Liaison descendante

b.1) PIRE :

PIRE = Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente du satellite (*exprimée en dBW*). Elle est généralement donnée par les organismes de diffusion. La P.I.R.E. est le facteur déterminant pour le choix d'une antenne. Plus la valeur de la P.I.R.E. sera faible, plus il sera nécessaire d'augmenter le diamètre de l'antenne.

6.3.1.2 Atténuation en espace libre A0

Elle représente l'atténuation causée par la propagation du signal dans le vide :

$$A_0 = 20 \log(f \cdot d) - 147,6 \quad (\text{III.2})$$

Où

f : fréquence de la porteuse en Hz

d : distance en mètre entre le satellite et la station terrienne.

$$d = 42644 \cdot (1 - 0,2954 \cdot \cos(\Psi))^{1/2} \quad (\text{III.3})$$

avec $\cos(\Psi) = \cos(l_{st} - l_{sat}) \cos l_t$

l_t : latitude de station terrienne.

L_{st} : longitude de la station terrienne

L_{sat} : longitude du satellite.

6.3.1.3 Absorption atmosphérique

L'atténuation des ondes dans l'atmosphère est due à trois causes principales :

- Une absorption moléculaire par les gaz atmosphériques.

- Une absorption et une diffusion par les particules liquides et solides contenues dans l'atmosphère.

- Une absorption due aux collisions entre les électrons et les particules neutres dans l'ionosphère.

a) Effets de la troposphère

L'onde est progressivement absorbée ou diffusée par le milieu. Dans ce paragraphe, on étudiera des points suivants :

- L'absorption moléculaire par les gaz atmosphériques
- L'absorption et la diffusion par les particules liquides et solides contenues dans l'atmosphère et principalement par les gouttes de pluies.

a.1) Atténuation par les gaz atmosphériques :

L'azote n'ayant pas de bandes d'absorption dans le domaine des fréquences radioélectriques, l'absorption moléculaire est due presque uniquement à l'oxygène et à la vapeur d'eau.

a.2) Atténuation linéique due à l'oxygène :

Aux fréquences inférieures à 350GHz l'oxygène présente une raie d'absorption isolée à 118,74GHz et une série de raies très rapprochées situées entre 50 et 70 GHz environ. Celles-ci se comportent dans les basses couches de l'atmosphère comme une bande d'absorption continue.

En outre la molécule d'oxygène possède un moment magnétique qui produit dans le spectre d'absorption une raie à la fréquence zéro.

En utilisant le profil de raie de VAN VLECK ET WEISSKOPF et en tenant compte des résultats de mesures disponibles, l'atténuation linéique en dB/Km due à l'oxygène, dans les basses couches de l'atmosphère, peut être représentée par les expressions approchées suivantes :

$$\begin{aligned} \Gamma_{O_2} &= (6,6/(f^2+0,33)+9,8/((f-57,5)^2+2,2)).f^2 \cdot 10^{-3} & f < 57,5 \text{ GHz} \\ \Gamma_{O_2} &= 14,7\text{dB} & 57,5 < f < 62,5\text{GHz} \\ \Gamma_{O_2} &= (4,13/((f-62,5)^2+1,1)+0,19/((f-118,7)^2+2)).f^2 \cdot 10^{-3} & 62,5 < f < 350\text{GHz} \end{aligned}$$

a.3) Atténuation linéique due à la vapeur d'eau :

Aux fréquences inférieures à 350 GHz la vapeur d'eau présente trois raies d'absorption, aux fréquences 22,3GHz, 183,3 GHz et 323,8 GHz en outre, aux fréquences submillimétriques et infrarouges, elle présente un très grand nombre de raies dont certaines très intenses. Il en résulte que la somme des ailes de ces raies donne une contribution notable aux fréquences centimétriques et millimétriques. Cette contribution appelée parfois absorption résiduelle, peut être représentée par un seul terme proportionnel au carré de la fréquence.

Pour les très faibles concentrations en vapeur d'eau on peut admettre que l'atténuation est proportionnelle à la concentration. Cependant cette relation n'est qu'approchée et conduit à une sous-estimation de l'affaiblissement, qui devient notable au-dessus de 10 g/m^3 environ.

En utilisant le profil de raie de VAN VLECK ET WEISSKOPF et en tenant compte des résultats de mesures disponibles, l'atténuation linéique en dB/Km due à la vapeur d'eau, dans les basses couches de l'atmosphère, peut être représentée par l'expression approchée suivante :

$$\Gamma_{\text{h}_2\text{o}} = (0,067 + 2,4 / ((f - 22,3)^2 + 6,6) + 7,33 / ((f - 183,5)^2 + 5) + 4,4 / ((f - 323,8)^2 + 10)) \cdot f^2 \cdot \rho \cdot 10^{-4}$$

Avec f étant exprimé en GHz et ρ en grammes de vapeur d'eau par m^3 d'air.

Pour les fréquences inférieures à 100GHz environ il suffit de prendre en compte les deux premiers termes.

a.4) Influence de la température :

La température a une influence assez complexe sur l'atténuation car elle agit à la fois sur l'intensité des raies d'absorption et sur leur largeur. Cependant si l'on tient compte du fait que l'amplitude des variations relatives à la température absolue dans l'atmosphère est généralement inférieure à 10 % et que d'autre part la température d'une masse d'air n'est pas homogène et n'est pas connue avec précision, il suffit d'avoir une estimation grossière de l'effet de la température.

Pour de nombreuses applications on peut négliger complètement l'effet de la température. Si l'on veut en tenir compte on peut considérer que les formules 1 et 2 sont valable pour une température de 15°C et qu'elles doivent subir une correction négative de 0,7% par degré (l'atténuation augmente quand la température diminue).

a.5) Atténuation sur un trajet :

Sur un trajet terrestre on peut généralement considérer que l'atmosphère est homogène, et on obtient l'atténuation totale en multipliant la longueur du trajet par la somme des atténuations linéiques dues à l'oxygène et à la vapeur d'eau.

Sur un trajet terre-satellite l'atténuation est surtout concentrée dans les basses couches de l'atmosphère. Tout se passe comme si l'atmosphère réelle était remplacée par une atmosphère homogène, ayant en tout point les caractéristiques qu'elle a au sol, avec seulement une épaisseur h_e dite épaisseur équivalente. En dehors des bandes d'absorption, h_e est pratiquement constant et égal à environ 6km pour l'oxygène et 2,2km pour la vapeur d'eau.

L'atténuation A_θ à un angle d'élévation θ peut être déduite de l'atténuation zénithale A_z en tenant compte de la longueur équivalente qui dépend de θ et de h_e . on a la relation :

$$A_\theta / A_z = L_e / h_e = 2 / ((\sin^2 \theta + 2 \cdot h_e / k_a)^{1/2} + \sin \theta)$$

Le rayon de la terre k_a pouvant être pris égal à 8500 km.

Pour les angles d'élévation supérieurs à environ 5°, il suffit d'utiliser la loi de COSECANTE

$$A_{\theta}/A_z \approx 1/\sin \theta$$

On doit noter en outre que, dans la bande d'absorption intense de l'oxygène (57 à 62,5GHz), le calcul précédent n'est pas entièrement valable car dans les hautes couches de l'atmosphère les différentes raies de cette bande d'absorption sont nettement séparées. Il en résulte que l'atténuation dans cette bande ne peut plus être représentées par une valeur unique.

b) Atténuation par les hydrométéores :

parmis les particules non gazeuses de l'atmosphère il y a d'autres particules influant sur la liaison(pluie, brouillard, nuages, neige et grêle) ces particules sont appelées hydrométéores.

Ce sont les gouttes d'eau qui donnent l'atténuation la plus importante, cette atténuation est due à deux mécanismes, d'une part une absorption de l'énergie par pertes ohmiques dans les gouttes d'eau, et d'autre part une diffusion de l'énergie par ces gouttes d'eau.

b.1) Absorption et diffusion d'une onde par des particules :

Lorsqu'une onde plane rencontre des particules, par exemple des gouttes de pluie, une partie de l'énergie de l'onde est absorbée par les particules, une autre est diffusée par celles-ci, et le reste traverse la zone occupée par les particules, en ayant ainsi subi des atténuations, on peut donc écrire d'une façon générale :

$$p_i - p_t = p_a + p_d$$

Où

p_i : puissance incidente

p_t : puissance transmise

p_a : puissance absorbée

p_d : puissance diffusée

Ce qu'on exprime parfois de façon plus condensée par :

$$\text{atténuation} = \text{absorption} + \text{diffusion}$$

b.2) Atténuation des composants solides de l'atmosphère :

Dans l'atmosphère, on rencontre les éléments solides suivants :

*** Neige et grêle :**

Il a été démontré que pour des fréquences inférieures à 2 GHz, la neige a peu d'effet, par contre l'affaiblissement dû à la grêle peut être sensible à partir de 2 GHz, mais il semblerait que la

présence de la grêle n'a plus d'effet sensible que pendant moins de 0.001% du temps, dans la plupart des climats.

b.3) atténuation par les composants liquides de l'atmosphère :

*** Brouillard et nuage :**

Dans ce cas les particules d'eau sont extrêmement petites par rapport à la longueur d'onde même jusqu'à 50 GHz, d'où l'affaiblissement est principalement dû à l'absorption de l'énergie par ces particules.

*** Pluie :**

L'influence de la pluie est beaucoup plus complexe, car la structure des précipitations est elle-même moins connue. L'évaluation des affaiblissements importants nécessite la mesure des événements d'une durée de quelques minutes. Dans l'étude ci présente le pourcentage de temps pris en considération est de 0.01 % d'une année qui correspond à une durée de 50 minutes.

Les affaiblissements cités ci-dessus, dépendent évidemment et principalement du régime pluvieux dans la région considéré, et en particulier de la distribution statistique des intensités de pluie en un point.

De ce fait, le C.C.I.R. a normalisé le découpage des zones hydrométéologiques [5zones] en fonction des statistiques sur les taux de précipitations en mm/h.

Dans cette étude ces affaiblissements dits hydrométéologiques sont calculés en utilisant des formules empiriques se trouvant dans l'appendice N°30 du C.C.I.R. [CCI-86].

6.3.1.3 Calcul de l’Affaiblissement hydrométéorologique A_H

* Calcul de A_H :

$$A_H = 0.21\gamma L_p R \dots\dots\dots [dB]$$

Où

L_p : Longueur du trajet oblique au-dessous de la hauteur de précipitation

R : Facteur de réduction de la longueur de trajet de précipitation

* Calcul de L_p :

$$L_p = \frac{2 [H_p - H]}{\left[\sin^2 \theta + \frac{[H_p - H]^2}{4250} \right]^{1/2}} + \sin \theta$$

Où

H : Altitude de la station terrienne[Km].

H_p : Hauteur de la précipitation[Km].

θ : Angle de site de l'antenne réceptrice[Degrés].

Avec $H_p = Z \{5.1 - 2.15 \text{ Log } [1+10^{[|t-27|/25]}]\} \dots\dots\dots [Km]$

Avec :

0.6 $t \leq 20^\circ$

$Z = 0.6 + 0.02 [|t|-20]$ $20^\circ \leq t \leq 40^\circ$

1 ailleurs

* **Calcul de R :**

$$R = \frac{90}{90 + 4 L_p \cos \theta}$$

$\gamma = 0.0202 t_p^{1.198} \dots\dots\dots [dB/Km]$

Avec t_p : Taux de précipitation [mm/h] (voir Tableau III.2)

		Zone hydrométéorologique				
		1	2	3	4	5
tp :	Intensité de précipitation [mm/h]	75	55	37	26	14

Taux de précipitation des différentes zones hydrometeorologiques

c) Atténuation des composants solides de l'atmosphère

c.1) Sable et Poussière :

Des mesures menées en laboratoire à 10 GHz et pour des concentrations de particules inférieures à 10^{-5} g/m³, ont démontré que l'affaiblissement n'atteint pas 0.1 dB/Km pour le sable et 0.4 dB/Km pour la poussière.

Dans le cas de la radiodiffusion par satellite, la longueur du trajet à travers les tempêtes de poussière peut varier entre 0.5 et 3 Km. On peut escompter que l'affaiblissement sera inférieur à 1 dB même pour les fortes tempêtes.

d) Effet de l'ionosphère :

L'ionosphère est une zone de forte densité électronique qui s'étend de 80 à 1000 Km d'altitude.

L'ionisation de la haute atmosphère est provoquée par le rayonnement solaire :La densité électronique est donc plus forte le jour que la nuit et aussi en période d'activité solaire importante.

Un signal électromagnétique qui se propage dans l'atmosphère subit un certain nombre de perturbations dues à l'anisotropie et aux turbulences du milieu.Ces différentes dégradations sont :

- L'atténuation
- La réfraction
- La rotation du plan de polarisation

Les autres effets généralement négligeables, sont le ralentissement de la vitesse de propagation (l'erreur sur la distance est inversement proportionnelle au carré de la fréquence), l'erreur sur l'effet DOPPLER, des scintillations sur l'amplitude, la fréquence et la phase.Ces scintillations sont négligeables pour des fréquences supérieures a 500MHz.

Atténuation ionosphérique :

L'atténuation ionosphérique est très faible, elle est négligeable au-dessus de 300 MHz.

Réfraction ionosphérique :

La réfraction subie par une onde électromagnétique traversant l'ionosphère est de signe opposé a celle qui est introduite par l'atmosphère : l'effet global est donc diminué l'erreur de pointage due à la seule ionosphère est inversement proportionnelle au carré de la fréquence pour des fréquences supérieures à 100MHz.

Rotation du plan de polarisation :

Celle-ci intervient lorsque, pour réutiliser la plage de fréquence au maximum on utilise la polarisation linéaire du signal dans les transmissions, la rotation détériore la polarisation ainsi produite, et mixe donc des signaux différents. Son impact est cependant négligeable pour les bandes Ka et Ku.

En effet L'ionosphère est un milieu gyroelectrique, sous l'action du champ magnétique terrestre, il y a rotation du plan de polarisation de l'onde électromagnétique qui la traverse (effet FARADAY).

L'angle de rotation varie comme l'inverse du carré de la fréquence et vaut quelques degrés a 4GHz ,il en résulte une atténuation de l'onde porteuse reçue :

$$A_{pol} \text{ (dB)} = -20\log(\cos(\phi))$$

Où

Φ est l'angle de rotation. $A_{pol} \text{ (dB)} = 0,1\text{dB}$ et $XPD = 16\text{dB}$

Et une dégradation du couplage de polarisation $XPD(\text{dB}) = -20\log(\tan(\phi))$.

Si l'on considère une rotation de 9° à 4GHz

6.3.2 Puissance du bruit

Le rôle essentiel d'un récepteur est d'amener le signal utile a un niveau exploitable.

L'amplification s'accompagne toujours d'une dégradation de qualité du signal incident, due aux bruits créés par le récepteur et aux bruits d'origine externes.

a) Bruit externe :

Ce bruit englobe tous les bruits engendrés par le milieu industriel, le trafic etc...

Leurs fréquences caractéristiques s'étendent jusqu'à 500 MHz. Ils ne concernent donc pas les transmissions par satellite.

a.1) Bruit atmosphérique et spatial :

Ce type de bruit causé par des phénomènes naturels tels que la foudre qui génère des ondes sur tout le spectre radiofréquence et dont l'influence devient faible au-delà de 20 MHz. D'autre part, il y a le bruit cosmique qui est du aux étoiles et dont le spectre radiofréquence varie de 800 MHz à 1 GHz.

Par ailleurs, le bruit provenant des planètes reste négligeable sauf pour le soleil lorsqu'il est près de la terre et reçu dans le lobe principal de l'antenne terrienne connu comme étant la conjonction du satellite avec le soleil "sun outage".

a.2) Bruit thermodynamique rayonné par l'environnement:

C'est le bruit rayonné par la surface du sol. Il est capté par les lobes secondaires de l'antenne et dépend de l'élévation de celle-ci.

Il faut aussi mentionner :

- Le bruit provenant du ciel
- Le bruit du aux gaz atmosphérique
- Le bruit du aux précipitations
- Le bruit cosmique

- Le bruit du au rayonnement propre de la terre.

b/ bruit thermique interne :

Le bruit crée au récepteur est défini par sa température de bruit et par son facteur de bruit.

c) Température de bruit :

Elle permet principalement d'évaluer la performance des convertisseurs. En bande C, cette valeur est exprimée en Kelvin. Un convertisseur efficace ne doit pas avoir une température supérieure à 30 K. En bande KU, elle s'exprime en dB. Un bon convertisseur possède une température inférieure à 1 dB.

c.1) Facteur de bruit :

Le facteur de bruit est le rapport de la puissance maximale utilisable du bruit a la sortie du récepteur N_s à la puissance maximale de bruit que l'on aurait à la sortie s'il n'y avait aucune source de bruit que le générateur connecté a l'entrée du récepteur à la température $T_0 = 300^\circ\text{K}$.

$$F = N_s / GKT_0B_{if}$$

$$N_s = GKT_0B_{if} + GKT_eB_{if} = GK(T_0 + T_e)B_{if}$$

Donc $F = 1 + T_e/T_0$

G :gain en puissance maximale utilisée au récepteur

B_{if} : la bande passante du récepteur à 3 dB.

K :constante de boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ joule/°K.

6.3.3 Calcul de la Puissance du bruit

La Puissance du bruit (dBw) = Température équivalente de bruit du système(dBk)+constante de boltzmann(-228,6dBw/hz/k)+largeur de bande du signal(dBhz).

T = Température de bruit de l'antenne et du convertisseur (LNB) (*exprimée en Kelvin*).

Elle résulte de la somme des 2 composantes: Ta et Tc.

Ta exprime la "puissance" du bruit reçu par l'antenne au niveau de la source. Celui-ci provient essentiellement des rayonnements électromagnétiques célestes d'origine thermique. La température de bruit d'une antenne peut osciller entre 39 et 60 °K en bande Ku. On estime qu'avec une source correctement centrée, la température d'une antenne inclinée à 38° avoisinera les 40°K.

Tc qui s'ajoute à la première exprime le bruit généré par la station de réception propre, en fait le LNB. Ce facteur de bruit, évalué entre 50 et 75° Kelvins équivalents à 0,7 dB et 1,0 dB est généralement indiqué sur les convertisseurs méritant ce nom.

On choisira donc de préférence un LNB ayant un facteur de bruit le plus bas possible mais son influence ne sera que relative: Une bonne station de réception passe essentiellement par une antenne possédant un bon gain, donc un bon rendement.

Largeur de bande du signal = Bande passante de la FI (Fréquence Intermédiaire) du récepteur. En cas de réception de signaux faibles la possibilité de réduction de la largeur de bande FI de certains démodulateurs améliore le C/N et supprime les clics sur l'image. En revanche, il détériore quelque peu le rapport signal/ bruit vidéo.

Fréquence intermédiaire (FI) : Fréquence de conversion à valeur fixe, utilisée dans un démodulateur. La fréquence intermédiaire normalisée est de 70 MHz, avant l'étage de détection vidéo. On emploie également ce terme en réception pour désigner les fréquences converties, allant de 950 à 2050 MHz. Fréquence de référence permettant de démoduler un signal radioélectrique dans certains récepteurs. Dans un récepteur satellite, elle est généralement de 479 MHz.

*** Définition du facteur de mérite :**

L'efficacité de l'antenne est jugée par le rapport G/T appelé **facteur de mérite** qui se mesure en dB/°K, G étant le gain de l'antenne.

Les conditions normales de réception par satellite correspondent actuellement à $G/T = 6$ dB/°K.

*** L'effet du soleil :**

Le soleil a deux effets très importants sur les télécommunications par satellites :

- Eclipse du satellite par la terre.
- La conjonction du satellite avec le soleil

1) Eclipse des satellites géostationnaires :

L'éclipse du satellite a lieu quand la terre couvre le satellite par rapport au soleil, deux fois par an : (21 Mars - 21 septembre)

Ce phénomène est important car il constitue un choc thermique pour le satellite et d'autre part l'alimentation par les cellules solaires n'est plus possible.

La solution est de choisir une heure d'éclipse tard dans la nuit.

La période d'éclipse est d'environ 42 jours et sa durée journalière peut atteindre 70 mn.

2) La conjonction du satellite avec le soleil :

Pendant la période des équinoxes la conjonction dégrade le facteur de mérite G/T parce que le soleil rayonne des ondes électromagnétiques dans toute la gamme de fréquence ce qui provoque une augmentation considérable du bruit.

Le phénomène dure une vingtaine de minutes pendant plusieurs jours.

*** Prévention du phénomène :**

La conjonction a lieu :

- Avant l'équinoxe du printemps et après l'équinoxe d'automne pour l'hémisphère Nord.
- Après l'équinoxe du printemps et avant l'équinoxe d'automne pour l'hémisphère sud.