

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI – TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MÉMOIRE



DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR
D'ETAT EN ELECTRONIQUE
OPTION : COMMUNICATION

Thème

**ETUDE DES RESEAUX
VSAT**

Proposé et dirigé par :

M^r AIT BACHIR Y.
M^r TAZIBT S.

Etudié par :

- AZI Chafiâa
- ZAIR Samia

Promotion 2007/2008

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERY – TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MÉMOIRE



DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR
D'ETAT EN ELECTRONIQUE
OPTION : COMMUNICATION

Thème

**ETUDE DES RESEAUX
VSAT**

Proposé et dirigé par :

M^r AIT BACHIR Y.

M^r TAZIBT S.

Etudié par :

- AZI Chafiâa

- ZAIR Samia

Promotion 2007/2008

Remerciement

Nous tenons d'abord à remercier notre promoteur Mr TAAZIBT pour avoir accepté de nous encadrer et de nous faire bénéficier de son estimable expérience, qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous remercions Samir pour sa contribution efficace à la réussite de ce modeste travail, ainsi que Moussa pour son aide.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- la mémoire de mon père (que Dieu ait pitié de son âme).*
- Ma très chère mère (que Dieu la protège).*
- Mon mari Samir et notre grande famille.*
- Samia et sa famille*
- Tous mes amis (es) en particulier Nacira*
- Toute la promotion 2008 en particulier les étudiants d'option communication.*

Chafiâa.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mes chers parents*
- *Mes chères douces sœurs : Lila, Dalila, Mitchi*
- *Mes chers grands-parents et mes oncles*
- *Ma chère tante Ouiza*
- *Chafiâa et toute sa famille*
- *Tous mes amis (es) : Ouiza, Ferroudja, Sadia, Karima, Hakima, Kahina, Fazia, Tahar, Ahmed, Slimane, Boussad.*
- *Toute la promotion 2008 et ceux qui connaissent et aiment Samia*

Samia.

SOMMAIRE

Liste des figures	8
Introduction Générale	10
Chapitre I : Introduction aux réseaux VSAT	
1- Introduction	12
2- Définition du réseau VSAT	12
3- Configuration du réseau VSAT	12
4- Application des réseaux VSAT et types du trafic	13
5- Options du réseau VSAT.....	13
5-1- Architecture du réseau VSAT.....	13
5-2- Nature du service (données/son/vidéo).....	15
5-3- Assignement aux ressources satellite.....	16
5-4- Bande de fréquences.....	17
5-5- Options du Hub.....	19
5-5-1- Le Hub dédié.....	19
5-5-2- Le Hub partagé.....	19
5-5-3- Le mini Hub.....	19
6- Stations terriennes du réseau VSAT.....	19
6-1- Stations VSAT.....	19
6-1-1- L'unité extérieure (ODU).....	20
6-1-2- L'unité intérieure (IDU).....	21
6-2- Station centrale (Hub).....	21
7- Aspects de normalisation.....	22
7-1- Autorisation.....	22
7-2- Accès au secteur spatial.....	22
8- Conclusion.....	23
Chapitre II : Aspects opérationnels	
1-Introduction.....	25
2- Equipements du satellite.....	25
2-1- Répéteur transparent.....	25
2-2- Répéteur régénérateur.....	26
3- Réutilisation de fréquence.....	27
4- Installation au sol.....	27
4-1- Installation du Hub et des VSAT.....	27
4-2- Pointage des antennes.....	28
5- Soucis des clients.....	29
5-1- Flexibilité.....	29
5-2- Rétablissement d'échecs.....	29
5-3- Probabilité de blocage.....	30
5-4- Temps de réponse.....	30
5-5- Qualité de liaison.....	30
5-6- Disponibilité.....	31

5-7- Maintenance.....	32
5-8 Cout.....	32
Chapitre III : Gestion de réseau	
1-Introduction.....	34
2- Protocoles.....	34
2-1- Modèle de référence OSI pour la transmission de données.....	34
2-1-1- Couche physique.....	35
2-1-2- liaison.....	Couche 35
2-1-3- Couche réseau.....	35
2-1-4- Couche transport.....	35
2-1-5- Couches hautes.....	35
2-2- Configuration physique et de protocoles du réseau VSAT.....	35
2-3- Conversion de protocole.....	36
2-4- Raisons de conversion de protocole.....	37
2-4-1- Effet sur le contrôle des erreurs.....	37
2-4-2- Effet sur le contrôle de flux	39
2-4-3- Election des liaisons par satellite.....	39
3- Accès multiple.....	41
3-1- Protocoles d'accès multiple.....	42
3-1-1- Accès multiple par répartition en fréquence (FDMA).....	42
3-1-2- Accès multiple par répartition dans le temps (TDMA)...	42
3-1-3- Accès multiple à répartition par code (CDMA).....	42
3-2- Application sur les réseaux VSAT	42
3-2-1- Réseau maillé.....	42
3-2-2- Réseau étoilé.....	43
3-3- Assignement fixe et demande d'assignement.....	47
3-3-1- Assignement fixe avec FDMA.....	47
3-3-2- Accès multiple à la demande d'assignement (DAMA)...	48
3-4- Politiques d'accès aléatoires.....	49
3-4-1- Technique Aloha.....	49
3-4-2- Aloha en tranche.....	50
3-4-3- Aloha à retransmission sélective.....	50
3-4-4- Aloha avec réservation.....	50
4- Technique de modulation.....	50
4-1-1- Modulation FSK.....	50
4-1-2- Modulation BPSK.....	51
4-1-3- Modulation QPSK.....	51

Chapitre IV : Analyse des liaisons radiofréquence des systèmes VSAT

1-Introduction.....	54
2- Principe.....	54

2-1- Bruit thermique.....	55
2-2- Bruit d'interférence.....	55
2-3- Bruit d'intermodulation.....	55
3- Bruit de la liaison terre-satellite-terre.....	57
4- Analyse de la liaison montante.....	59
4-1- Densité de flux de puissance.....	60
4-2- PIRE de la station terrienne.....	61
4-3- Perte au niveau de la liaison montante.....	62
4-3-1- Pertes en espace libre.....	62
4-3-2- Pertes atmosphérique.....	63
4-4- Facteur de mérite du satellite.....	64
5- Analyse de la liaison descendante.....	64
5-1- PIRE du satellite.....	66
5-2- Densité de flux de puissance.....	66
5-3- Pertes au niveau de la liaison descendante.....	66
5-4- Facteur de mérite de la station terrienne.....	66
6- Analyse de bruit d'intermodulation.....	69
7- Analyse de bruit d'interférences.....	69
7-1- Expression du rapport porteuse sur interférences (C/N_i).....	69
7-2- Types d'interférence.....	70
7-2-1- Interférences internes.....	70
7-2-2- Interférences externes.....	75
8- Détermination du taux d'erreur binaire (BER).....	78
Conclusion.....	79
Annexes.....	80
Glossaire.....	84
Bibliographie.....	86

LISTE DES FIGURES

- Fig I-1** : Liaison unilatérale entre deux VSAT.
Fig I-2 : Topologie étoilée.
Fig I-3 : Topologie maillée.
Fig I-4 : Principe d'assignement fixe.
Fig I-5 : Principe de demande d'assignement.
Fig I-6 : Sources d'interférence.
Fig I-7 : Equipement d'une station VSAT.
Fig I-8 : Sous-système du Hub.
Figure III-1 : Architecture OSI.
Figure III-2 : Configuration Physique du Réseau VSAT.
Figure III-3 : Protocole SW.
Figure III-4 : Protocole GBN.
Figure III-5 : Protocole SR.
Figure III-6 : Interrogation à travers le réseau VSAT.
Figure III-7 : Accès multiple pour différentes configurations de réseau VSAT
Figure III-8 : Réseau maillé.
Figure III-9 : connexion bidirectionnelle avec porteuses monovoies.
Fig III-10 : Connexion avec porteuses monovoie vers le hub, multivoies vers les VSAT en FDMA
Fig III-11 : Connexion avec porteuses monovoie vers le hub, multivoies vers les VSAT en TDM.
Fig III-12 : Porteuses multivoies vers le hub et VSAT.
Fig III-13 : Porteuses en TDMA vers le hub, en TDM vers les VSAT.
Fig III-14 : Porteuses combinées en TDMA vers le hub, en FDMA vers les VSAT.
Fig III-15 : Connexion avec CDMA.
Fig III-16 : Assignement fixe en FDMA.
Fig III-17 : Accès multiple à demande d'assignement.
Fig III-18 : Constellation QPSK.
Fig II-1 : Répéteur transparent.
Fig II-2 : Répéteur régénérateur.
Fig II-3 : Réutilisation de fréquence.
Fig II-4 : Angle d'élévation.
Fig IV-1 : Configuration du réseau VSAT.
Fig IV-2 : Caractéristique entrée/sortie du TOP.
Fig IV-3 : Contribution du bruit de la liaison globale.
Fig IV-4 : Géométrie de la liaison montante.
Fig IV-5 : Composants de la station émettrice.
Fig IV-6 : Atténuation atmosphériques.
Fig IV-7 : Géométrie de la liaison descendante.
Fig IV-8 : Température de bruit d'antenne pour un temps clair.
Fig IV-9 : Température de bruit d'antenne pour un temps pluvieux.

- Fig IV-10** : Equipement de la station terrienne.
- Fig IV-11** : Spectre de la porteuse reçue contaminée par des interférences.
- Fig IV-12** : Interférences inter-canal pour un satellite à système multifaisceaux.
- Fig IV-13** : Interférences dues aux polarisations croisées.
- Fig IV-14** : Polarisation croisées.
- Fig IV-15** : Interférence de la liaison descendante due au canal adjacent.
- Fig IV-16** : Position de la station terrienne par rapport aux satellites désiré et adjacent.
- Fig IV-17** : Interférence due au système du satellite adjacent.
- Figure 2-1** : Diagramme de rayonnement
- Figure 2-2** : Polarisation de l'onde
- Figure 3-1** : Puissance Reçue

INTRODUCTION GENERALE

Depuis plus de 50 ans, les communications de tous types n'ont cessées de croître. Toute sorte de médias ont fait leurs apparitions au cours de ces années, comme par exemple : la radio, le téléphone ou bien encore la télévision.

Cependant, c'est le besoin toujours grandissant de communiquer sur de longues distances qui a donné naissance aux satellites de télécommunication. Désormais, ces satellites possèdent de nombreuses fonctionnalités, comme la diffusion de canaux de télévision, mais ils permettent aussi de répondre aux attentes des entreprises ou des particuliers en transmettant différents types de données. De plus, pour les entreprises, les réseaux de satellites sont complémentaires des réseaux terrestres. Ces satellites offrent en outre, des bandes passantes très larges pour des transferts rapides d'informations.

Notre mémoire a pour vocation de présenter les concepts et les éléments clés dans l'appréhension des technologies satellites et plus particulièrement la technologie VSAT.

Après un premier chapitre d'introduction descriptive des aspects de configuration du réseau VSAT, des services opérationnels et de normalisation, une place est réservée pour l'étude des aspects opérationnels dans le chapitre II. Des problèmes d'installation sont présentés et une liste de soucis potentiels au client est explorée.

La gestion de réseau fait l'objet du chapitre III. Il présente les modulations et les protocoles utilisés pour l'établissement des liaisons. Il est pour l'essentiel consacré à l'accès multiple, c'est-à-dire la manière d'assurer plusieurs liaisons simultanées avec un seul satellite.

Le chapitre IV consacré à l'analyse des liaisons radiofréquences pour un système VSAT, permet de situer les paramètres qui conditionnent la qualité et la disponibilité d'une liaison radiofréquence.



Chapitre I



INTRODUCTION
AUX RESEAUX
VSAT

1- INTRODUCTION :

Les stations VSAT, avec toutes leurs caractéristiques doivent permettre d'assurer les transmissions pour lesquelles elles sont conçues. Ce chapitre a comme objectif d'étudier le réseau VSAT en termes de configuration, services, et options.

2-DEFINITION DU RESEAU VSAT :

VSAT est l'acronyme de « *Very Small Aperture Terminal* ». Ce sont des stations possédant des antennes à petites ouvertures (par rapport à la longueur d'onde), de diamètre allant de 1.2m à 2.4m. Il désigne un terminal terrestre lié à un satellite géostationnaire typiquement par un lien bidirectionnel, utilisé pour la transmission de données, capable de fournir aux utilisateurs des services de communication intégrant voix, données et vidéo. Les stations VSAT ne peuvent pas supporter toutes seules des liaisons satellitaires à grand débit, d'où le besoin d'installation d'un site central appelé *Hub*.

3-CONFIGURATION DU RESEAU VSAT :

Les stations VSAT sont connectées au satellite avec des liaisons radiofréquences par une voie montante (station-satellite) et une voie descendante (satellite-station). Le satellite reçoit les porteuses transmises par les stations terriennes, les amplifie, les transpose à des fréquences plus basses et puis les retransmet aux différentes stations terriennes réceptrices.

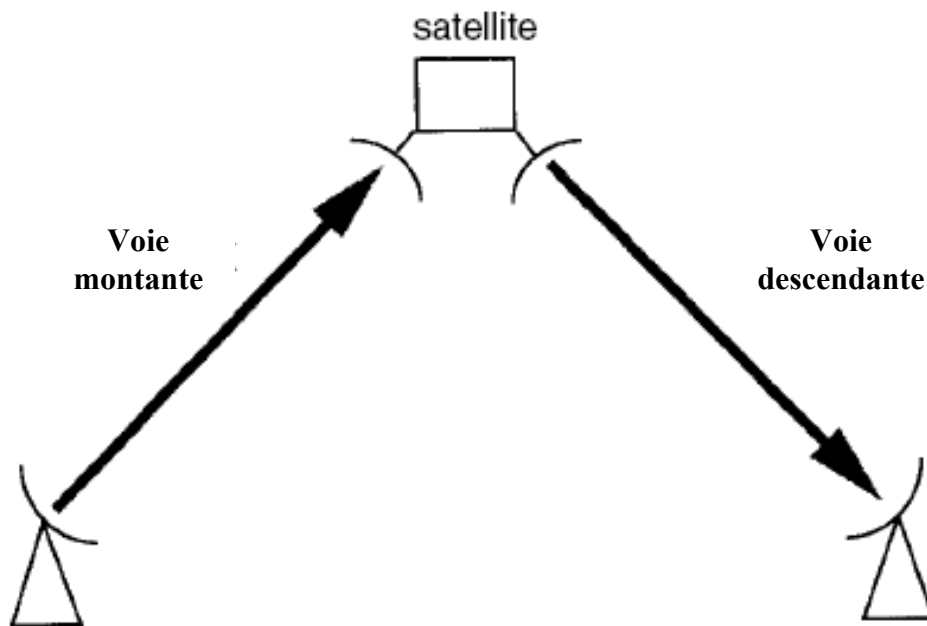


Figure I-1 : *Liaison unilatérale entre deux VSAT*

4- APPLICATION DES RESEAUX VSAT ET TYPES DE TRAFIC :

Les réseaux VSAT ont des applications dans les deux domaines, civil et militaire. Le réseau VSAT civil soutient la diffusion de tout type d'information, à savoir la diffusion de données et de programmes TV ainsi que la transmission de voix (téléphonie), comme il permet de faire des formations à distance. Le trafic écoulé dans ce type de réseau dépend des catégories des services qui peuvent être unidirectionnel (EX : transfert ou diffusion de données), ou bien bidirectionnel (EX : transaction bancaire). Pour le domaine militaire, le réseau VSAT est utilisé grâce à la flexibilité des stations VSAT, qui doivent être de petites dimensions et de faible poids pour être exploitées.

5- OPTIONS DU RESEAU VSAT :

5-1- Architecture du réseau VSAT :

Le réseau VSAT peut être configuré en deux topologies possibles, étoilée et maillée. La topologie étoilée permet une connectivité point à multipoints dont les communications passent à travers le Hub où elles sont contrôlées. Par ailleurs, elle présente l'avantage de contrôler facilement les accès au satellite. Toutefois elle a l'inconvénient de nécessiter un double saut pour une communication entre deux VSAT (un délai de propagation important).

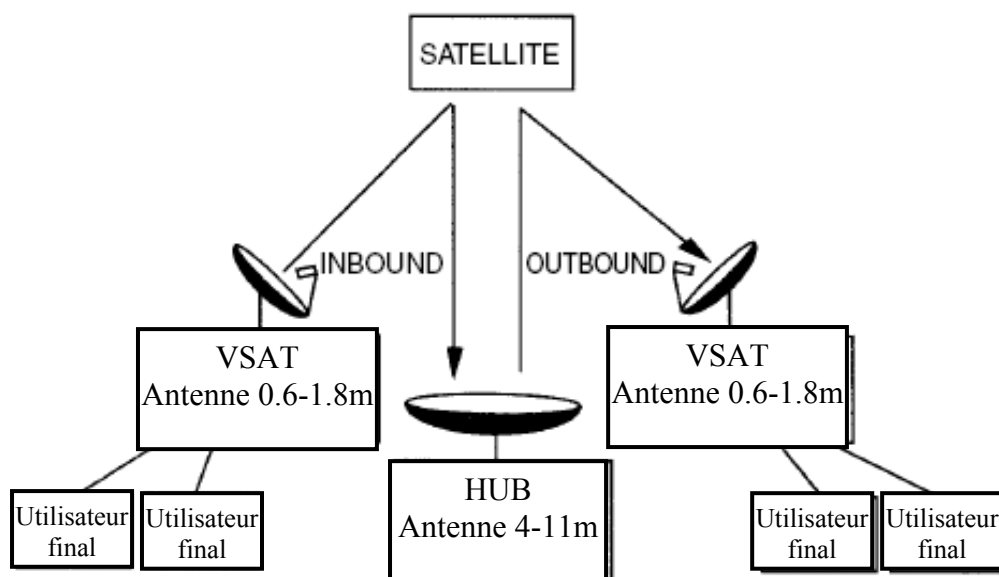


Figure I-2 : Topologie étoilée

Pour le réseau maillé, une connectivité point à point permanente ou temporaire existe entre chaque couple de VSAT en passant par le satellite. Cette architecture présente l'avantage de pouvoir réduire l'affaiblissement de la liaison entre deux stations VSAT. Cependant elle nécessite des antennes de grandes ouvertures (de diamètre 2.4m) avec des propriétés similaires de débit, de puissance de transmission et de sensibilité de réception que celles du hub. Son contrôle est complexe.

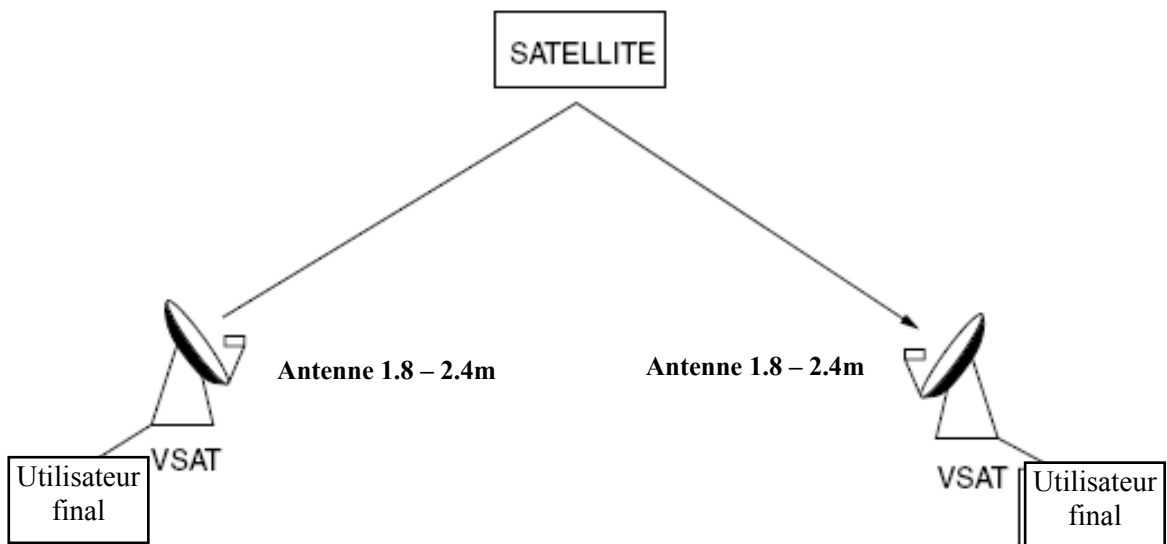


Figure I-3 : Topologie maillée

- Le choix de l'une des deux topologies citées dépend de trois facteurs, à savoir la structure de flux de données, la qualité et la capacité de liaison ainsi que le délai de Transmission de l'information.

a- Structure de flux de données :

Pour chaque type d'application convient une configuration spécifique. En effet, pour la radiodiffusion, par exemple, un site central (Hub) est nécessaire d'où une configuration étoilée du réseau, alors que pour les transactions bancaires, ce Hub n'est pas un élément contraignant, d'où une configuration maillée du réseau.

b-Qualité et capacité de liaison :

Etudier la qualité de liaison revient à analyser le signal transmis, celui-ci peut être analogique ou numérique. La qualité d'un signal analogique est liée à sa porteuse dont on mesure le rapport C/N. (N : densité spectrale de puissance du bruit, C : la puissance de la porteuse). Quant au signal numérique, délivré en bande de base aux

utilisateurs, sa qualité est donnée par le taux d'erreurs binaires défini par le rapport E_b/N . (E_b : quantité d'énergie par bit d'information). L'intégration du Hub permet des transmissions à haut débit et assure donc une capacité élevée.

c-Délai de Transmission :

Pour la transmission vidéo et de données, les deux topologies sont disponibles alors que pour la transmission de la voix, le délai de transmission pose des problèmes, ce qui privilégie la topologie maillée.

5-2-Nature du service (donnée/voix /vidéo) :

Les transmissions peuvent être un seul signal ou signaux mixtes. Les données et la voix sont transmises sous forme numérique, alors que la vidéo peut être analogique ou numérique. En numérique, la technique de compression permet un gain en bande passante.

a- Transmission de donnée :

Les stations VSAT sont émergées au premier lieu pour transmettre des données. Le débit binaire offert à l'utilisateur est de : 50b/s – 64kb/s avec les ports d'interface tel que RS-232. 20Kb/s avec le protocole RS-422, pour un débit élevé, avec les protocoles (V35, X21). L'interface la plus utilisée est en Réseau local (LAN), avec le connecteur RJ-45.

b- Transmission de la voix :

La transmission de la voix peut être faite à un faible taux binaire en utilisant le codage des signaux transmis. Elle peut être combinée avec les données. Ce type de transmission souffre d'un retard dû au processus de codage et à la propagation des signaux, d'où la nécessité d'appel aux connexions terrestres, sauf dans le cas des terminaux qui sont transportables.

c- Transmission vidéo :

- Du Hub au VSAT : les communications se font en FM combinées avec les standards TV (NTSC, PAL et SECAM) comme elle peut être réalisée par la norme DVB.

- Du VSAT au Hub : en dépit de la puissance limitée des VSAT, la compression rend possible la transmission vidéo à un faible débit binaire.

5-3- Assignement aux ressources satellite :

Les stations terriennes du réseau VSAT communiquent à travers le satellite à l'aide des porteuses modulées. A chaque porteuse est attribuée un sous canal au niveau du satellite. Deux types d'assignements sont distincts :

a- Assignement fixe :

La ressource du satellite est partagée d'une façon fixe entre les stations sans tenir compte de leur trafic. Il peut arriver, à un instant donné, que la bande attribuée à une station VSAT ne suffit pas pour la charge (quantité d'information) envoyée, alors qu'une autre VSAT peut avoir la capacité excessive disponible. Le réseau est donc mal exploité.

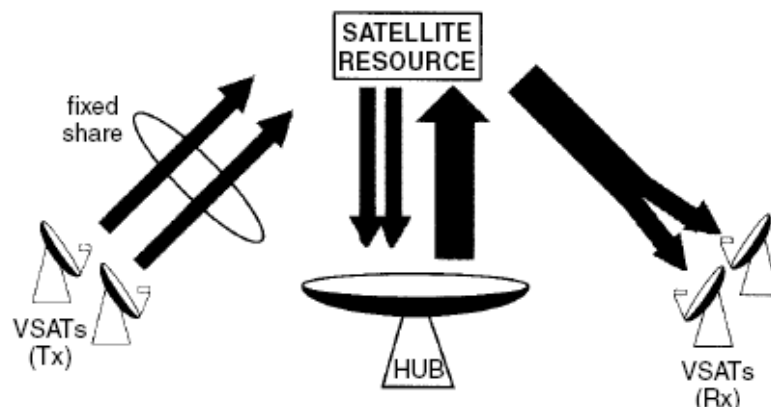


Figure I-4 : Principe d'assignement fixe

b- Demande d'assignement :

Dans ce cas, le partage des ressources satellite diffère d'une station à une autre selon la charge à transmettre.

D'après les deux types cités, on constate que la demande d'assignements offre une meilleure exploitation des ressources satellites. Cela nécessite toutefois des frais élevés et un délai de transmission important. Cependant, le nombre important des stations compense ces frais.

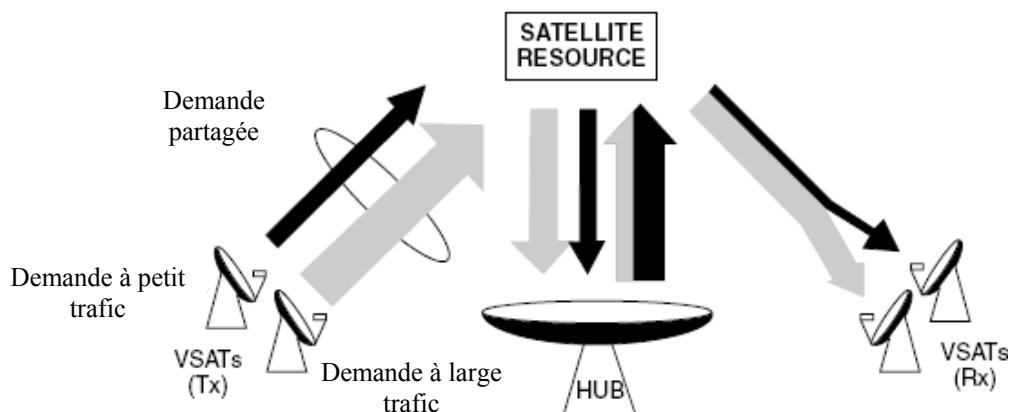


Figure I-5 : Principe de demandes d'assignement

5-4- Bandes de fréquences :

Les réseaux VSAT sont installés pour réaliser les services fixes par satellite (FSS). Dans le cas de transmission de données associées par des diffusions de programmes TV et Radio, ces services sont nommés « services de diffusion par satellite (BSS) ». Les stations VSAT mobiles embarquées sur véhicule font parties de ce type et donc partagent la même bande de fréquence. Les bandes de fréquences les plus utilisées sont : la bande C (6-4 en GHz pour la liaison montante et descendante respectivement), la bande Ku (12-11 en GHz) et la bande X (8-7 en GHz). Cette dernière est utilisée par les services militaires. Pour sélectionner la bande de fréquence, il faut prendre en considération la couverture de la région et ne pas négliger les interférences qui causent des problèmes pour les VSAT vue leur petite dimensions. En effet, le faisceau rayonné (l'ouverture à 3dB) par l'antenne est relié à la fréquence et son diamètre par la relation :

$$\theta_{3dB} = \frac{70c}{Df} \dots \dots (\text{degré}) \quad (1.1). \quad [\text{Réf 1}]$$

c : la célérité de la lumière dans le vide ($c=3.10^8$ m/s).

D : Diamètre de l'antenne (m).

f: fréquence de transmission.

Pour les hautes fréquences (bande Ka et Ku), les interférences ne posent pas de problèmes mais, il ne faut pas en tirer des conclusions hâtives sur l'inconvénient des basses fréquences. En effet, les interférences sont minimisées en utilisant des antennes à gain élevé.

.A ce point, comme la bande C est une gamme de basses fréquences comparées avec la bande Ka et Ku, et vu son partage par plusieurs services, elle est la plus sujette aux interférences que les bandes Ka et Ku.

Pour mettre ceci en relief, l'équation (1.1) indique, pour une antenne de 1.8 m, l'angle d'ouverture est de 3° à 4 GHz (la bande C) et seulement de 1° à 12 GHz (bande Ku) ce qui signifie que l'antenne de réception intègre les porteuses provenant du satellite adjacent à celui désiré à la bande C qu'à la bande Ku, d'où l'intérêt de séparation des satellites adjacents de plus de 3° pour utiliser la bande C en tenant compte bien sûr du diamètre de l'antenne. Une autre source d'interférence est due aux relais terrestres à micro-onde. Ces derniers partagent la bande C et une partie de la bande Ku avec les liaisons radiofréquences. Pour faire face à ces interférences, des techniques de modulation sont mises en œuvre. Elles consistent à étaler le spectre de fréquences.

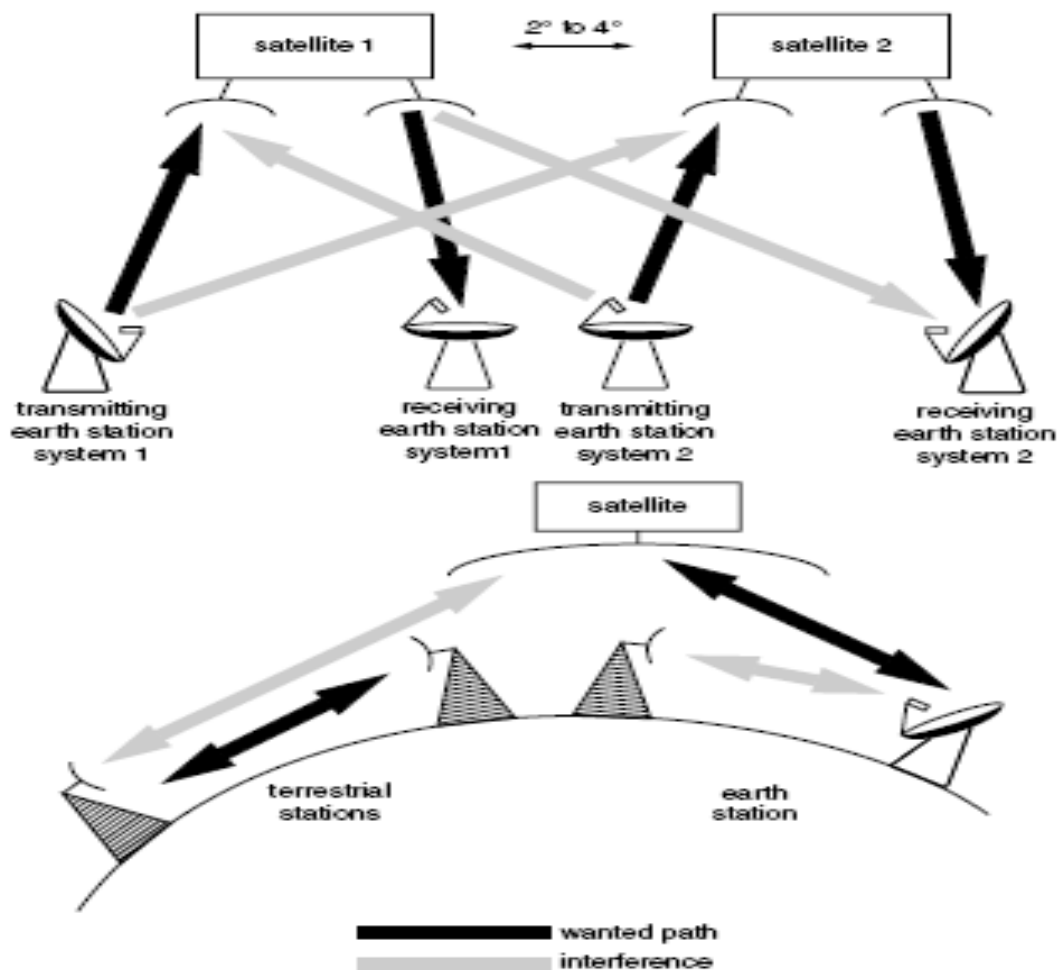


Figure I-6 : Sources d'interférences

Deux autres facteurs interviennent pour choisir entre les bandes C et Ku, à savoir, l'atténuation due à la pluie généralement, plus forte à la bande Ku qu'à la bande C et le coût d'équipements qui est moins cher dans le cas de la bande C.

5-5- Options du Hub :

5-5-1- Hub dédié:

Le Hub dédié (de diamètre entre 8 et 10m), soutient un seul réseau avec des milliers de VSAT. Le réseau est contrôlé grâce au serveur principal connecté au Hub. Cependant, le Hub dédié représente l'option la plus chère, néanmoins le coût est compensé en le partageant par toutes les VSAT.

5-5-2- Hub mutualisé:

Le Hub est partagé par un nombre important de réseaux séparés. Dans ce cas, les services du Hub sont loués aux opérateurs de différents réseaux VSAT.

Les opérateurs du réseau sont confrontés à un investissement d'équipement à capital minimum.

Comme toute option, le Hub mutualisé présente deux inconvénients :

- la nécessité des circuits de connexion entre le Hub et le serveur principal, ce qui rajoute un surcoût à l'opération du réseau VSAT, en outre ces circuits sont de faible capacité de transmission d'où un risque accru d'erreur. Pour affronter ce problème, les liaisons par micro-onde et les liaisons par satellite sont des solutions de secours.
- Limitation possible dans la future expansion : le Hub mutualisé peut imposer une limitation imprévue du débit de transmission tant que la capacité disponible peut être louée sans communication préalable avec les autres opérateurs partageants le même Hub. Les opérateurs des réseaux doivent demander des garanties à cet égard.

5-5-3- Mini-Hub :

Le mini-Hub est un petit Hub avec des antennes de 2 à 5m de diamètre. Il apparut grâce à la puissance accrue des satellites et l'exécution améliorée des équipements de réception à faible bruit, il maintient les avantages du Hub dédié avec un coût réduit. Il peut soutenir de 300 à 400 VSAT à distance.

6- STATIONS TERRIENNES DU RESEAU VSAT :

6-1- Station VSAT :

La station VSAT est constituée de deux parties, à savoir l'unité extérieure (ODU) et l'unité intérieure (IDU) :

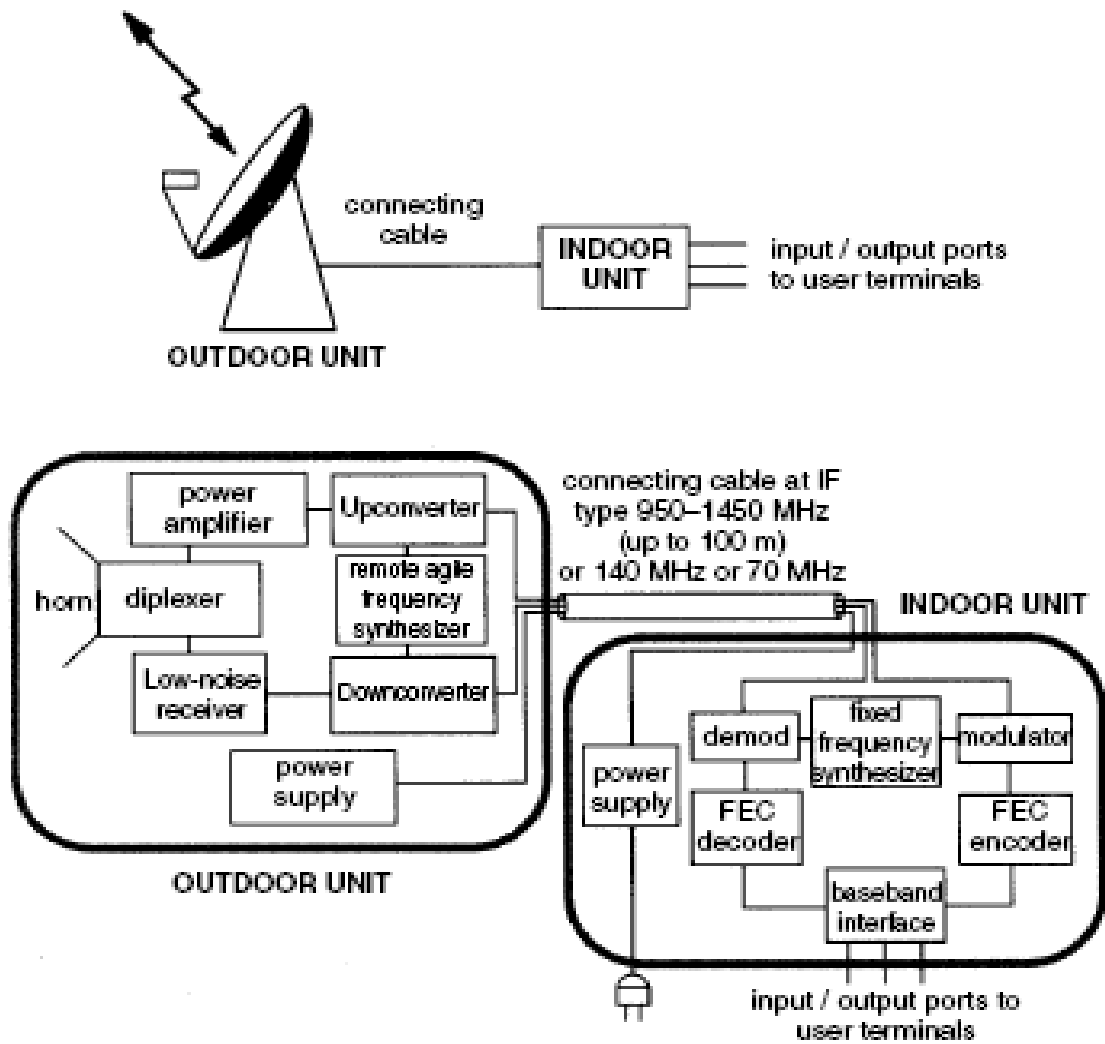


Figure I-7 : *Équipement d'une station VSAT*

6-1-1- L'unité extérieure (ODU) :

Elle comporte une antenne et un bloc électronique contenant un amplificateur de puissance, un récepteur à faible bruit, deux convertisseurs et un équipement de transposition de fréquence. Pour la spécification appropriée à l'ODU, Comme interface au satellite, les paramètres suivants sont importants :

- La puissance isotrope rayonnée effective (PIRE), qui détermine les performances de la radiofréquence montante. Elle dépend du gain de l'antenne, et donc de ses dimensions et de la fréquence de transmission, comme elle dépend aussi de l'amplificateur de puissance à la sortie.
- Le facteur de mérite défini par le rapport G/T qui détermine les performances de la radiofréquence descendante. Il dépend du gain de

l'antenne et donc de ses dimensions, de la fréquence de réception et également de la température de bruit à la réception.

- La température et le vent également la pluie et l'humidité sont des paramètres à ne pas négliger.

- **6-1-2- L'unité intérieure (IDU) :**

C'est un système contenant un modulateur/démodulateur, ainsi qu'un petit serveur s'interfaçant avec les PC, terminaux et téléphones. Pour relier ses bornes au VSAT, l'utilisateur doit accéder aux ports installés sur le panneau de cette unité. Avec ses spécifications appropriées comme interface à l'utilisateur ou à un réseau local ; les paramètres suivants sont importants :

- Nombre de ports.
- Type de port ; qui est fonction du service à accomplir.
- Vitesse des ports : c'est le débit binaire maximum auquel les données peuvent être échangées entre l'utilisateur final et l'ODU.

Les modulations les plus utilisées sont : la modulation à déplacement de phase binaire (BPSK) et la modulation à déplacement de phase en quadrature (QPSK). Pour éviter le bruit de phase, la modulation FSK est mieux adaptée.

6-2- Station centrale (Hub) :

Les dimensions de ses antennes et les sous-systèmes qu'il contient ne sont pas les seuls paramètres qui le différencient des stations VSAT, mais l'interface de l'IDU intervient beaucoup plus : si l'IDU est une interface avec le serveur principal, le Hub est dédié ; dans le cas d'une interface avec le réseau public le Hub est donc mutualisé. Le Hub est constitué des sous-systèmes contenant le modem et l'interface à bande de base qui est relié au serveur principal aussi un système de gestion de réseau (NMS). Ce dernier est un ordinateur connecté à chaque station VSAT par des circuits virtuels permanents. Il est équipé de logiciels, chargé des fonctions opérationnelles et administratives. Les fonctions opérationnelles fournissent les possibilités de modification du réseau, en ajoutant ou en éliminant des stations VSAT, des porteuses et des interfaces réseau. Elles incluent également la surveillance, le contrôle des performances du Hub et de chaque station VSAT. Comme elles contrôlent les ports de données associés au réseau ; ceci nécessite des outils de gestion qui fournissent en temps réel la tâche et la connectivité des VSAT. Le débit de transmission des VSAT est automatiquement contrôlé par un logiciel de contrôle du réseau. Quant aux fonctions administratives, elles assurent la sécurité et la configuration des équipements avec le Hub et les VSAT ainsi que la configuration des ports.

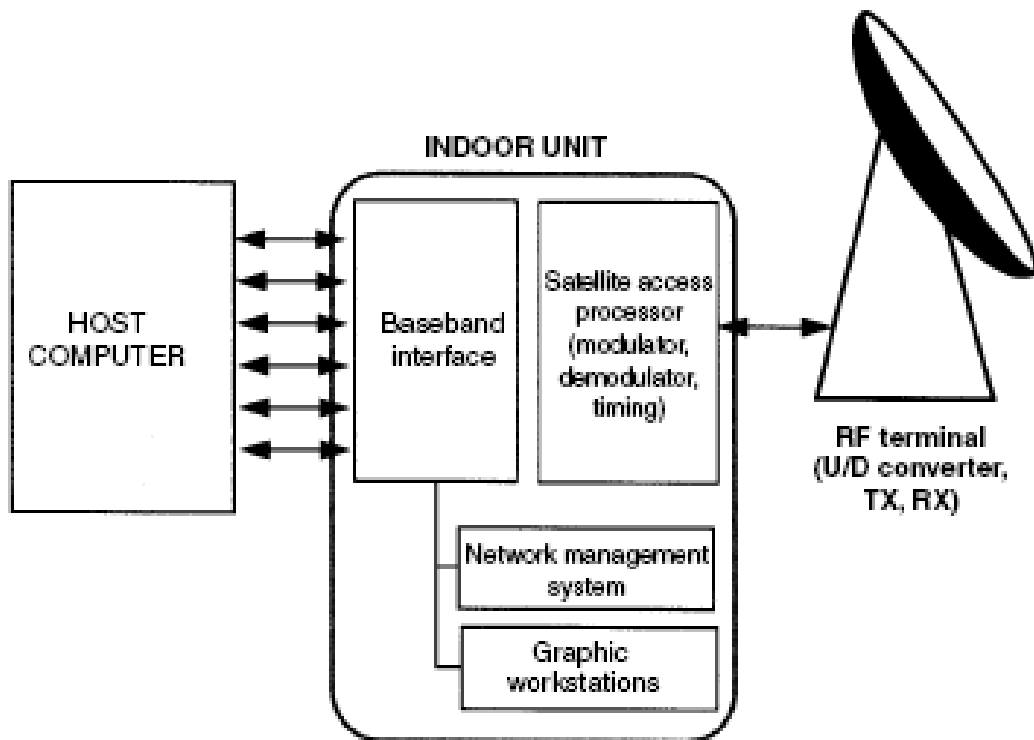


Figure I-8 : Sous-systèmes du Hub

7- ASPECTS DE NORMALISATION :

Les règlements dans le domaine des réseaux VSAT nécessitent plusieurs aspects comportant l'autorisation et l'accès au secteur spatial.

7-1- Autorisation :

L'autorisation est délivrée par les autorités nationales de télécommunication d'un pays où toute station terrestre, comme partie du réseau que se soit le Hub ou les VSAT, est lancée pour être installée et gérée grâce à cette autorisation. Les bandes de fréquences sont partagées par les opérateurs d'une façon optimale. Pour les réseaux internationaux, les autorisations sont délivrées par l'ensemble des autorités nationales où les VSAT ou bien le Hub, sont visés à être installés, sachant que les règles sont différentes d'un pays à un autre.

7-2- Accès au secteur spatial :

Les demandes d'accès au secteur spatial par les opérateurs terriens sont traitées par les opérateurs de satellite.

8- CONCLUSION :

Il s'agit dans ce qui suit, plutôt d'une récapitulatif des avantages et des inconvénients des réseaux VSAT.

❖ Avantages :

- Le réseau VSAT offre des communications entre des terminaux à distance en réalisant ainsi des liaisons point à point ou bien point à multipoint avec les configurations maillée ou étoilée.
- Présente une asymétrie de transfert de données.
- Flexibilité ; le réseau VSAT est facile à installer et à être reconfiguré.
- Faible taux d'erreur qui ne dépasse pas 10^{-7}
- Le coût d'une liaison dans un réseau VSAT ne dépend pas de la distance, des économies sont prévues si le réseau montre un grand nombre d'emplacement et d'une dispersion géographique élevée.
- L'utilisation des satellites géostationnaires ne nécessite pas des antennes mobiles.

❖ Inconvénients :

- Sensibilité aux interférences : les liaisons radiofréquences dans ce réseau sont sujettes à des interférences causées par les petites dimensions des antennes.
- Fuites de données : provenant du satellite à des destinations non désirées, d'où la nécessité de sécurisation.
- La panne d'un transpondeur met tout le réseau hors fonction ; la reconstitution de la liaison peut être effectuée lentement.
- Le temps de propagation d'une station VSAT à une autre est considérable pour la topologie étoilée ce qui est gênant pour la transmission du son.



Chapitre II



ASPECTS
OPERATIONNELS

1- INTRODUCTION :

Il n'est pas important pour les opérateurs des VSAT de connaître tout ce qui concerne les satellites. Cependant un certain nombre de facteurs relatifs à l'orbite du satellite et au parcours terre-satellite-terre agissent sur les performances des réseaux VSAT. Parmi ceux-ci, la position du satellite relativement au sol détermine le délai de propagation et l'orientation des antennes.

2- EQUIPEMENTS DU SATELLITE :

En plus des équipements au sol relatifs à la poursuite du satellite (équipement de télémétrie, de contrôle, de commande...), un satellite de télécommunication comprend une plate-forme qui gère le contrôle thermique, l'alimentation électrique et la stabilité en orbite. Cette dernière étant assurée par des propulseurs à gaz. Pour assurer le fonctionnement de ses équipements, le satellite est disposé d'une source d'énergie électrique. A cette fin, les satellites commerciaux de communication sont munis de panneaux constitués de cellules à énergie solaire. Ils fournissent avec les batteries chargées, l'énergie électrique indispensable aux différents équipements électriques. Il comporte également une charge utile, composée d'antennes et de dispositifs électroniques. Les signaux captés sont réémis sur une fréquence différente généralement plus basse grâce aux « **Répéteurs** » chargés également d'amplifier massivement le signal.

2-1- Répéteur Transparent :

Un répéteur transparent est en général composé d'un étage d'entrée, d'une transposition en fréquence et d'un amplificateur de puissance en sortie à TOP (Tube d'Ondes Progressives). Ce répéteur ne fait pas la distinction entre la porteuse et le bruit montants. [Réf 2]

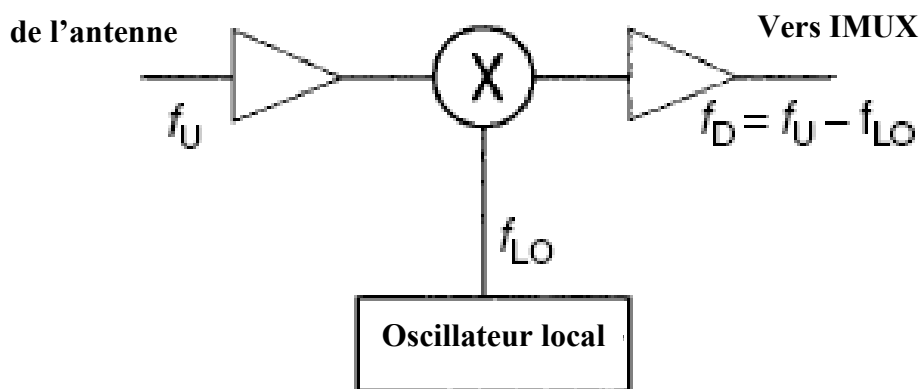
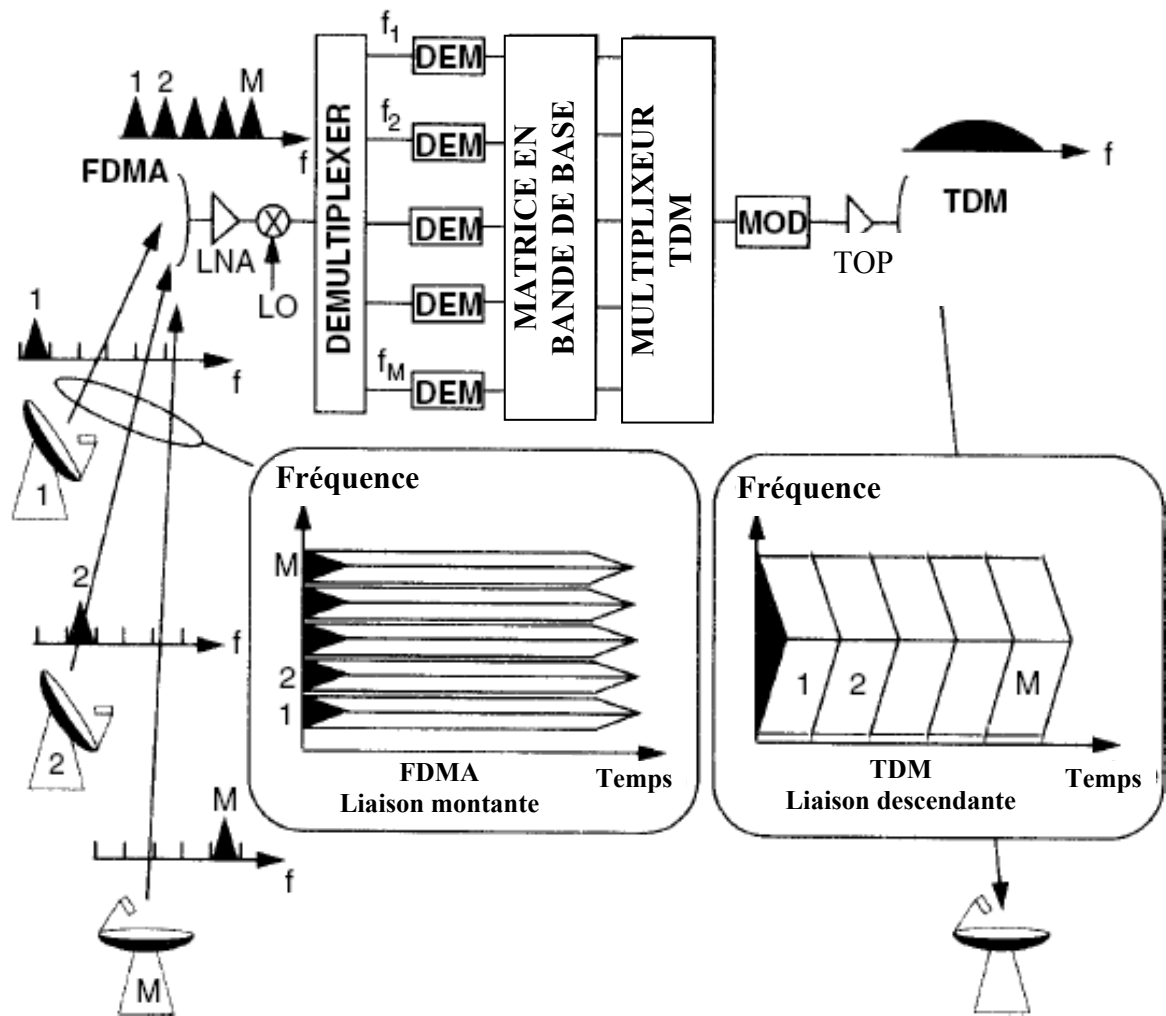


Figure II-1 : Répéteur transparent

2-2- Répéteur Régénérateur :

Un répéteur régénérateur nécessite la démodulation des porteuses montantes. Cette régénération est plus souvent utilisée pour les signaux numériques. Le bruit d'inter-modulation peut être évité quand l'amplificateur ne fonctionne pas en mode multi-porteuse. En effet plusieurs trains binaires à la sortie des différents démodulateurs peuvent être combinés dans un multiplex par répartition dans le temps (TDM) qui module une seule porteuse descendante à haut débit. Cette dernière est amplifiée grâce à un amplificateur d'un transpondeur fonctionnant à la saturation. [Réf 2]



FigureII-2 : Répéteur Régénérateur

3- Réutilisation de fréquence :

La réutilisation de fréquence consiste à utiliser la même bande de fréquence plusieurs fois de façon à augmenter la capacité du réseau sans augmenter la largeur de bande assignée. Elle peut être réalisée par un faisceau donné en employant diverses polarisations telles que les polarisations orthogonales où deux porteuses à la même fréquence sont reçues par l'antenne du satellite selon leurs polarisations horizontale et verticale (fig.II-3-a). Pour un satellite multifaisceaux (Fig.II-3-b), la réutilisation de fréquence se fait grâce à la directivité de ses antennes (deux stations situées dans deux faisceaux séparés peuvent émettre à la même fréquence).

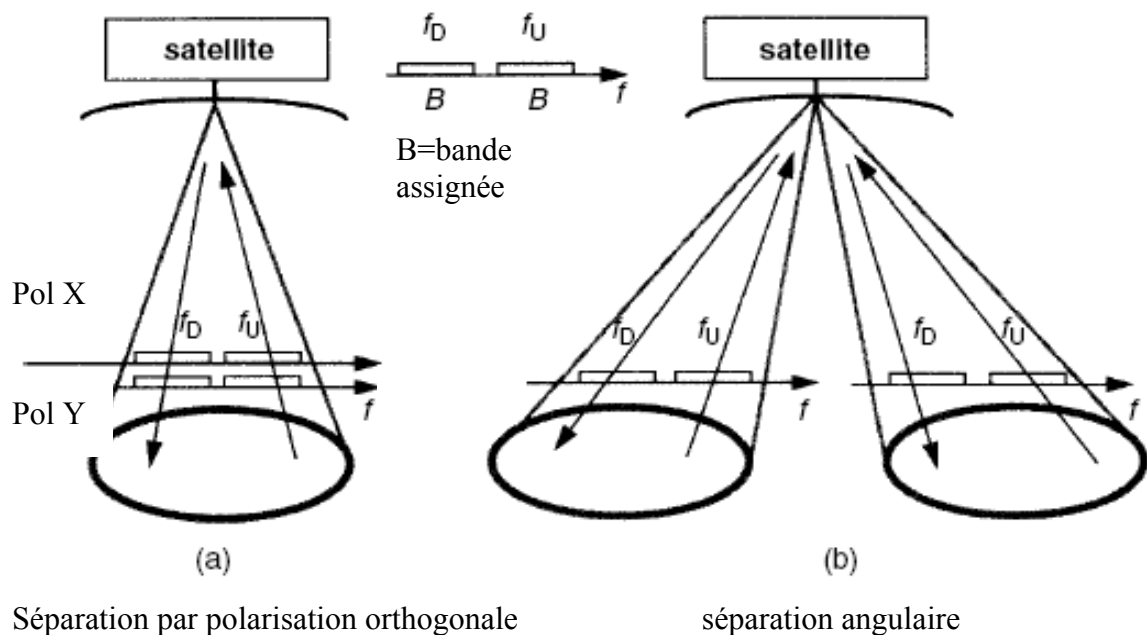


Figure II-3 : Réutilisation de fréquence

4- Installation au Sol :

4-1- Installation du Hub et des VSAT:

L'installation du Hub est complexe et chère vue son volume d'équipements, ce qui nécessite des travaux de génie civil qui prennent du temps. La difficulté majeure pour l'installation des stations VSAT revient à leur multiplicité à travers une large surface avec le grand nombre d'utilisateurs qu'elles relient. Les VSAT peuvent être montées sur un toit, sur un mur ou par terre.

4-2- Pointage des antennes :

Le pointage des antennes se fait de manière à avoir le maximum de puissance transmise et reçue de/ou vers le satellite et les stations terriennes.

Deux angles définissent la procédure de pointage :

- L'angle d'Azimut (Az) : c'est un mouvement de rotation dans un plan parallèle à la surface de la terre. Il est donné suivant la table ci-dessous :

	Satellite Est/à la station terrestre	Satellite Ouest/à la station terrestre
Nord hémisphère	$A = 180^\circ - a$	$A = 180^\circ + a$
Sud hémisphère	$A = a$	$A = 360^\circ - a$

$$a = \arctg \left(\frac{\operatorname{tg} L}{\sin l} \right) \quad [\text{Réf 3}]$$

l : latitude de la station terrienne

L : la différence entre la longitude du satellite et celle de la station terrienne.

- L'angle d'élévation E : mouvement d'élongation réglable par une vis. Il est donné par :

$$E = \operatorname{Arctg} \left[\frac{\frac{\cos \phi - R_e}{R_e + R_0}}{(1 - \cos^2 \phi)^{1/2}} \right] \text{ en Degré} \quad [\text{Réf 3}]$$

avec : $\cos \phi = \cos l \cdot \cos L$

R_e : rayon de la terre = 6378 Km

R_0 : altitude du satellite = 35786 Km (satellite géostationnaire).

ES : la station terrienne

SL : le satellite

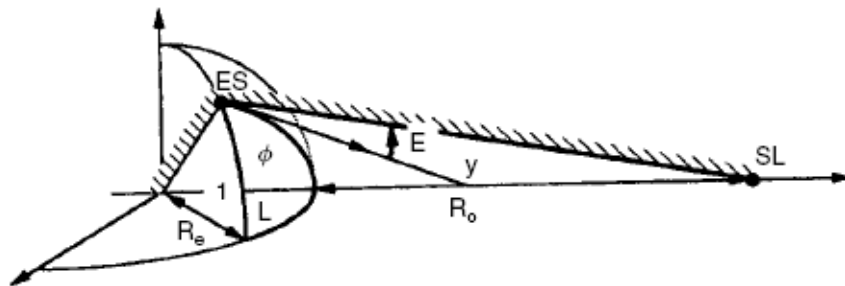


Figure II-4 : Angle d'élévation

5- Soucis des clients :

5-1- Flexibilité :

L'un des avantages principaux des réseaux VSAT est l'addition de nouvelles bornes sans toucher au reste du réseau. Cependant les performances du réseau et donc la qualité des services délivrés à l'utilisateur sont fonction de la quantité du trafic qui augmente avec l'ajout de nouvelles stations. Il est donc important de fournir une capacité disponible au segment spatial et au Hub plus que celle prévue au commencement.

5-2- Rétablissement d'échec :

La technologie VSAT est encore nouvelle pour les opérateurs des réseaux. Il est donc important de penser à faire face aux échecs qui peuvent avoir lieu en établissant des surveillances d'échec et des procédures de restauration :

- L'échec d'un équipement du Hub peut seulement affecter certaines fonctions, ses opérations peuvent être reprise immédiatement par une station fixe ou transportable correctement équipée sans changer le satellite ni les VSAT. Les échecs des stations terriennes sont déterminés par le système de gestion de réseau (NMS). Quand l'échec menace l'intégrité du réseau, par exemple : si la transmission altérée de la station VSAT produit d'interférences à d'autres liaisons, la transmission doit être arrêtée immédiatement.
- Les échecs de satellite sont rares mais au dessus de sa durée de vie, certains genres d'échecs peuvent se produire :

- le dépointage du satellite est l'évènement le plus probable. Cependant il ne prend normalement pas plus de quelques heures pour ramener le satellite à sa position angulaire initiale
- L'échec d'un transpondeur exige le décalage du réseau à un autre transpondeur sur le même satellite. Cette possibilité dépend fortement des conditions des contrats entre l'opérateur du satellite et l'opérateur du réseau. La migration à un autre transpondeur sur le même satellite implique le changement de fréquences de fonctionnement ou la polarisation du réseau entier.

En conclusion là où il existe une possibilité d'échec total d'un satellite, le transfert du réseau à un autre satellite est une solution, ceci implique la réorientation des antennes des VSAT qui peut être faite manuellement avec un temps élevé ou automatiquement à un coût important.

De toute façon, la panne partielle ou complète du réseau peut être évitée si les raccordements terrestres de secours sont disponibles.

5-3- Probabilité de blocage :

Les demandes de communications des stations entre elles ou avec le hub sont gérées par le (NMS). Ces communications sont effectuées seulement si la capacité du réseau est disponible sinon dans le cas de sa congestion elles sont bloquées. Pour les réseaux VSAT les probabilités de blocage sont de 0,1% jusqu'à 1%.

5-4- Temps de réponse :

C'est le temps mis pour établir une liaison entre deux interlocuteurs pour la transmission de la voix, ou bien le temps écoulé entre l'appui sur la clef de retour du clavier d'ordinateur et l'apparition du premier caractère sur l'écran du destinataire pour la transmission de message. Le temps de réponse pour le transfert de données résulte du:

- délai d'attente dans le côté transmission.
- temps de transmission de message qui dépend de la longueur du message et du débit binaire de la transmission.
- temps de propagation qui dépend de l'architecture du réseau.
- Durée de la transformation du message au récepteur
- Temps de retard produit par le protocole utilisé comme résultat de rétablissement d'erreurs.

5-5- Qualité de liaison :

La qualité de transmission numérique de la voix et de la vidéo prend comme paramètre significatif le taux d'erreur binaire (BER) qui ne dépasse pas 10^{-7}

pour une qualité de transmission acceptable. Pour la transmission de données, le BER n'intervient pas car les erreurs sont corrigées grâce aux protocoles qui sont habituellement mis en application entre les bornes bout à bout. Cependant, ces protocoles de correction d'erreur introduisent un délai de transmission important.

5-6- Disponibilité :

La disponibilité d'un équipement est définie par :

$$A(\%) = 100 \frac{\text{temps_fonctionnel}}{\text{temps_total}}$$

Temps fonctionnel = temps total – temps de panne.

La disponibilité du réseau est donnée par :

$$A_{\text{net}} = A_{\text{Tx}} A_{\text{Sat}} A_{\text{liaison}} A_{\text{Rx}}$$

A_{net} : disponibilité du réseau

A_{Tx} : disponibilité de la station émettrice

A_{Sat} : disponibilité du satellite

A_{liaison} : disponibilité de la liaison

A_{Rx} : disponibilité de la station réceptrice

a- Disponibilité de la station terrienne :

Elle dépend du dépointage des antennes qui peut se produire en raison de contraintes mécaniques dures sur le réflecteur d'antenne, résultant des événements météo logiques. L'échec d'un équipement peut aussi influencer la disponibilité des VSAT en termes de temps de réparation.

b- Disponibilité du segment spatial :

Il y a deux aspects à cet égard :

- Disponibilité de la capacité pour faire face à la croissance du trafic ou à la demande inattendue d'une variété de services.
- Disponibilité d'autres transpondeurs si un transpondeur ou tout le satellite tombe en panne

c- Disponibilité de liaison :

La disponibilité d'une liaison exige que le bilan de la liaison en terme de rapport puissance de la porteuse sur densité spectrale du bruit ($\frac{C}{N_o}$) soit plus

grand qu'une valeur donnée. $\frac{C}{N_o}$ Change selon les effets de propagation et de la position relative du soleil dans l'axe entre le satellite et la station. Ces effets

tendent à réduire le rapport $\frac{C}{N_o}$ et par conséquent la réduction de la qualité du signal en bande de base.

5-7- Maintenance :

La maintenance concerne les équipements sur terre (les VSAT et le Hub) ; l'entretien du Hub est la responsabilité de l'opérateur du réseau et l'entretien des VSAT s'exécute par les personnes locales responsables des autres fonctions.

5-8- le Coût du réseau:

Le coût dépend du nombre de stations dans le réseau. La disponibilité demandée a un impact fort sur le coût de réseau, donc l'utilisateur ne doit demander des caractéristiques serrées à moins que strictement nécessaires.

Le coût dans le cas de la technologie VSAT ne dépend pas de la distance contrairement aux liaisons terrestres ce qui la favorise.



Chapitre III



***GESTION DE
RESEAUX***

1- INTRODUCTION :

Les réseaux VSAT offrent habituellement des services de communication entre les bornes d'utilisateurs. Pour ce faire, ils doivent pouvoir établir des connexions entre les utilisateurs émetteurs et les destinataires. Ces connexions se font grâce aux protocoles, aux politiques d'accès, ainsi qu'aux modulations utilisés.

2-PROTOCOLES :

Le protocole désigne l'ensemble de règles et de procédures permettant de gérer la transmission de l'information entre les utilisateurs. Les protocoles utilisés pour la transmission de la voix et de la vidéo sont plus simples que ceux utilisés pour la transmission de données qui exige une architecture fonctionnelle en couches. Un exemple d'une telle architecture est le model OSI (Interconnexion des systèmes ouvert) développée par l'organisation internationale de normalisation (ISO).

2-1- Model de référence OSI pour la transmission de données :

Le model OSI défini pour l'interconnexion, à travers des réseaux ouverts, d'équipements éventuellement hétérogènes. Il est structuré en sept couches décrites dans la figure (III-1). Chaque couche dialogue avec son homologue dans le système destinataire, par l'intermédiaire des couches inférieures, en utilisant un protocole spécifique. Elle ajoute des informations de gestion ou de contrôle, sous forme d'entête, aux informations qu'elle reçoit de la couche supérieure (encapsulation).

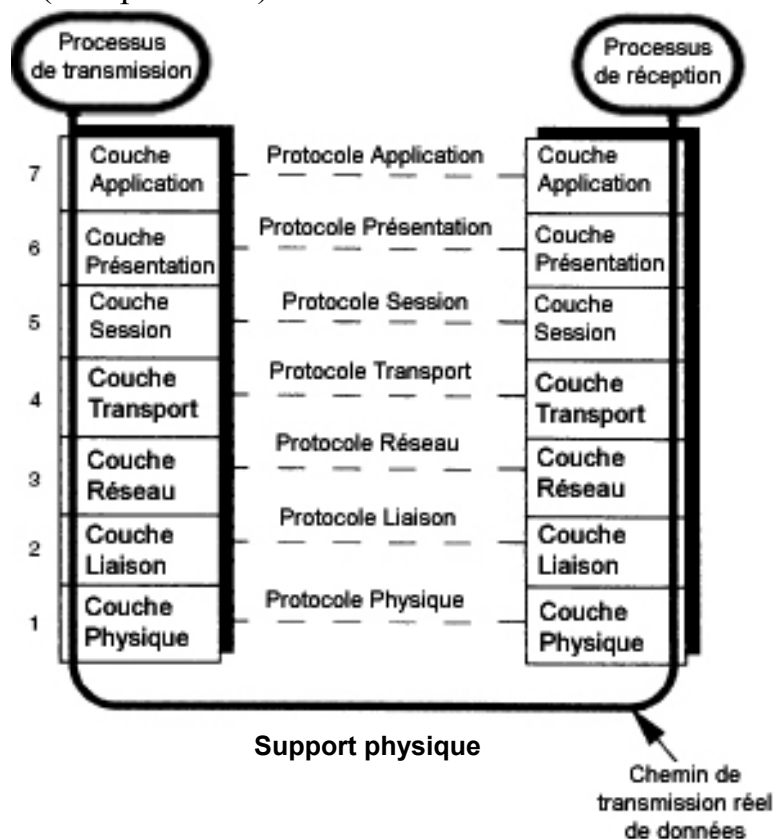


Figure III-1 : Architecture OSI

2-1-1- Couche physique :

Elle traite le transfert actuel de l'information via le support physique, et décrit les caractéristiques logiques et physiques de la connexion de la station au réseau.

2-1-2- Couche liaison :

Elle assure la livraison fiable des données sous forme de trames à travers le lien physique. Il permet l'identification des trames grâce à leurs entêtes, la détection et la correction d'erreurs avec des protocoles de retransmission, ainsi que le contrôle de flux de données pour éviter la saturation d'un récepteur lent par un émetteur plus rapide.

2-1-3- Couche réseau :

Elle est responsable du routage des paquets de données, ce qui implique l'identification de la destination (fonction d'adressage) et du chemin ainsi que le contrôle du flux et de la taxation.

2-1-4- Couche transport :

Elle fournit un service de transport correct de données de bout en bout. L'émetteur segmente le message de données et le récepteur le reconstitue, en remplaçant les segments dans le bon ordre. Elle permet également le multiplexage des données provenant de plusieurs émetteurs.

2-1-5- Couches hautes :

Elles regroupent la couche session, la couche présentation et la couche application. Elles sont toutes des couches de bout en bout. Ces couches n'interviennent pas pour le réseau VSAT.

2-2- Configuration physique :

Le réseau VSAT fournit des connexions entre les utilisateurs reliés aux stations VSAT et ceux reliés à l'ordinateur principal. La figure (III-2) montre deux représentations pour les terminaux finals (ordinateur principal et l'utilisateur final). Une d'entre elles représente une configuration physique indiquant le type d'équipements que supporte la connexion. Quant à l'autre, elle représente la configuration du protocole constitué de sept couches au niveau de l'utilisateur et l'ordinateur principal. Ces dernières sont réduites à trois couches au niveau de l'interface en bande de base des VSAT et celle du hub. Une telle configuration permet la conversion du protocole appelé « Emulation ».

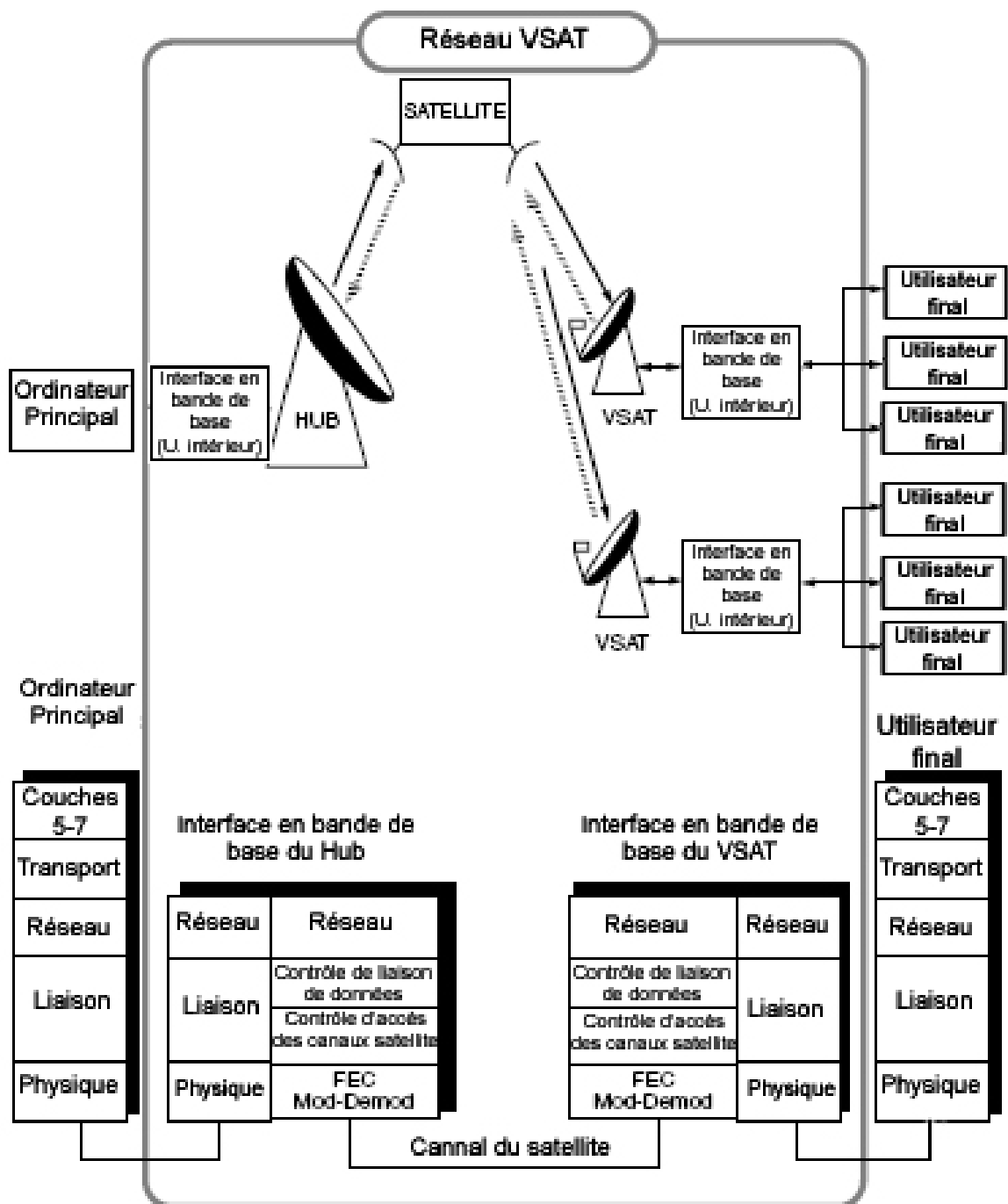


Figure III-2 : Configuration Physique du Réseau VSAT

2-3- Conversion de Protocole (Emulation) :

Les protocoles utilisés pour les liaisons terrestres diffèrent de ceux valables pour les liaisons par satellite. Cette différence revient aux caractéristiques du canal du satellite, dont les informations sont transmises par les liaisons radiofréquences. Ces dernières sont caractérisées par un délai de propagation

et un taux d'erreur binaire (BER) importants comparés aux liaisons terrestres. Par conséquent, la conversion de ces protocoles au niveau des interfaces en bande de base avec le hub et les VSAT est nécessaire.

L'émulation du protocole de la couche réseau effectue un map d'adressage. Ceci permet de séparer les adresses du réseau de celles des clients.

La couche liaison de données est constituée de deux sous-couches, dont l'une sert pour le contrôle de la liaison de données des liens par satellite indépendamment du contrôle de la liaison de données entre les interfaces des VSAT et les terminaux finals, l'autre sous-couche permet le contrôle d'accès au canal satellite.

La couche physique indique l'interface physique nécessaire pour la connexion.

2-4- Raisons de conversion du protocole :

Le délai de propagation et le taux d'erreur binaire (BER) agissent sur les protocoles des liaisons terrestres quant ils sont utilisés pour les liaisons par satellite.

2-4-1- Effet sur le contrôle des erreurs:

Au cours d'une transmission de données entre l'ordinateur principal et l'utilisateur final, le contrôle d'intégrité des données est assuré par les protocoles de retransmission automatique (ARQ) qui sont :

- Protocole d'arrêt et attente de l'accord (SW) : l'ordinateur principal attend la réception d'un accusé positif (ACK) avant la transmission de la trame suivante. Si l'accusé est négatif, il retransmet la même trame.

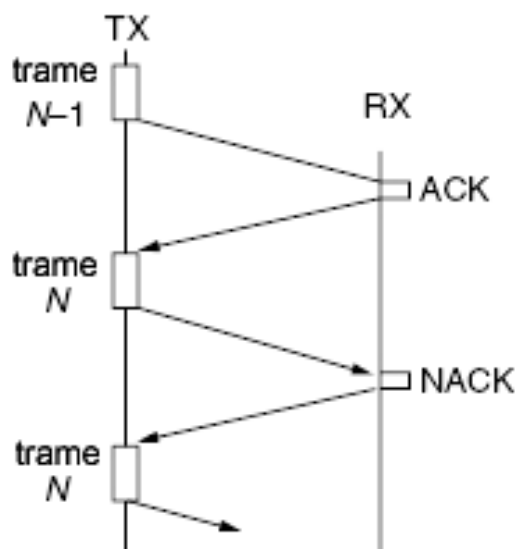


Figure III-3 : Protocole SW

- Protocole (GBN) : la transmission est continue et la reprise se fait à partir de la trame erronée, lorsqu'on reçoit une demande de répétition (accusé de réception négatif NAK)

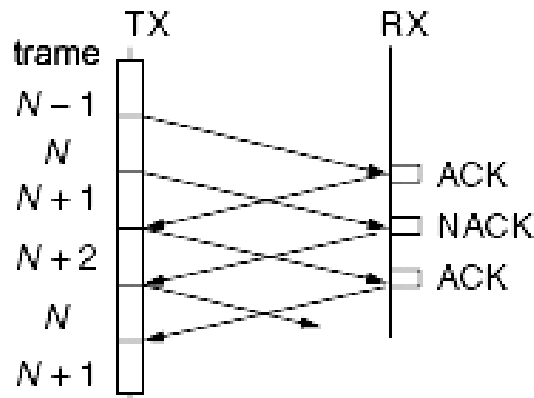


Figure III-4: Protocole GBN

- Protocole (SR) : la transmission est continue et la reprise de la trame erronée se fait après la transmission de la trame en cours.

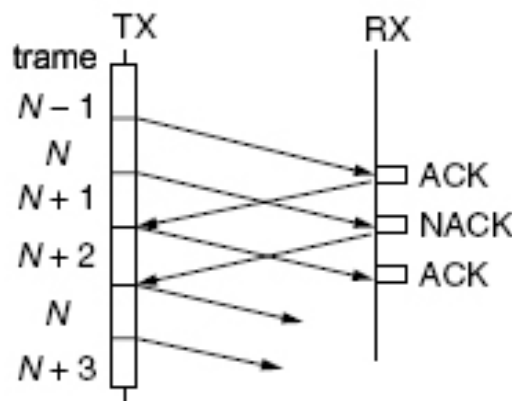


Figure III-5 : Protocole SR

Le temps de transmission entre trames (T_{RT}) correspond à l'addition de :

- Temps de traitement (L/R_b) de la trame et temps (A/R_{back}) de l'accusé de réception.
Avec : L : longueur de la trame (en bits)
 R_b : débit binaire de l'information (bit/s)
 A : longueur de la trame d'accusé (en bits)
 R_{back} : débit binaire de l'accusé de réception (bit/s)
- Délai de propagation (T_p) en second

Le temps T_{RT} est donc donnée par :

$$T_{RT} = \frac{L}{R_b} + 2T_p + \frac{A}{R_{back}} \dots\dots (2-1)$$

Généralement (A/R_{back}) est négligeable devant (L/R_b) d'où l'équation (2-1) devient :

$$T_{RT} = \frac{L}{R_b} + 2T_p$$

Cette équation montre l'influence du délai de propagation sur les protocoles précédents par les liaisons satellites.

L'efficacité du canal pour chacun des trois protocoles cités est donné par :

$$\eta_{cSW} = \frac{D(1 - P_f)}{(R_b T_{RT})} \quad \text{Protocole SW}$$

$$\eta_{cGBN} = \frac{D(1 - P_f)}{(L(1 - P_f) + R_b T_{RT} P_f)} \quad \text{Protocole GBN}$$

$$\eta_{cSR} = \frac{D(1 - P_f)}{L} \quad \text{Protocole SR}$$

D : nombre de bits d'information par trame (bits)

L : longueur de la trame (bits)

P_f : probabilité que la trame soit erronée = $1 - (1 - BER)^L$

Les trois formules montrent que l'efficacité du canal est fonction du BER. Cette dernière se dégrade avec le BER.

2-4-2- Effet sur le contrôle de flux :

Les protocoles au niveau de la couche liaison et de la couche transport utilisent des fenêtres coulissantes pour le contrôle de flux. Les fenêtres à l'émission contiennent un nombre limité de trames émises séquentiellement par l'émetteur. La réception d'un accusé positif d'une trame entraîne le glissement de la fenêtre à la trame suivante. En absence de l'accusé de réception, l'émetteur retransmet la même trame. Réciproquement, le récepteur accepte un nombre limité de trames et la fenêtre glisse à chaque fois qu'un accusé de réception positif de la trame précédente est émis vers l'émetteur.

Les liaisons par satellite exigent une longueur de fenêtre (nombre de trames que peut supporter la fenêtre) importante pour être efficaces comparées aux liaisons terrestres. En effet, si la fenêtre n'est pas assez large, l'émetteur sera bloqué. Ce dernier doit attendre un accusé de réception pour pouvoir émettre de nouveau. Pendant ce temps d'attente le canal du satellite n'est pas utilisé d'où la réduction de l'efficacité du canal.

2-4-3- Interrogation des utilisateurs finals :

La technique d'élection consiste à faire connecter l'ordinateur principal à plusieurs utilisateurs finals. L'ordinateur principal demande aux utilisateurs individuellement de lui transmettre les données qu'ils possèdent.

Chacun de ces derniers répond avec un accusé de réception suivi de données, s'il y en a. Réciproquement l'ordinateur principal envoie les données qu'il possède à chaque utilisateur et reçoit leurs accusés de réception. Cette technique utilisée pour les liaisons terrestres n'est pas valable pour les liaisons par satellite vue le délai de propagation (la somme des délais entraînés par chaque connexion) important qu'elle entraîne. Pour réduire cet inconvénient, la solution est de ne faire passer par le satellite que les accusés suivis de données.

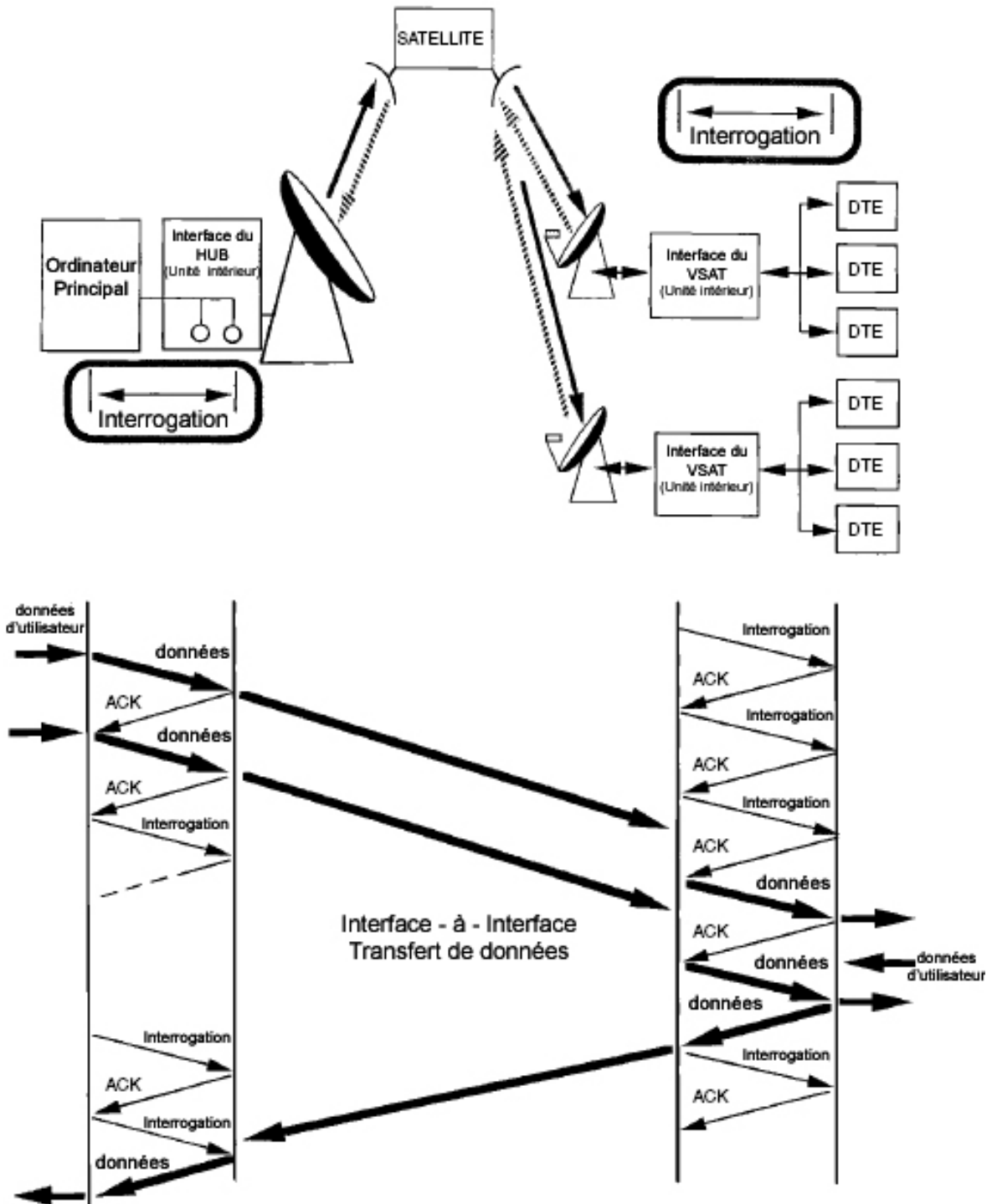


Figure III-6 : Interrogation à travers le réseau VSAT

3- ACCES MULTIPLE :

Les stations VSAT communiquent entre elles à travers le satellite par les porteuses modulées. Ces dernières attaquent simultanément le même transpondeur du satellite.

Pour les réseaux unidirectionnels où le hub diffuse ses données aux VSAT en utilisant le multiplex TDM, une seule porteuse est transmise au transpondeur du satellite. Cependant pour les réseaux bidirectionnels (maillés ou étoilés) plusieurs porteuses concurrencent pour accéder à un même transpondeur du satellite, d'où la nécessité d'un protocole d'accès multiple.

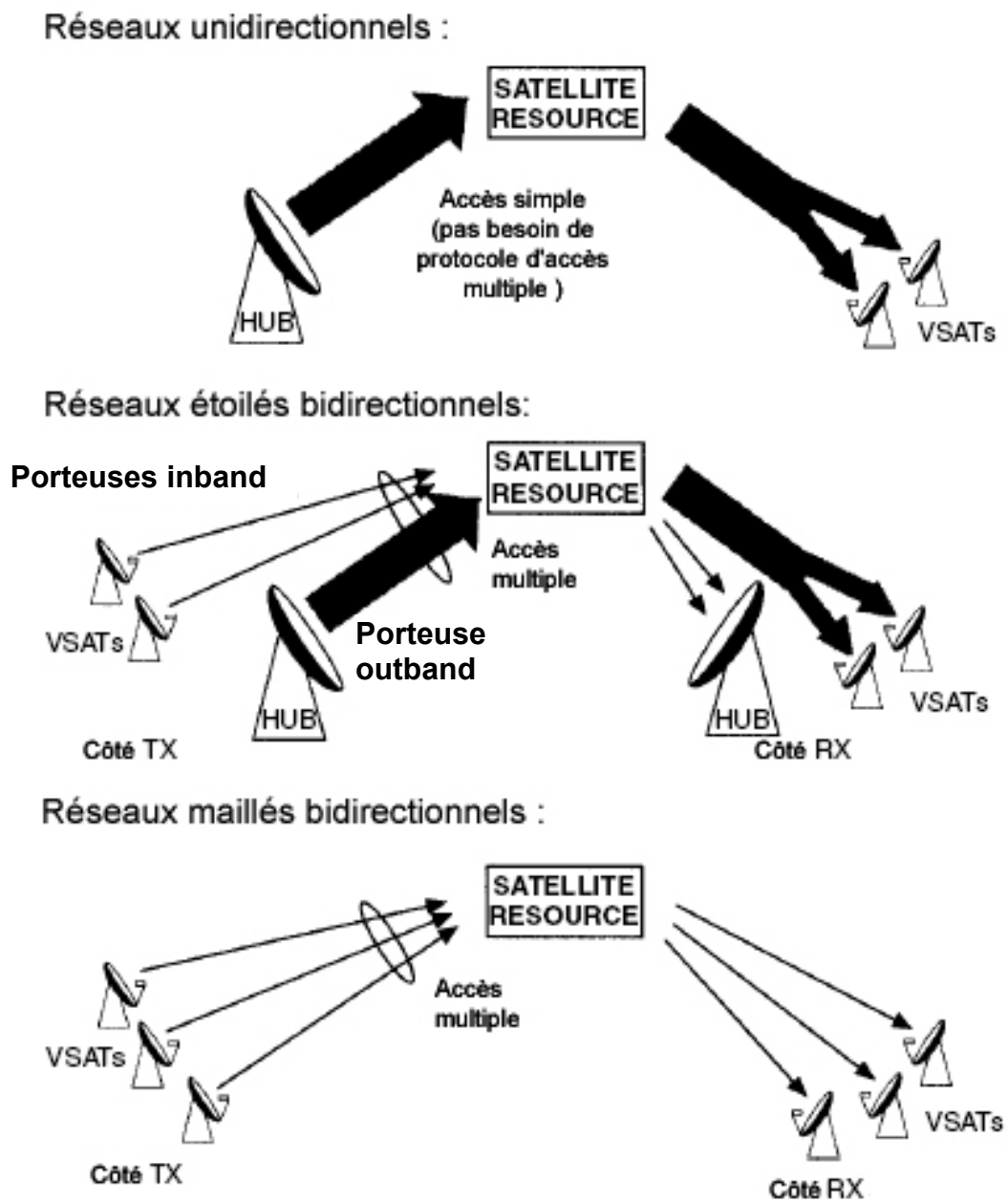


Figure III-7: Accès multiple pour différentes configurations de réseau VSAT

3-1- Protocole d'accès multiple :

La mise en place des politiques d'accès aux canaux satellite permet à plusieurs stations terriennes d'accéder à un même canal de transmission et l'exploitation maximale des transpondeurs du satellite tout en garantissant qu'il y ait le moins de collisions possibles. Ces politiques d'accès sont :

3-1-1- Accès multiple par répartition en fréquence (FDMA) :

Elle consiste à découper la bande de fréquence en n sous bande permettant à chaque station d'émettre indépendamment des autres stations. La bande assignée à chaque porteuse dépend du débit binaire qu'elle véhicule et du type de modulation utilisée.

3-1-2- Accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) :

Elle consiste à découper le temps en plusieurs tranches qui sont affectées aux stations terriennes. Ces dernières émettent successivement vers le canal satellite avec la même fréquence tout en utilisant la totalité de la bande passante. Par ailleurs, cette technique nécessite la synchronisation des trames de chaque station pour éviter le chevauchement des signaux.

3-1-3- Accès multiple à répartition de code :

Consiste à attribuer un code identifiant chaque station émettrice qui est connu par les stations réceptrices. Toutes les stations émettent sur le même canal en même temps à la même fréquence mais avec des codes différents.

3-2- Application sur les réseaux VSAT :

3-2-1- pour le réseau maillé :

Dans un réseau VSAT, chaque station terrienne peut établir des connexions avec toutes les autres par l'intermédiaire du satellite. Pour la connexion unidirectionnelle, la porteuse véhiculant les informations est une porteuse monovoie (SCPC). La connexion bidirectionnelle entre deux utilisateurs finals nécessite deux porteuses monovoie, chacune dans un sens.

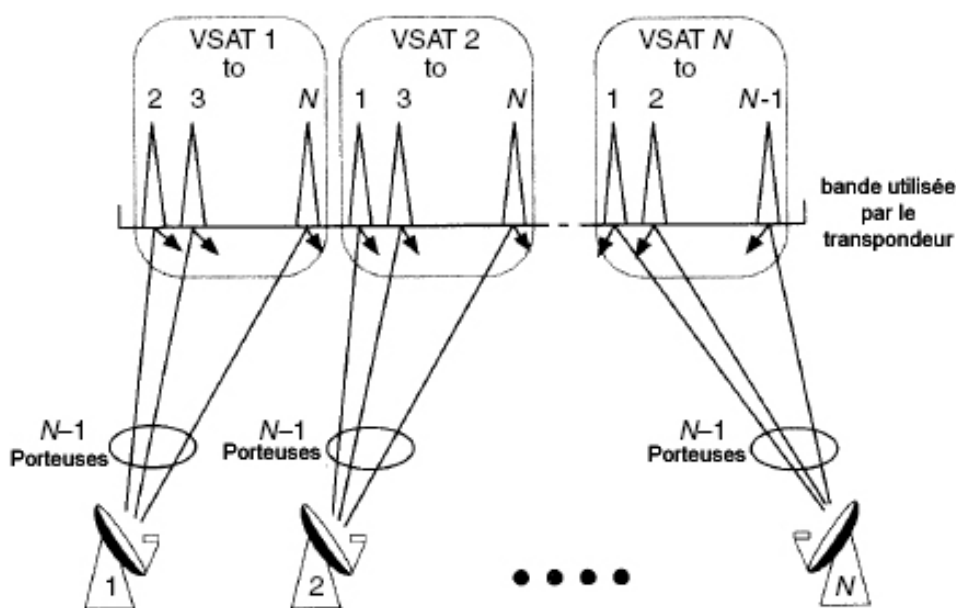


Figure III-8: Réseau maillé

La figure (III-8) présente un exemple de réseau maillé contenant N stations VSAT, où chacune transmet des porteuses monovoies en utilisant l'accès multiple à répartition en fréquence (FDMA). Une telle configuration exige que toute station VSAT soit occupée de (N-1) émetteurs et récepteurs. Les (N-1) porteuses émises par chaque station peuvent être multiplexées en une seule porteuse monovoie (MSPC). La station émet donc avec un seul émetteur et reçoit les porteuses qui lui sont destinées avec (N-1) récepteurs. Ces derniers peuvent être limités en un seul récepteur en utilisant la technique TDMA pour des connexions temporaires.

3-2-2- Pour les réseaux étoilés :

Dans un réseau étoilé contenant le hub et N VSAT, chaque station peut transmettre jusqu'à K porteuses. Ces dernières peuvent accéder au satellite de différentes manières :

a- Porteuse monovoie vers le hub et VSAT en FDMA :

La figure (III-9) donne un exemple des connexions bidirectionnelles entre les N VSAT et le hub. Chaque connexion se fait par deux porteuses monovoies. Toute station VSAT doit donc avoir K modulateurs et K démodulateurs, de même, le hub doit contenir N modulateurs et démodulateurs. Cette technique est coûteuse pour un réseau contenant un nombre important de VSAT.

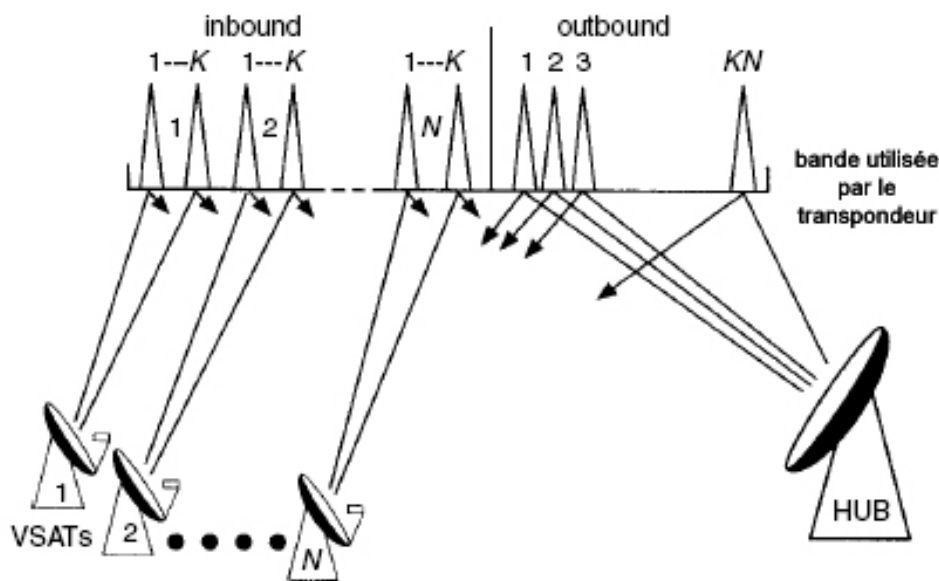


Figure III-9 : Connexion bidirectionnelle avec porteuses monovoies

b- Porteuse monovoie vers le hub / multivoies vers les VSAT en FDMA

Considérant que chaque porteuse transmise par le hub est reçue par toutes les VSAT, le nombre des modulateurs au niveau du hub peut être réduit (comme

est indiqué sur la figure (III-10)) par le multiplexage TDM du trafic circulant du hub vers toutes les stations VSAT en une seule porteuse multivoies.

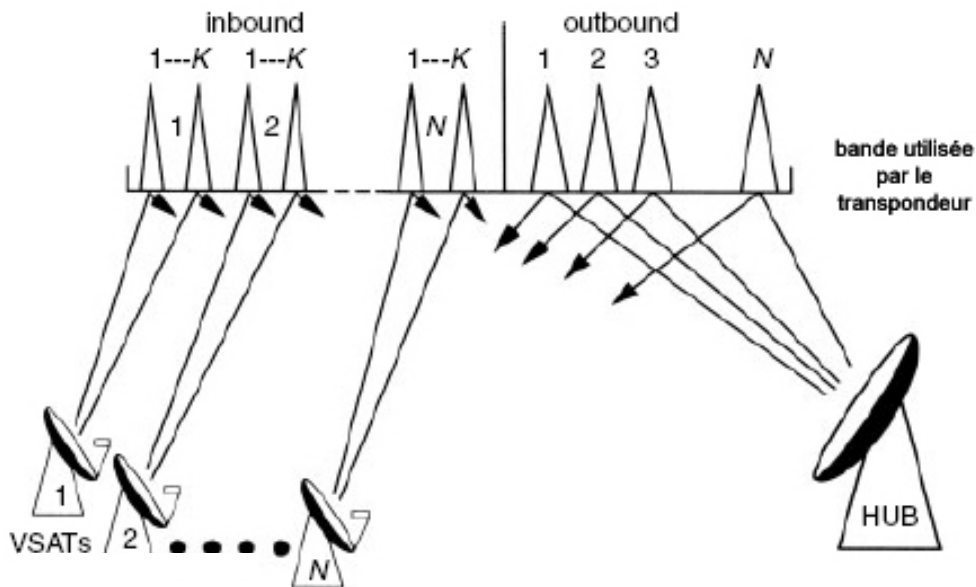


Figure III-10 : Connexion avec porteuses monovoie vers le hub, multivoies vers les VSAT en FDMA

c- Porteuse monovoie vers le hub en FDMA/porteuse multivoies vers les VSAT en TDM :

Le nombre des modulateurs au niveau du hub, ainsi que le nombre des démodulateurs au niveau des VSAT, peuvent être réduits en un seul grâce au multiplex TDM des porteuses multivoies provenant du hub.

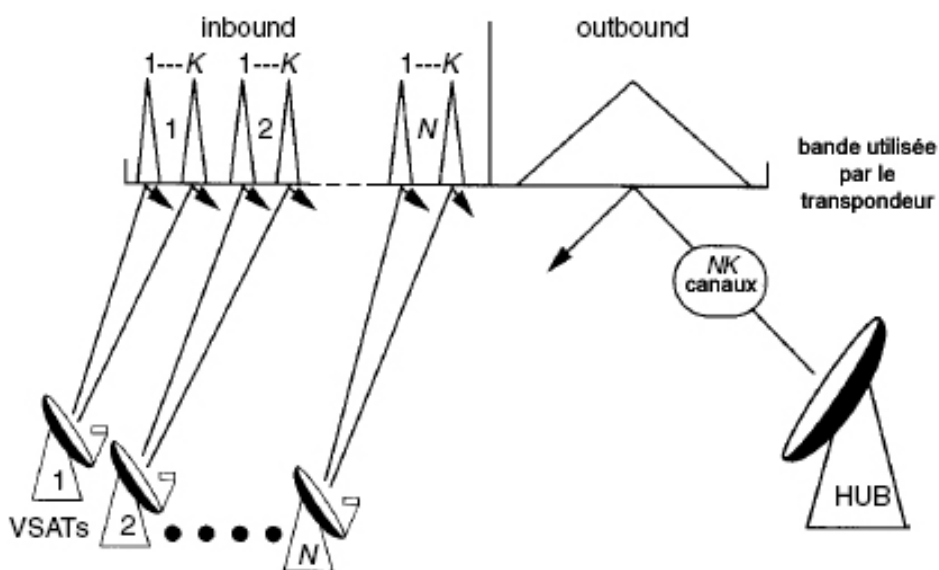


Figure III-11 : Connexion avec porteuses monovoie vers le Hub, multivoies vers les VSAT en TDM

d- Porteuse multivoies vers le hub en FDMA/porteuse multivoies vers les VSAT en TDM :

Le nombre des modulateurs de chaque station VSAT peut être réduit en un seul modulateur (comme l'indique la figure III-12) grâce au multiplex TDM des K porteuses en une seule porteuse multivoies. Le hub est alors équipé de N démodulateurs.

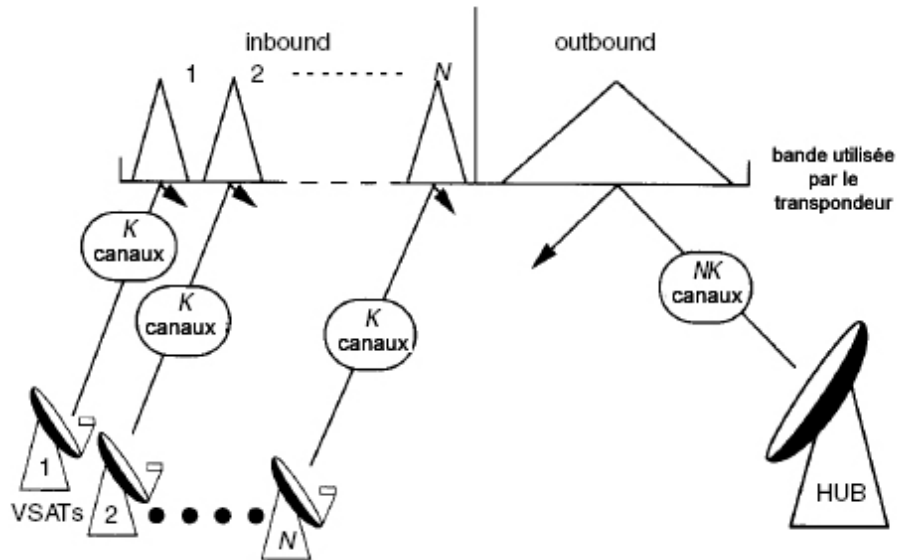


Figure III-12 : *Porteuses multivoies vers le hub et VSAT*

e- Porteuse en TDMA vers le hub / porteuses multivoies vers les VSAT en TDM :

Les stations VSAT transmettent successivement leurs porteuses à la même fréquence et à la même bande passante.

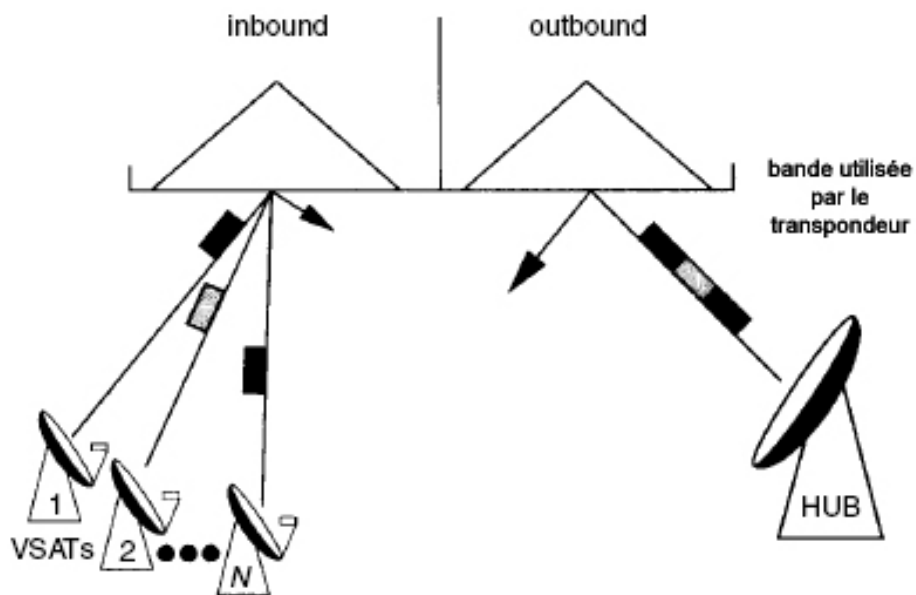


Figure III-13 : *Porteuses en TDMA vers le hub, en TDM vers les VSAT*

f- Porteuses combinées en TDMA vers le hub / porteuse multivoies vers les VSAT en FDMA :

Pour minimiser les exigences en puissance des émetteurs des VSAT par réduction du débit binaire, une meilleure solution est d'organiser les VSAT en groupes. Les stations de chaque groupe accèdent au satellite en TDMA alors que l'accès des groupes au satellite se fait en FDMA.

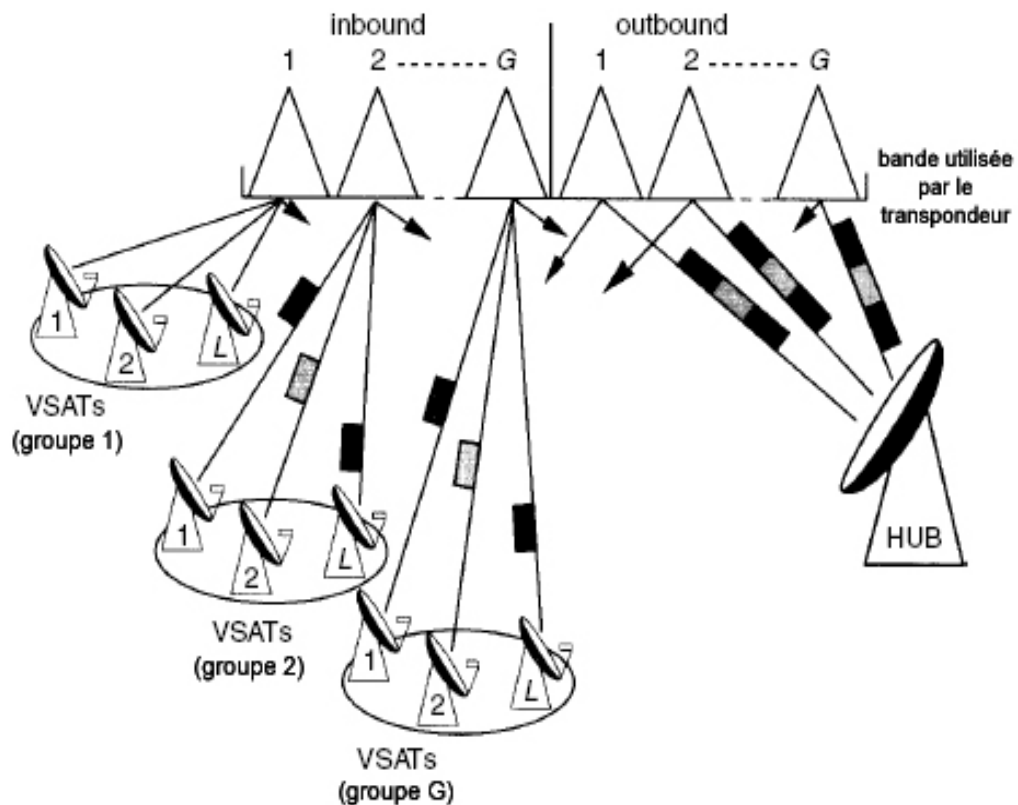


Figure III-14 : *Porteuses combinées en TDMA vers le hub, en FDMA vers les VSAT*

g- Par la technique CDMA :

La figure (III-15) illustre les techniques d'accès CDMA et CDMA combinée avec FDMA pour les porteuses monovoie ou multivoies

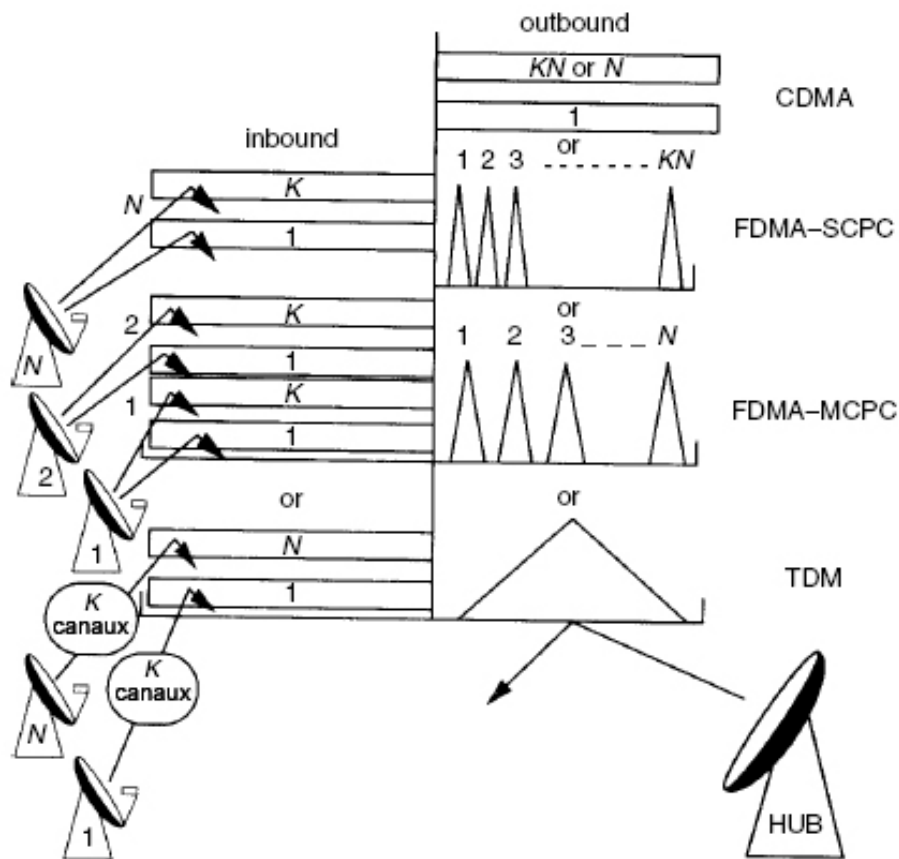


Figure III-15 : Connexion avec CDMA

3-3- Assignment fixe et demande d'assignment :

3-3-1- Assignment fixe avec FDMA :

Il consiste à allouer une bande de fréquences à chacune des K porteuses émises par une station VSAT.

La figure (III-16) donne un exemple du principe d'un assignment fixe en FDMA où toute station parmi les N que le réseau contient, émet une seule porteuse ($K=1$) à un débit binaire R_c .

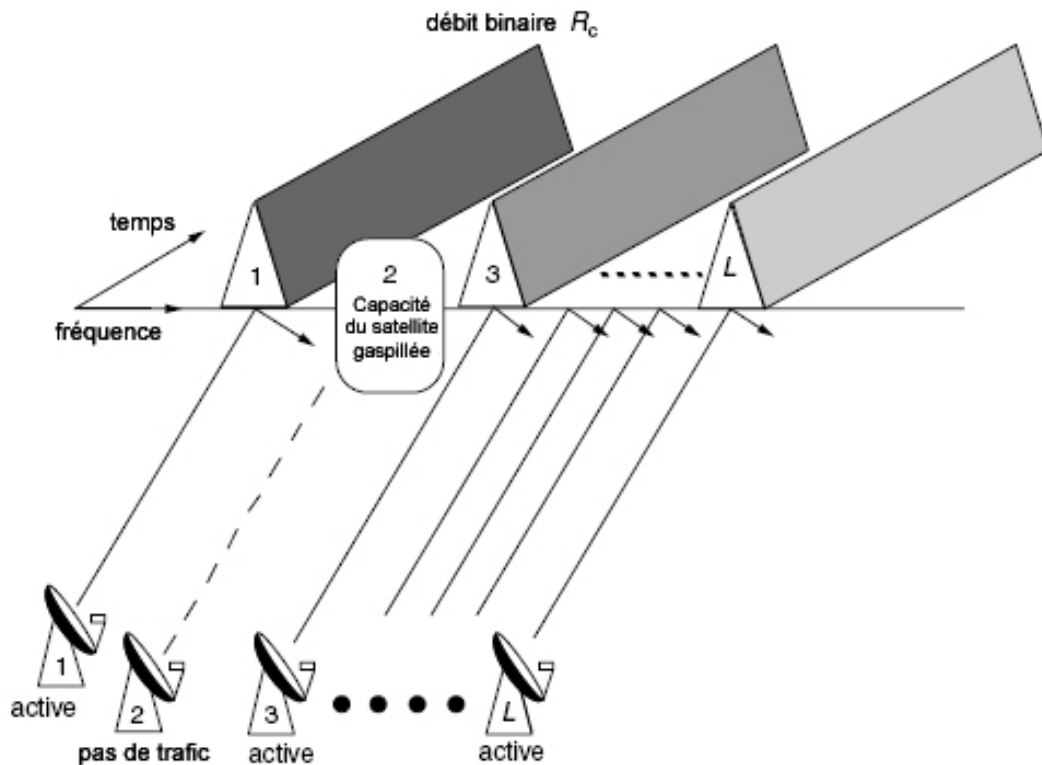


Figure III-16 : *Assignement fixe en FDMA*

L'assignement fixe est simple et aucune porteuse ne risque d'être rejetée (la probabilité de blocage est nulle). Toutefois le blocage peut se produire au niveau des utilisateurs connectés à une VSAT donnée, s'ils veulent transmettre simultanément leurs porteuses. Pour éviter ce blocage, chaque utilisateur doit disposer d'un canal en permanence au niveau du satellite, ce qui est coûteux en bande passante.

3-3-2- Accès multiple à la demande d'assignement (DAMA)

Avec cette technique, la station VSAT reçoit une demande d'appel d'un utilisateur qu'elle relie et la signale au hub à travers un canal de signalisation. Celui-ci transmet un assignement au terminal destinataire et attend un message d'acceptation de l'appel, puis répond à la station VSAT en lui allouant la capacité demandée sous forme d'une bande de fréquences, d'un intervalle de temps ou d'un code s'il est disponible.

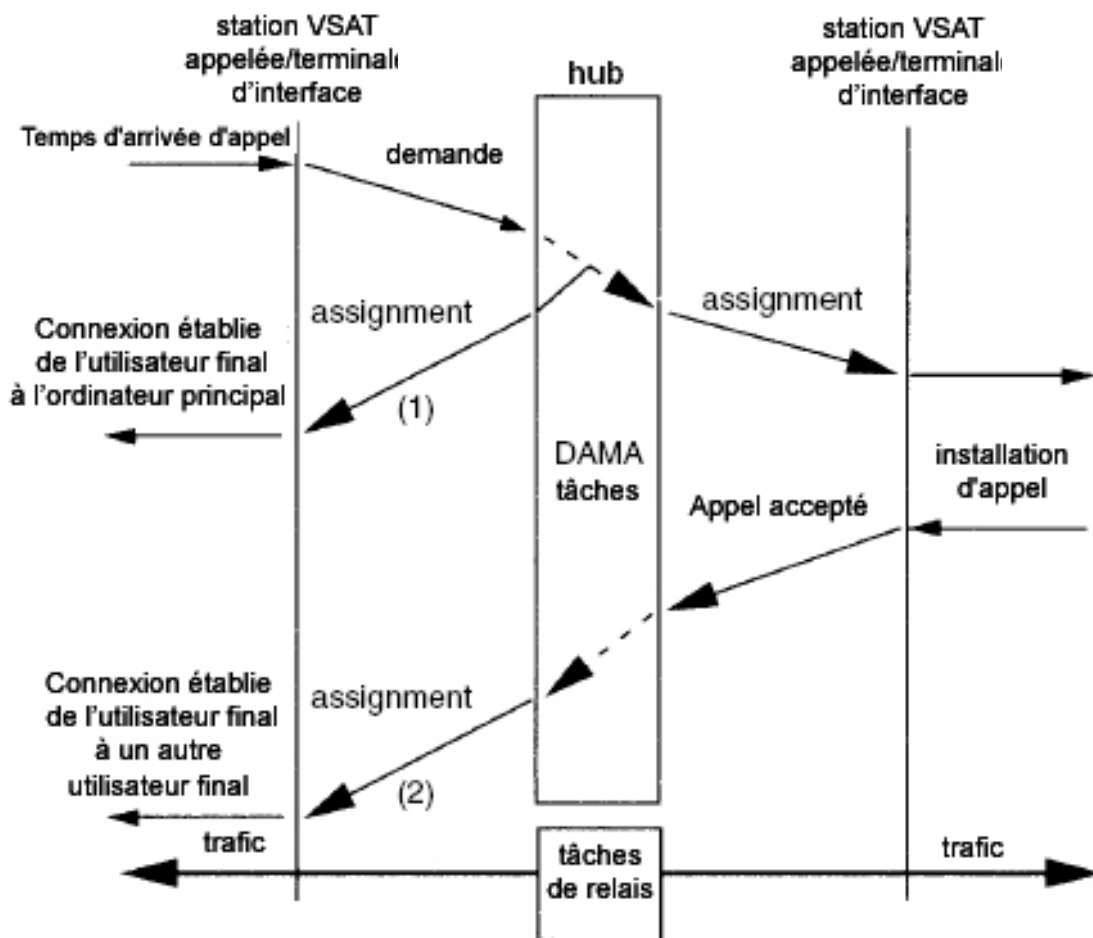


Figure III-17 : Accès multiple à demande d'assignement

Les canaux de signalisation sont accordés aux VSAT en assignement fixe, ce qui limite le nombre de VSAT dans le réseau. Une meilleure solution est d'accéder à ces canaux de signalisation par une technique d'accès aléatoire.

3-4- Politiques d'accès aléatoires :

Les politiques d'accès aléatoires pour les réseaux satellite sont les même que celles définies pour les réseaux locaux. Nous allons définir successivement : la technique Aloha, Aloha en tranche, Aloha à retransmission sélective (SREJ) et Aloha avec réservation.

3-4-1- Technique Aloha :

Les stations VSAT émettent d'une façon inconditionnelle des paquets dès qu'ils sont à leurs possessions. Il n'y a pas d'écoute du support avant la transmission. De plus, le temps de propagation des signaux sur le canal satellite est un facteur contraignant, car les stations sont averties d'une collision seulement après un temps égal au double saut. Dans le cas d'une

collision, la station retransmet les paquets après un délai aléatoire. Cette technique d'accès a donc un taux d'utilisation du canal satellite faible.

3-4-2- Aloha en tranche :

Il est plus complexe que la technique Aloha à cause de son exigence des temps de synchronisation des VSAT. Avec cette technique, les utilisateurs transmettent seulement dans les tranches du temps qui leurs sont destinées. Elle réduit les collisions des paquets de données, mais quelques slots peuvent être perdus s'ils ne sont pas totalement occupés.

3-4-3- Aloha à retransmission sélective :

Les paquets de données sont subdivisés en sous paquets égaux en longueur, chacun avec son entête et préambule. Avec cette technique, il n'y a pas de collision totale du paquet. Sauf les paquets non réussis sont retransmis ; l'utilisation des canaux satellite est donc améliorée.

3-4-4 Aloha avec réservation :

C'est une autre version de technique Aloha. Elle est basée sur la notion de probabilité. Si une station VSAT commence à émettre un paquet, il y a de fortes chances qu'elle émette un autre immédiatement. La station VSAT demande donc au hub une tranche de temps. Celui-ci répond en lui assignant le slot demandé en précisant la longueur et le nombre de paquets de données qu'elle doit transmettre. Si le slot ne lui suffit pas, elle demande un autre au hub. Aucun cas de collision n'est risqué avec cette technique.

4- TECHNIQUES DE MODULATION :

La transmission de l'information résulte de la modification d'un paramètre (amplitude, fréquence, phase) d'une onde porteuse. L'information défini par l'ensemble (amplitude, fréquence, phase) est appelée état. Le paramètre peut prendre deux valeurs (modulation binaire), ou plus généralement M-valeurs (modulation M-aires) en fonction d'une suite de symboles définis par codage des messages délivrés par la source.

4-1- Types de modulation :

Les procédés de modulation les plus utilisés pour les réseaux VSAT regroupent : la modulation par déplacement de fréquence (FSK), la modulation à deux états de phase (BPSK) et la modulation à quatre états de phase (QPSK)

4-1-1- Modulation FSK :

Chaque état est caractérisé par la fréquence f émise. Il est possible de moduler un grand nombre d'états, c'est ce qui se fait dans certains canaux très bruités. En pratique, on fait surtout de la modulation à deux états : à 0 correspond f_0 ; à 1 correspond f_1

L'amplitude est constante et on retrouve les avantages de la modulation de fréquence en radiodiffusion (insensibilité aux variations des conditions de transmission, possibilité de contrôle de gain), ainsi que ses inconvénients (encombrement spectral augmenté par rapport à la modulation d'amplitude) le spectre de ce signal est d'ailleurs complexe à établir et dépend fortement de l'indice de modulation défini par :

$$m = \frac{f_1 - f_0}{2F_R}$$

Où F_R est la largeur de bande de fréquence du signal. Elle est utilisée dans des applications simples, lorsqu'il n'y a pas de restriction de bande passante.

4-1-2- Modulation BPSK :

Dans cette modulation, les deux états sont en opposition de phase avec par exemple la règle suivante :

$$d_0 = -1 \rightarrow \phi_0 = \bar{1} ; d_0 = +1 \rightarrow \phi_0 = 0$$

Avec :

d_0 est l'amplitude de la porteuse.

Φ_0 est la phase de la porteuse.

Ceci revient tout simplement à multiplier la porteuse par le signal logique de niveau ± 1 . Le spectre du signal est le spectre en bande de base, transposé autour de la fréquence porteuse.

4-1-3- Modulation QPSK :

C'est une modulation à 4 états de phase

$M=2^2 \Rightarrow b=2 \Rightarrow$ deux bits sont transmis par période T_s .

De façon pratique, c'est une modulation d'amplitude à deux niveaux sur chacune des deux porteuses en quadrature. Les quatre états de phase sont :

$$\phi_K = (2K + 1) \frac{\pi}{4} \Rightarrow \phi_K \in \left\{ \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4} \right\}$$

La constellation QPSK est représentée sur la figure :

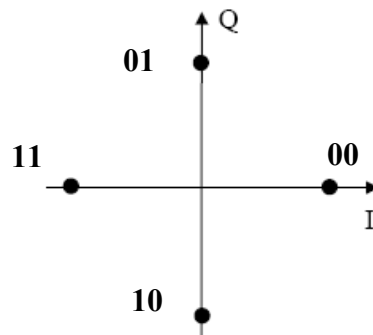



Figure III-18 : Constellation QPSK

Elle montre que l'affectation des bits aux points de la constellation se fait en générale selon le codage Gray.



Chapitre IV



***ANNALYSE DES
LIAISONS
RADIOFREQUENCES
DES SYSTEMES
VSAT***

1- INTRODUCTION :

Le chapitre précédent a dressé les techniques de gestion de réseau qui permettent l'établissement d'une liaison et le transfert fiable d'informations à partir d'une borne d'utilisateur à l'autre. Ce chapitre adressera le transfert de l'information au niveau de la couche physique.

2- PRINCIPE :

L'analyse de la liaison sera exécutée dans le contexte d'un réseau avec une architecture étoilée comme est illustré sur la figure suivante :

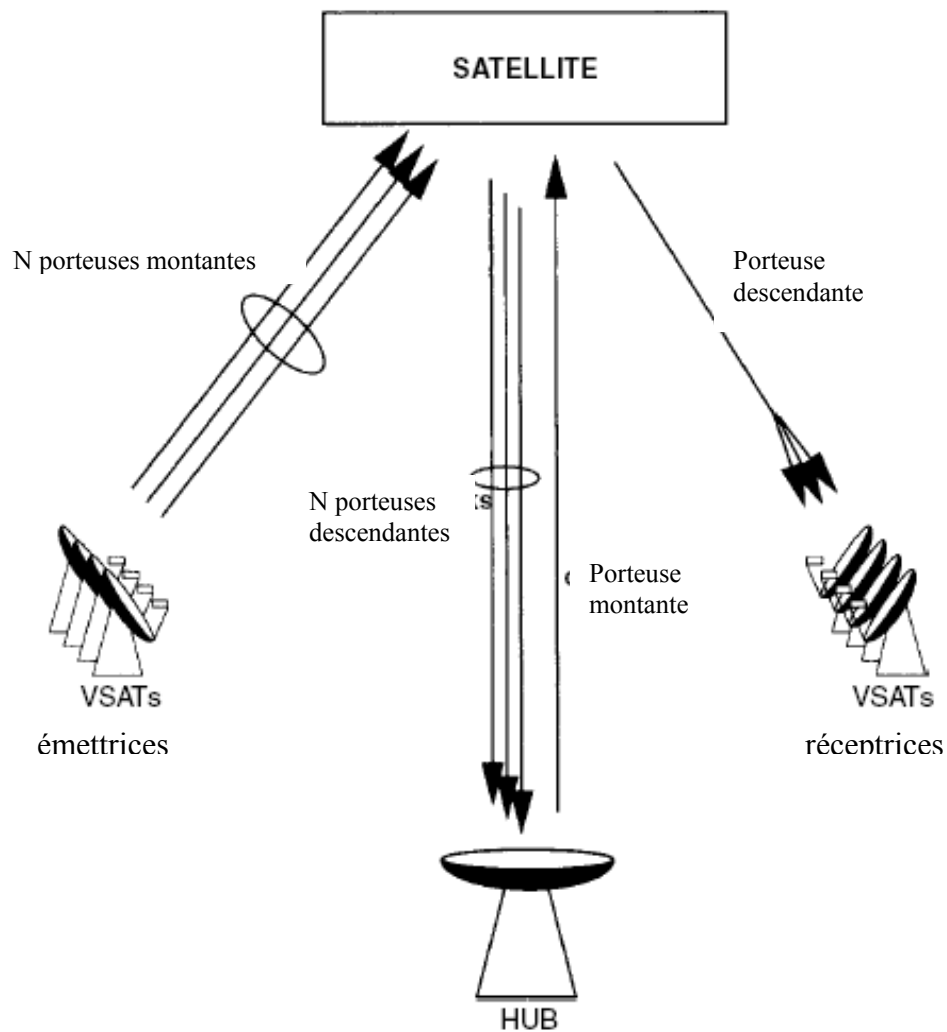


Figure IV-1 : Configuration du réseau VSAT

Les N porteuses transmises par les stations VSAT atteignent le Hub par l'intermédiaire du transpondeur du satellite. Le Hub communique avec les VSAT réceptrices par une seule porteuse modulée par le multiplex TDM. Le long de son trajet de la station émettrice à la station réceptrice, la porteuse est affectée par un bruit de différentes origines.

2-1- Bruit thermique : [Réf4]

Le bruit thermique, présent pour les deux liaisons montante et descendante, est produit par des sources naturelles qui sont :

- Rayonnement des corps : l'antenne capte ces rayonnements qui se superposent au signal utile sous forme de bruit d'origine externe.
- Bruit provenant du ciel : celui-ci est capté par les antennes des stations terriennes.
- Bruit dû au rayonnement propre de la terre : bien que l'antenne soit normalement pointée vers le ciel, le bruit apporté par la terre n'est pas négligeable pour les antennes à faibles température de bruit.
- Aux bruits précédents il faut ajouter le bruit dû aux composants du récepteur.

2-2- Bruit d'interférences :

Certaines interférences doivent être prévues des systèmes partageant la même bande de fréquences. Elles proviennent soit des satellites adjacents ou des relais à micro-ondes terrestres. D'autres interférences sont dues à la technique de réutilisation de fréquence en utilisant la même fréquence pour deux stations, mais avec des polarisations orthogonales ou des faisceaux séparés (satellite multifaisceaux). Elles interviennent à cause de l'isolation imparfaite des polarisations orthogonales ou des faisceaux.

2-3- Bruit d'intermodulation :

Le récepteur du satellite amplifie simultanément plusieurs signaux séparés en fréquence (technique FDMA, CDMA). Ils restent parfaitement séparés à la sortie si le récepteur est parfaitement linéaire.

Mais les récepteurs de satellites de télécommunications sont équipés de TOP dont la caractéristique entrée/sortie est donnée par la figure suivante :

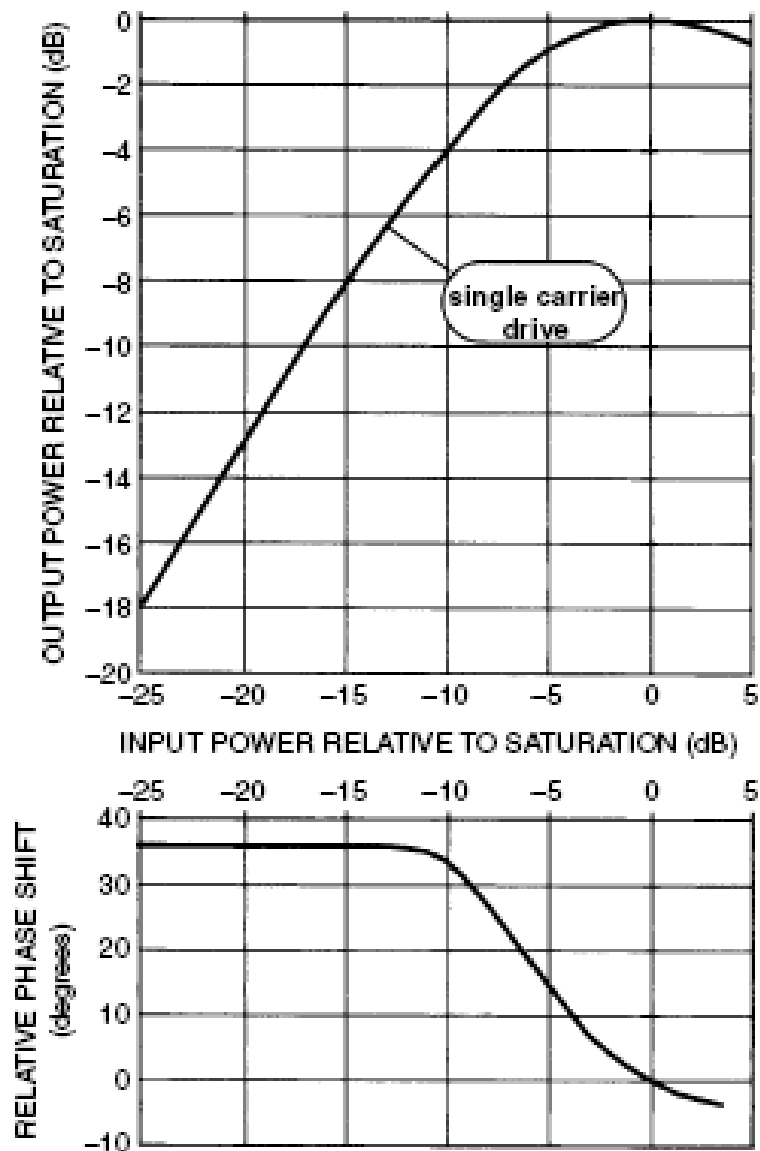


Figure IV-2 : *Caractéristique entrée/sortie du TOP*

Les récepteurs de satellite ne sont donc pas tout à fait linéaires et donnent naissance à des produits d'intermodulation qui consomment une partie de la puissance. Si ces produits d'intermodulation sont impairs, ils tombent dans la bande de fréquences et brouillent les signaux utiles.

Pour réduire les produits d'intermodulation, il faut utiliser les TOP en dessous de leurs puissances de saturation dans une zone, où leurs fonctionnements sont plus linéaires. Cette diminution de puissance s'appelle « *Recul* ».

3- BRUIT DE LA LIAISON TERRE-SATELLITE-TERRE :

La qualité finale de l'information reçue au sol, résulte des caractéristiques de la liaison montante, du répéteur et de la liaison descendante où la contribution du bruit, comme le montre la figure (IV-3) est donné par :

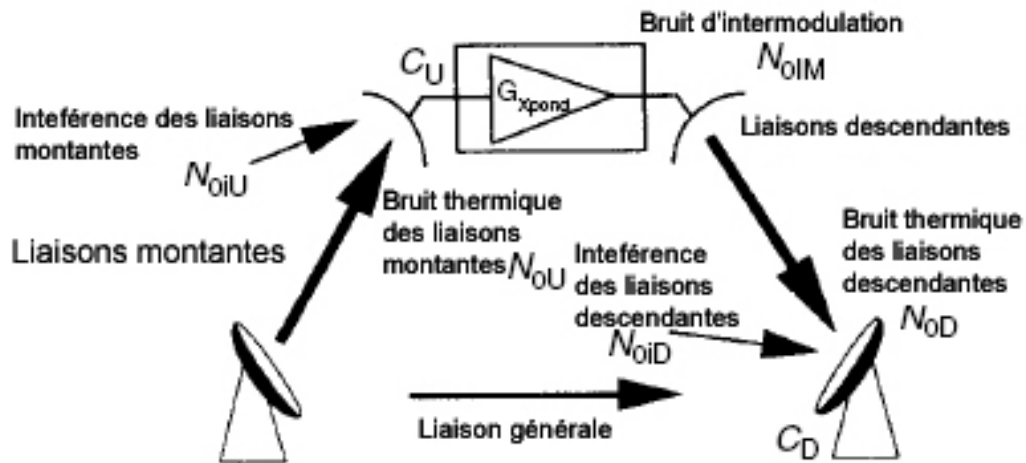


Figure IV-3 : Contribution du bruit de la liaison globale

- Le bruit thermique (N_{OU}) et celui d'interférences (N_{OIU}) de la liaison montante transmis à la liaison descendante par le transpondeur du satellite. Le long de leurs parcours jusqu'à l'entrée du récepteur de la station terrienne, ces bruits sont sujets à des gains et des pertes en puissance qui s'élèvent à un gain total G_{TE} (en pratique $|G_{TE}| < 1$, donc il est considéré comme perte). Il est donné par :

$$G_{TE} = G_{Xpond} \times G_D$$

G_{Xpond} : gain en puissance du transpondeur

G_D : gain en puissance de l'antenne d'émission du satellite

Donc les bruits reçus par la station réceptrice sont donnés par :

- ❖ $G_{TE} N_{OU}$ pour le bruit thermique
- ❖ $G_{TE} N_{OIU}$ pour le bruit d'interférences
- Le bruit d'intermodulation (N_{OIM}) généré à la sortie du transpondeur transmis à la station terrienne, il est donné par : $G_D N_{OIM}$
- Le bruit thermique (N_{OD}) et le bruit d'interférences (N_{OID}) à l'entrée de la station terrienne.

Le tableau (a) récapitule les contributions des bruits de la figure (IV-3) et donne les rapports puissance de porteuse sur densité spectrale de puissance de bruit

Origine du bruit	notation	Rapport C/N
Thermique des liaisons montantes	N_{0U}	$(C/N_0)_U = C_U/N_{0U}$
Thermique des liaisons descendantes	N_{0D}	$(C/N_0)_D = C_D/N_{0D}$
Interférences des liaisons montantes	N_{0iU}	$(C/N_{0i})_U = C_U/N_{0iU}$
Interférence des liaisons descendantes	N_{0iD}	$(C/N_{0i})_D = C_D/N_{0iD}$
Intermodulation	N_{0IM}	$(C/N_0)_{IM} = G_{Xpound} C_U/N_{0IM}$

Tableau (a)

La densité spectrale du bruit totale à l'entrée du récepteur de la station terrienne est donné par:

$$N_{OT} = \sum N_{Oj} \text{ (WHZ}^{-1}\text{)}$$

Où les N_{Oj} sont les différentes contributions des bruits cités précédemment.

Le rapport puissance de porteuse sur densité spectrale de puissance de bruit (C_D/N_{OT}) relié à la liaison globale (Sol-Satellite-Sol) sera noté $(C/N_0)_T$. Ce dernier est calculé comme suit :

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{N_0}\right)_T^{-1} &= \left(\frac{N_{0T}}{C_D}\right) = \sum \frac{N_{Oj}}{C_D} \\ &= \frac{(G_{TE}N_{0U} + G_{TE}N_{0iU})}{C_D} + \frac{G_D N_{0IM}}{C_D} \\ &\quad + \frac{N_{0D}}{C_D} + \frac{N_{0iD}}{C_D} \text{ (Hz}^{-1}\text{)} \dots\dots (5-1) \end{aligned}$$

Considérant que : $C_D = G_{TE} C_U = G_{Xpound} \times G_D \times C_U$. Donc l'équation (5-1) s'écrit :

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{N_0}\right)_T^{-1} &= \frac{N_{0U}}{C_U} + \frac{N_{0iU}}{C_U} + \frac{N_{0IM}}{G_{Xpound} C_U} + \frac{N_{0D}}{C_D} + \frac{N_{0iD}}{C_D} \\ &= \left(\frac{C}{N_0}\right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_D^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_{IM}^{-1} + \left(\frac{C}{N_{0i}}\right)_U^{-1} \\ &\quad + \left(\frac{C}{N_{0i}}\right)_D^{-1} \text{ (Hz}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

N.B : Pour simplifier les calculs ci-dessus, le G_{Xpound} supposé être le même pour le bruit et la porteuse. Cependant il dépend de la puissance du signal à l'entrée du transpondeur, donc des termes correctifs pour les valeur $(C/N_0)_U$ et $(C/N_{0i})_D$ doivent être introduits dans l'équation précédente.

4- ANALYSE DE LA LIAISON MONTANTE :

La figure suivante illustre la géométrie de la liaison montante.

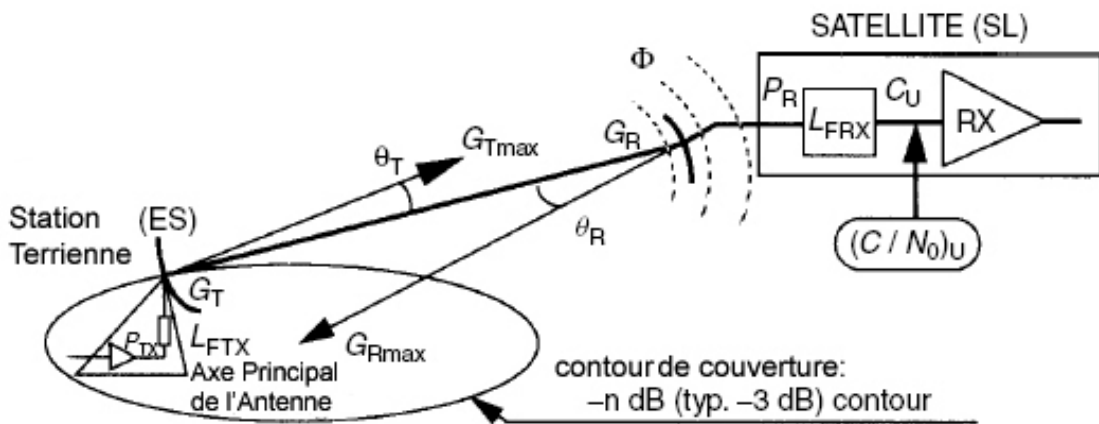


Figure IV-4 : Géométrie de la liaison montante

A fin de calculer la valeur de $(C/N_0)_U$ dans les pires des cas, la station terrestre est supposée située au bord du contour où l'antenne réceptrice du satellite a un gain constant défini relativement à sa valeur maximale (par exemple à -3db qui correspond au $G_{max}/2$). Le rapport $(C/N_0)_U$ défini dans le tableau(a) est donné par :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_U = \frac{C_U}{N_{0U}} \quad (\text{Hz})$$

Avec :

C_U est la puissance de la porteuse reçue à l'entrée du transpondeur du satellite.

N_{0U} est la densité spectrale de puissance de bruit reliée à la température du bruit d'antenne (T_U) par la formule :

$$N_{0U} = kT_U \quad (\text{W/Hz})$$

k est la constante de Boltzman : $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{JK}^{-1}$

$$k \text{ (dBJK)}^{-1} = 10 \log k = 228,6 \text{ dBJK}^{-1}$$

$(C/N_0)_U$ peut être exprimé comme suit :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_U = \text{IBO}_1 \left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{Usat}} \quad (\text{Hz})$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_U \text{ (dBHz)} = \text{IBO}_1 \text{ (dB)} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{Usat}} \text{ (dBHz)}$$

IBO_1 est le recul de la porteuse considérée

$(C/N_0)_{\text{Usat}}$ est la valeur nécessaire pour saturer le transpondeur. Elle est donnée par : [Réf 4]

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{Usat}} = \Phi_{\text{sat}} \left(\frac{1}{G_1}\right) \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{SL}} \left(\frac{1}{k}\right) \quad (\text{Hz})$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{Usat}} \text{ (dBHz)} = \Phi_{\text{sat}} \text{ (dBWm}^{-2}\text{)} - G_1 \text{ (dBi)} + \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{SL}} \text{ (dBK}^{-1}\text{)} - 10 \log k \text{ (dB/K)}$$

Φ_{sat} : densité de flux de puissance nécessaire pour saturer le transpondeur.

$(G/T)_{\text{SL}}$: facteur de mérite de l'antenne réceptrice du satellite.

G_1 : gain d'une antenne idéale avec une surface égale à 1m^2 : [Réf 3]

$$G_1 = \frac{4\pi}{\lambda^2} = 4\pi \left(\frac{f}{c}\right)^2$$

$$G_1 \text{ (dBi)} = 10 \log 4\pi - 20 \log \lambda = 10 \log 4\pi + 20 \log \left(\frac{f}{c}\right)$$

λ : Longueur d'onde (m)

f : la fréquence de transmission (Hz)

c : célérité de la lumière dans le vide ($3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$)

4-1- Densité de flux de puissance :

La densité de flux de puissance est donnée par :

$$\phi = \frac{PIRE_{ES}}{4\pi R^2} \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$$

$$\phi \text{ (dBWm}^{-2}\text{)} = PIRE_{ES} \text{ (dBW)} - \text{Log } 4\pi R^2$$

R : Distance entre le satellite et la station terrienne.

$PIRE_{ES}$: Puissance isotrope rayonnée effective de la station terrienne.

La densité de flux de puissance peut être donnée par :

$$\phi = \frac{PIRE_{ES} G_1}{L_U} \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$$

$$\phi \text{ (dBWm}^{-2}\text{)} = PIRE_{ES} \text{ (dBW)} + G_1 \text{ (dBi)} - L_U \text{ (dB)}$$

L_U : les pertes le long du trajet montant.

Les caractéristiques d'entrée du transpondeur sont données en terme de densité de flux de puissance de saturation (Φ_{sat}). Cette dernière est contrôlée par la $PIRE_{ES}$:

- Si la $PIRE_{ES}$ est allouée à une seule porteuse, la puissance de cette porteuse à l'entrée du transpondeur détermine le recul IBO_1 :

$$IBO_1 = \frac{\Phi_1}{\Phi_{\text{sat}}}$$

$$IBO_1 \text{ (dB)} = \Phi_1 \text{ (dBWm}^{-2}\text{)} - \Phi_{\text{sat}} \text{ (dBWm}^{-2}\text{)}$$

- Dans le cas où la $PIRE_{ES}$ est allouée à plusieurs porteuses, la densité de flux de puissance est donnée par :

$$\Phi_t = \sum \Phi_i \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Le recul total à l'entrée du transpondeur est donc donné par :

$$IBO_t = \frac{\Phi_t}{\Phi_{sat}}$$

$$IBO_t(\text{dB}) = \Phi_t(\text{dBWm}^{-2}) - \Phi_{sat}(\text{dBWm}^{-2})$$

4-2- Puissance isotrope rayonnée effective de la station terrienne :

La puissance isotrope rayonnée effective $PIRE_{ES}$ de la station terrienne est donnée par : [Réf 1]

$$PIRE_{ES} = P_T G_T \text{ (W)}$$

$$PIRE_{ES}(\text{dBW}) = P_T(\text{dBW}) + G_T(\text{dBi})$$

G_T et P_T sont le gain et la puissance alimentée à l'antenne d'émission comme ils sont donnés sur la figure suivante :

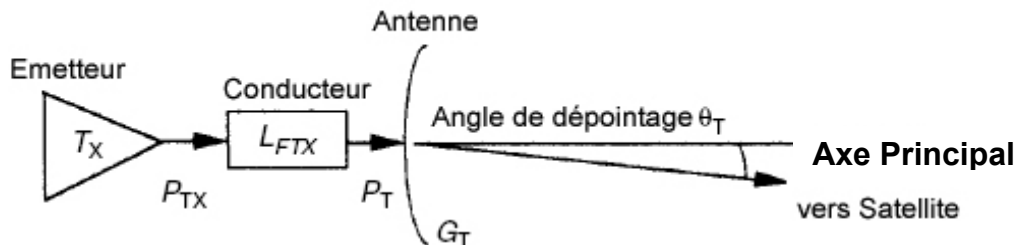


Figure IV-5: Composants de la station émettrice

L'émetteur T_X avec sa puissance P_{TX} alimente l'antenne avec une puissance P_T à travers un guide caractérisé par des pertes de puissance L_{FTX} . L'antenne montre un gain maximal (G_{Tmax}) au niveau de son axe principal et un gain réduit G_T dans la direction du satellite à cause de son dépointage avec un angle θ_T .

1. Pour calculer le gain actuel G_T , il est nécessaire de connaître les paramètres les plus importants (G_{max}, θ_{3dB}) définis comme suit:[Réf 5]

$$G_{max} = \eta_a \left(\frac{\pi Df}{c} \right)^2$$

$$G_{max}(\text{dBi}) = 10 \log \eta_a \left(\frac{\pi Df}{c} \right)^2$$

$$\theta_{3dB} = \frac{70c}{fD}$$

η_a : rendement de l'antenne.

D : Diamètre de l'antenne (m).

f : fréquence de transmission en Hz.

La puissance P_T qui alimente l'antenne peut être calculée en fonction de la puissance P_{TX} à la sortie de l'émetteur et la puissance L_{FTX} perdue dans le guide.

$$P_T = \frac{P_{TX}}{L_{FTX}}$$

$$P_T \text{ (dBW)} = P_{TX} \text{ (dBW)} - L_{FTX} \text{ (dB)}$$

L_{FTX} est pratiquement de l'ordre de 0,1 à 0,3 dB

De même, G_T peut être calculé par :

$$G_T = \frac{G_{Tmax}}{L_T}$$

$$G_T \text{ (dBi)} = G_{Tmax} \text{ (dBi)} - L_T \text{ (dB)}$$

L_T : pertes de dépointage [Réf 4] :

$$L_T \text{ (dB)} = 12 \left(\frac{\theta_T}{\theta_{3dB}} \right)^2$$

4-3- Pertes au niveau de la liaison montante :

Les pertes (L_U) le long du parcours montant représentent l'ensemble des atténuations que subit la puissance de la porteuse en allant de l'antenne de la station terrienne à l'antenne de réception du satellite. Ces atténuations sont représentées sous formes de pertes L_{FS} en espace libre et pertes atmosphériques L_A .

Les pertes L_U sont donc données par :

$$L_U = L_{FS} L_A$$

$$L_U \text{ (dB)} = L_{FS} \text{ (dB)} + L_A \text{ (dB)}$$

4-3-1- Pertes en espace libre :

Elles dépendent de la fréquence et de la distance R entre la station terrienne et le satellite : [Réf 4]

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi Rf}{c} \right)^2 = \left(\frac{4\pi R_0 f}{c} \right)^2 \left(\frac{R}{R_0} \right)^2$$

$$L_{FS} \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{4\pi R_0 f}{c} \right)^2 + 10 \log \left(\frac{R}{R_0} \right)^2$$

R_0 : altitude du satellite ($R_0=35786\text{Km}$ pour un satellite géostationnaire)

$$\left(\frac{R}{R_0} \right)^2 = 1 + 0.42(1 - \cos l \cos L)$$

où :

l : latitude de la station terrienne

L : la différence entre la longitude du satellite et celle de la station terrienne.

orthogonale, produisant ainsi la dégradation du signal lorsqu'on recourt à des polarisations orthogonales.

L'ensemble des pertes de puissance sont donc données par :

$$L_A = A_{\text{gaz}} A_{\text{pluie}}$$

$$L_A(\text{dB}) = A_{\text{gaz}}(\text{dB}) + A_{\text{pluie}}(\text{dB})$$

Avec :

- A_{gaz} : atténuation due à l'atmosphère pendant un temps clair. Il dépend de la fréquence et de l'angle d'élévation.
- A_{pluie} : atténuation due à la pluie. Il dépend du taux de précipitation, de l'angle d'élévation et de la fréquence.

4-4- Facteur de mérite du satellite :

Le facteur de mérite $(G/T)_{\text{SL}}$ des équipements de réception du satellite, indique la possibilité de ces derniers d'accumuler une valeur élevée de $(C/N_0)_U$. Il est donné par :

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{SL}} = \left(\frac{G_{\text{Rmax}}}{L_{\text{R}}L_{\text{pol}}}\right)_{\text{SL}} \left(\frac{1}{L_{\text{FRX}}}\right)_{\text{SL}} \left(\frac{1}{T_{\text{U}}}\right) \quad (\text{K}^{-1})$$

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{SL}} (\text{dBK}^{-1}) = G_{\text{Rmax}}(\text{dBi}) - L_{\text{R}}(\text{dB}) - L_{\text{pol}}(\text{dB}) - L_{\text{FRX}}(\text{dB}) - 10 \log T_{\text{U}}$$

G_{Rmax} : Gain maximal de l'antenne réceptrice du satellite

L_{R} : pertes correspondant à la réception par une station se trouvant au bord du contour de couverture

L_{pol} : pertes en raison de disparité possible de polarisation entre l'antenne et l'onde reçue.

L_{FRX} : pertes en puissance au niveau du guide reliant l'antenne et l'entrée du récepteur.

T_{U} : température de bruit de la liaison montante, elle est donnée par : [Réf 2]

$$T_{\text{U}} = \frac{T_{\text{A}}}{L_{\text{FRX}}} + T_{\text{F}} \left(1 - \frac{1}{L_{\text{FRX}}}\right) + T_{\text{R}} \quad (\text{K})$$

T_{A} : température de bruit de l'antenne du satellite.

T_{F} : température du guide.

T_{R} : température de bruit à l'entrée du récepteur du satellite.

Les valeurs pratiques sont :

$$T_{\text{A}} = 290\text{K} \quad , \quad T_{\text{F}} = 290\text{K} \quad , \quad L_{\text{FRX}} = 1\text{dB} \quad , \quad T_{\text{R}} = 500\text{K}$$

5- ANALYSE DE LA LIAISON DESCENDANTE :

La figure suivante illustre la géométrie de la liaison descendante

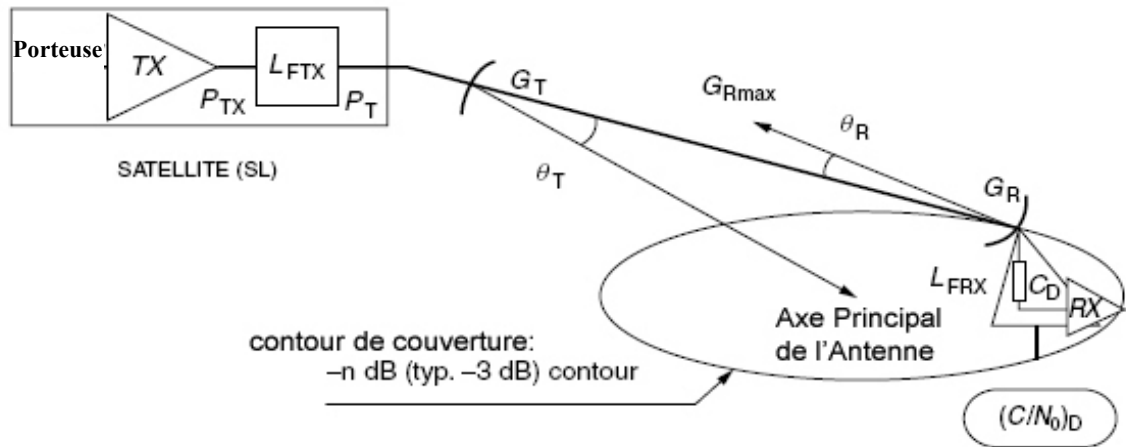


Figure IV-7 : Géométrie de la liaison descendante

Afin de calculer $(C/N_0)_D$ dans les pires des cas, la station terrienne est supposée située au bord du contour de couverture où l'antenne réceptrice du satellite a un gain constant défini relativement à sa valeur maximale (par exemple à -3dB correspondant au (gain max/2))

Le rapport $(C/N_0)_D$ défini dans le tableau (a) est donnée par :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_D = \frac{C_D}{N_{0D}} \quad (\text{Hz}).$$

C_D : est la puissance reçue à l'entrée de la station réceptrice.

N_0 : est la densité spectrale de puissance de bruit reliée à la température du bruit d'antenne (T_D) par la formule : [Réf 3]

$$N_{0D} = k T_D \quad (\text{WHZ}^{-1})$$

$(C/N_0)_D$ peut être exprimé comme suit :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_D = \text{OBO}_1 \left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{Dsat}} \quad (\text{Hz})$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_D \text{ (dBHz)} = \text{OBO}_1 \text{ (dB)} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{Dsat}} \text{ (dBHz)}$$

OBO_1 est le recul de la porteuse considérée à la sortie du transpondeur, il dépend de IBO_1

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{Dsat}} = \text{EIRP}_{\text{SLsat}} \left(\frac{1}{L_D}\right) \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{ES}} \left(\frac{1}{k}\right) \quad (\text{Hz})$$

[Réf 5]

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{Dsat}} \text{ (dBHz)} = \text{EIRP}_{\text{SLsat}} \text{ (dBW)} - L_D \text{ (dB)} + \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{ES}} \text{ (dBK}^{-1}) - 10 \log k \text{ (dBJK}^{-1})$$

$P_{IRE_{SLsat}}$ est la PIRE du satellite fonctionnant à la saturation
 L_D : Pertes le long du trajet descendant.

5-1- Puissance isotrope rayonnée effective du satellite :

La puissance isotrope rayonnée effective $P_{IRE_{SL}}$ du satellite est donnée par :

$$EIRP_{SL} = P_T G_T \quad (W)$$

$$EIRP_{SL} \text{ (dBW)} = P_T \text{ (dBW)} + G_T \text{ (dBi)}$$

P_T : Puissance alimentée à l'antenne d'émission.

G_T : gain d'antenne d'émission.

La puissance P_T qui alimente l'antenne dépend de la puissance (P_{TX}) à la sortie de l'amplificateur du transpondeur et la puissance (L_{FTX}) perdue dans le guide

$$P_T = \frac{P_{TX}}{L_{FTX}} \quad (W)$$

$$P_T \text{ (dBW)} = P_{TX} \text{ (dBW)} - L_{FTX} \text{ (dB)}$$

La PIRE du satellite ($EIRP_{SL}$) dépend de recul total à la sortie du transpondeur :

$$EIPR_{SL} = OBO_t (EIRP_{SLsat}).$$

$$EIRP_{SL} \text{ (dBW)} = OBO_t \text{ (dB)} + EIRP_{SLsat} \text{ (dBW)}$$

5-2- Densité de flux de puissance :

La densité de flux de puissance générée par la transmission d'une porteuse à la surface de la terre est donnée par :

$$\Phi = \frac{EIRP_{SL}}{4\pi R^2} \quad (Wm^{-2})$$

$$\Phi \text{ (dBWm}^{-2}\text{)} = EIRP_{SL} \text{ (dBW)} - \log 4\pi R^2$$

5-3- Pertes au niveau de la liaison descendante :

Les pertes (L_D) le long du parcours descendant sont l'ensemble des atténuations que subit la puissance de la porteuse en allant de l'antenne du satellite à l'antenne de la station terrienne. Elles sont telles que celles citées dans le cas de la liaison montante (L_{FS}, L_A)

$$L_D = L_{FS} L_A$$

$$L_D \text{ (dB)} = L_{FS} \text{ (dB)} + L_A \text{ (dB)}$$

5-4- Facteur de mérite de la station terrienne :

Le facteur de mérite $(G/T)_{ES}$ des équipements de réception de la station terrienne, indique la possibilité de ces derniers d'avoir une valeur élevée de $(C/N_0)_D$, il est donnée par :

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{ES} = \left(\frac{G_{Rmax}}{L_R L_{pol}}\right)_{ES} \left(\frac{1}{L_{FRX}}\right)_{ES} \left(\frac{1}{T_D}\right) \quad (K^{-1})$$

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{ES} \text{ (dBK}^{-1}\text{)} = G_{Rmax} \text{ (dBi)} - L_R \text{ (dB)} - L_{pol} \text{ (dB)} - L_{FRX} \text{ (dB)} - 10 \log T_D$$

- G_{Rmax} : gain de la station terrienne à l'axe principal.
- L_R : pertes dues au dépointage avec un angle θ_R .
- L_{pol} : pertes dues à la disparité possible de polarisation.
- L_{FRX} : pertes en puissance au niveau du guide reliant l'antenne et l'entrée du récepteur.

T_D : température de bruit de la liaison descendante, elle est donnée :

$$T_D = \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_F \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}} \right) + T_R \quad (K)$$

T_A : température de bruit de l'antenne, elle est donnée selon deux cas :

- Pour un temps clair :

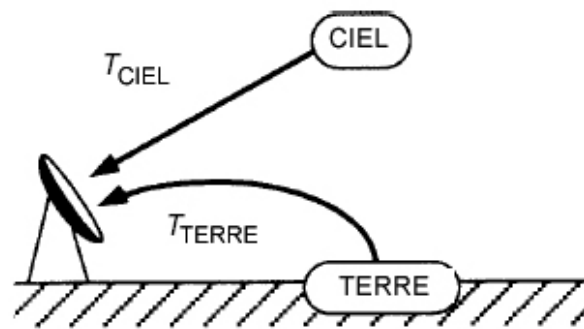


Figure IV- 8 : Température de bruit d'antenne pour un temps clair

L'antenne capte le bruit rayonné par le ciel avec une température T_{ciel} et celui capté par la terre avec une température T_{terre} . La contribution totale du bruit est donc donnée par :

$$T_A = T_{ciel} + T_{terre} \quad (K)$$

- Pour un temps pluvieux

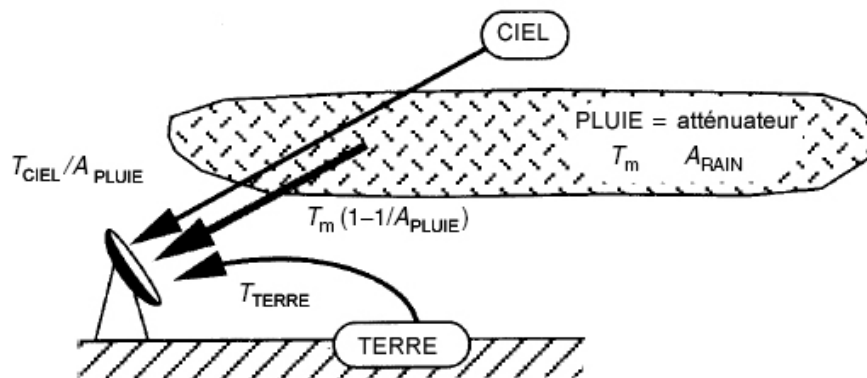


Figure IV-9 : Température de bruit d'antenne pour un temps pluvieux

La pluie agit en tant qu'un atténuateur avec un facteur A_{pluie} et une température T_m . Elle atténue la contribution du ciel clair et génère son propre bruit avec une température : $T_m(1-1/A_{\text{pluie}})$ [Réf 3]

Le bruit total est donc donné par :

$$T_A = \frac{T_{\text{ciel}}}{A_{\text{pluie}}} + T_m \left(1 - \frac{1}{A_{\text{pluie}}}\right) + T_{\text{terre}} \quad (\text{K})$$

La température de bruit (T_R) à l'entrée du récepteur de la station terrienne, peut être calculée par la formule suivante :

$$T_R = T_{\text{LNA}} + \frac{T_{\text{MX}}}{G_{\text{LNA}}} + \frac{T_{\text{IF}}}{G_{\text{LNA}}G_{\text{MX}}} + \frac{T_{\text{DEMOD}}}{G_{\text{LNA}}G_{\text{MX}}G_{\text{IF}}} \quad (\text{K})$$

LNA : amplificateur à faible bruit.

MX : mixeur.

IFAMP : amplificateur avec une fréquence intermédiaire IF

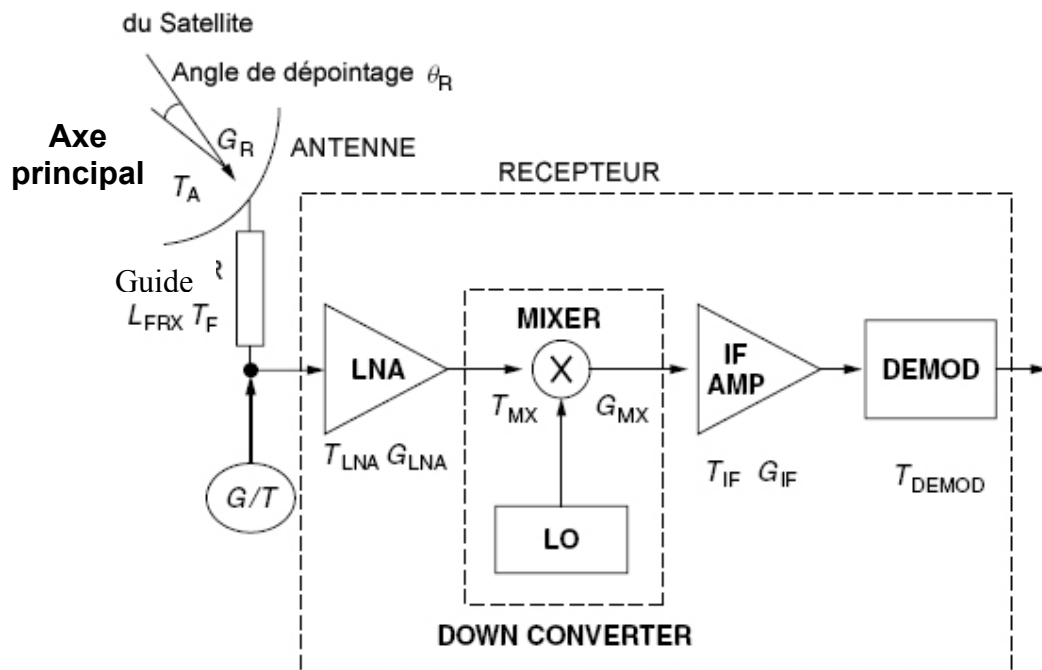


Figure IV-10 : Equipements de la station terrienne

Les valeurs des paramètres cités dans la formule sont exprimées en valeur absolue (non pas en dB)

Les expressions précédentes montrent que la valeur $(G/T)_{\text{ES}}$ est maximale si les pertes L_{pol} , L_{FRX} , L_R et A_{pluie} sont nulles.

Cette valeur maximale est donc donnée par :

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{ESmax}} = (G_{\text{Rmax}})_{\text{ES}} \left(\frac{1}{T_{\text{Dmin}}}\right) \quad (\text{K}^{-1})$$

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{ESmax}} \quad (\text{dBK}^{-1}) = G_{\text{Rmax}}(\text{dBi}) - 10 \log T_{\text{Dmin}}$$

où : $T_{Dmin} = T_{Ciel} + T_{terre} + T_R$ (K)

Dans le cas où les pertes L_{pol} , L_{FRX} , L_R et A_{pluie} ne sont pas nulles :

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{ES} \text{ (dBK}^{-1}\text{)} = \left(\frac{G}{T}\right)_{ESmax} \text{ (dBK}^{-1}\text{)} - L_{Rmax} \text{ (dB)} - L_{pol} \text{ (dB)} - \text{DELTA} \text{ (dB)}$$

Avec :

$$L_{Rmax} \text{ (dB)} = 12 \left(\frac{\theta_{Rmax}}{\theta_{3dB}}\right)^2 \text{ (dB)}$$

$$\text{DELTA} \text{ (dB)} = L_{FRX} + 10 \log T_D - 10 \log T_{Dmin}$$

6- ANALYSE DE BRUIT D'INTERMODULATION :

Le bruit d'intermodulation se produit à la saturation (mode non-linéaire) du transpondeur dans lequel le recul à l'entrée est nul. Ces bruits d'intermodulation sont transmis avec les porteuses désirées et reçues par les stations terriennes. Le bruit d'intermodulation est plus élevé quand le nombre de porteuses est grand.

7-ANALYSE DE BRUIT D'INTERFERENCES :

7-1- Expression du rapport porteuse sur interférence (C/N_i) :

Les interférences sont la partie d'énergie indésirable qui brouille le signal utile au niveau du récepteur. Ce dernier capte à travers sa bande passante B_N la puissance de porteuse voulue (C) et la puissance d'interférence (N_i)

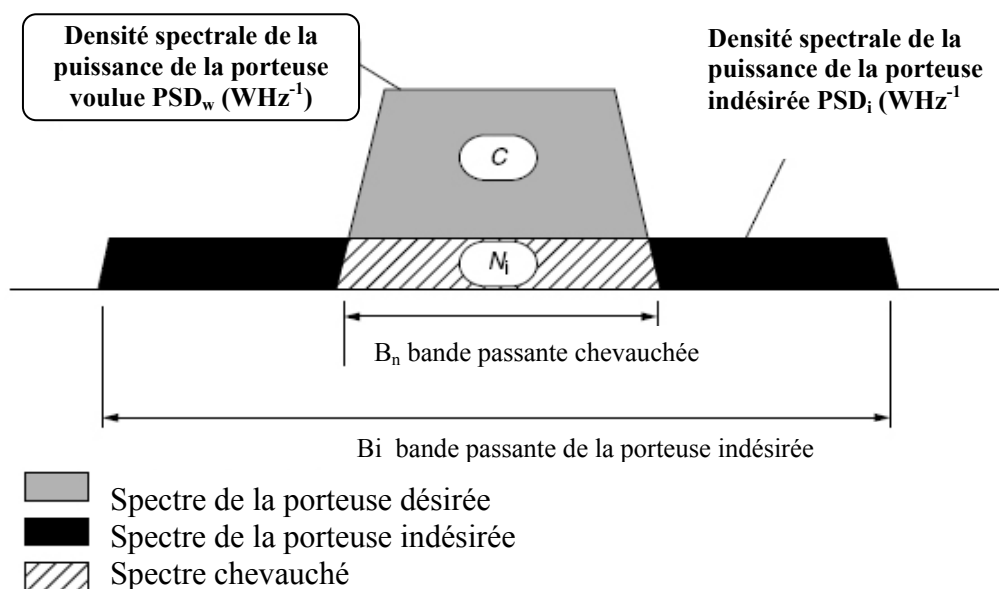


Figure IV-11 : *Spectre de la porteuse reçue contaminée par des interférences*

Le chevauchement des spectres de puissances des porteuses C et N_i désigne le niveau d'interférences.

La puissance de la porteuse C est donnée par : $C = PSD_w B_N$ (W).

où PSD_w (WHZ^{-1}) est la densité spectrale de la puissance de la porteuse voulue C.

La porteuse parasite avec sa densité spectrale de puissance PSD_i (WHZ^{-1}) occupe une bande B_i . La quantité de puissance d'interférences N_i captée par le récepteur est égale à la surface chevauchée :

$$N_i = PSD_i \min(B_i, B_N) \quad (W)$$

Le rapport (C/N_i) est donc donné par :

$$\frac{C}{N_i} = \frac{PSD_w B_N}{PSD_i \min(B_i, B_N)} \quad (4-a)$$

La densité spectrale PSD de la porteuse est proportionnelle à la densité de la PIRE défini par $(PIRE/B)$ avec B est la bande passante en (Hz).

En effet :

$$PSD = \left(\frac{PIRE}{B} \right) \left(\frac{1}{L} \right) G_{RX} \quad (WHZ^{-1}) \quad (4-b)$$

L : pertes de la liaison

$$G_{RX} = G_{Rmax} / L_R L_{pol} L_{FRX}$$

7-2- Types d'interférences :

Il existe deux types d'interférences, internes et externes :

7-2-1- Interférences internes :

Elles sont générées dans le même réseau VSAT, dues à la technique de réutilisation de fréquence. Elles peuvent être inter-canal ou intra-canal.

a- Interférences inter-canal :

Elles dépendent des caractéristiques des antennes de la station terrienne et du satellite. En effet, elles proviennent de l'isolation spatiale imparfaite (entre deux faisceaux séparés géographiquement) ou de l'isolation imparfaite des polarisations orthogonales

a-1- Interférences spatiales :

La figure (IV-12) illustre la géométrie des interférences inter-canal dues à l'isolation imparfaite des faisceaux pour un satellite à système multifaisceaux. A ce point, une porteuse provenant d'une station VSAT supposée dans un faisceau (1) risque de capter, le long de son trajet montant, une partie de la puissance rayonnée par une autre station située dans un autre faisceau (2). Vue la non directivité des antennes, cette puissance entre dans le transpondeur dédié aux porteuses du faisceau (1) créant ainsi une interférence au niveau de la station terrienne (VSAT ou Hub). Réciproquement, une partie de la puissance émise par le transpondeur (2) dédié au faisceau (2) peut être capté comme interférence par les stations VSAT du faisceau (1).

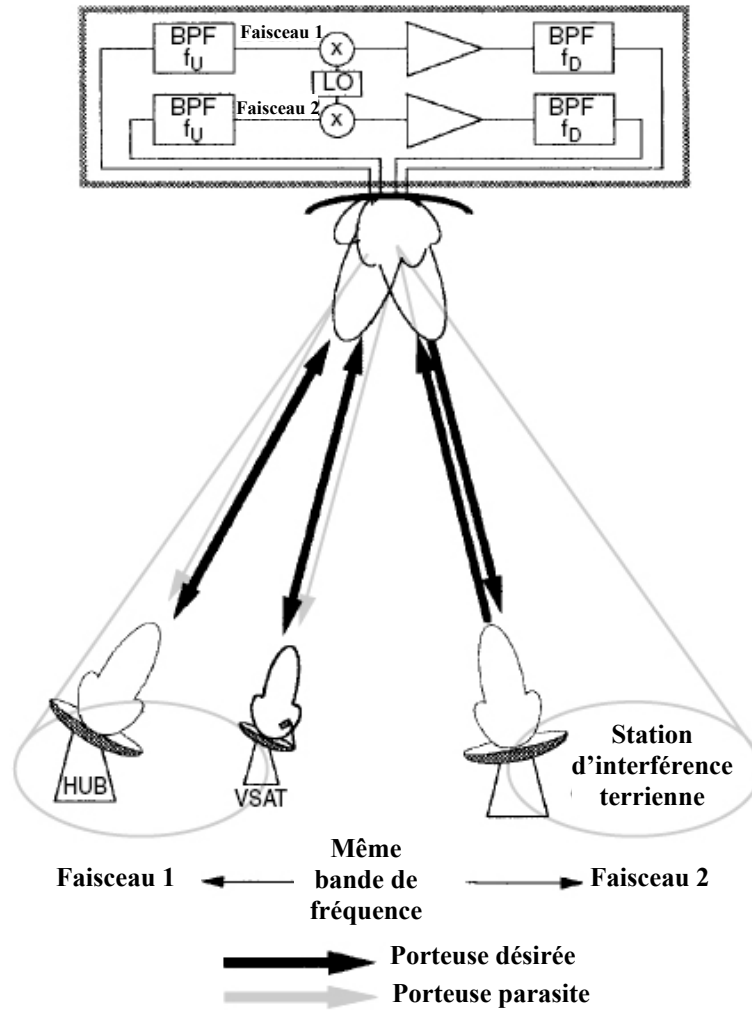


Figure IV-12 : Interférences inter-canal pour un satellite à système multifaisceaux

Les rapports (C/N_i) peuvent être dérivés par les formules (4-a) et (4-b) :

- Pour la liaison montante :

$$\left(\frac{C}{N_i}\right)_U = \frac{PIRE_{ESW} \frac{B_i}{\min[B_i, B_N]} \frac{L_{U_i} G_{RXW}}{L_{UW} G_{RXi}}}{PIRE_{ESi}}$$

$$\left(\frac{C}{N_i}\right)_U (dB) = PIRE_{ESW} (dBW) - PIRE_{ESi} (dBW) + 10 \log B_i - 10 \log \min[B_i, B_N]$$

$$+ L_{U_i} (dB) - L_{UW} (dB) + G_{RXW} (dB_i) - G_{RXi} (dB_i)$$

- Pour la liaison descendante :

$$\left(\frac{C}{N_i}\right)_D = \frac{PIRE_{SL1wv} \frac{B_i}{\min[B_i, B_N]}}{PIRE_{SL2iv}}$$

$$\left(\frac{C}{N_i}\right)_D (dB) = PIRE_{SL1ww} (dBW) - PIRE_{SL2iw} (dBW) + 10\text{Log}B_i - 10\text{Log} \min[B_i, B_N]$$

avec $PIRE_{SL1ww}$ est la PIRE du satellite dans le faisceau 1 pour les porteuses désirées, elle est donnée par :

$$PIRE_{SL1ww} (dBW) = OBO_w (dB) + PIRE_{SL1wsat} (dBW)$$

$PIRE_{SL2iw}$ est la PIRE du satellite dans le faisceau (2) pour les porteuses parasites dans la direction des stations voulues, elle est donnée par :

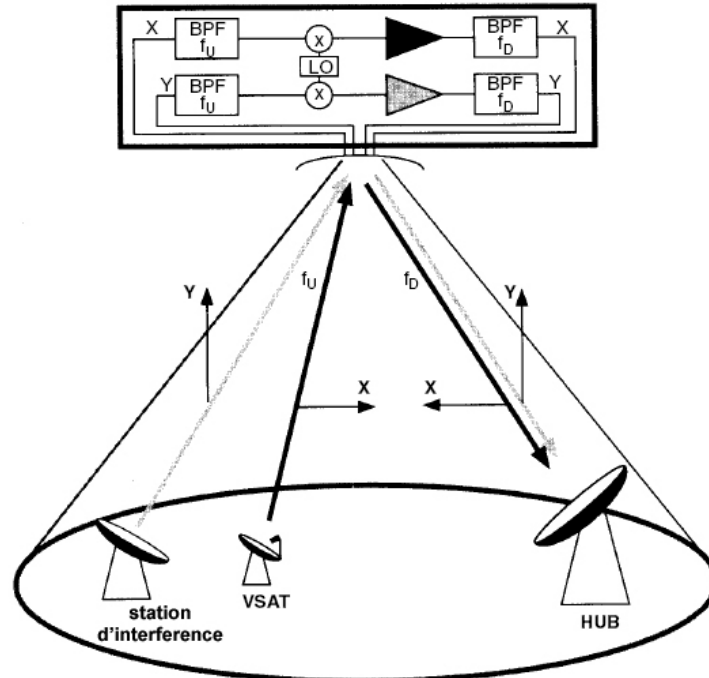
$$PIRE_{SL2iw} (dBW) = OBO_i (dB) + PIRE_{SL2wsat}(dBW)$$

L'ensemble des interférences inter-canal de la liaison globale sont :

$$\left(\frac{C}{N_i}\right)_T^{-1} = \left(\frac{C}{N_i}\right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{N_i}\right)_D^{-1}$$

a-2- Interférence dues aux polarisations croisées :

Ces interférences proviennent des porteuses transmises par des stations d'autres réseaux localisés dans un seul faisceau avec celles du réseau VSAT. Ces stations émettent simultanément avec la même fréquence en utilisant deux polarisations orthogonales



FigureIV-13 : *Interférences dues aux polarisations croisées*

Le niveau d'interférence est conditionné par l'isolation des polarisations croisées (XPI) des antennes du satellite. La figure suivante illustre les interférences dues aux polarisations croisées.

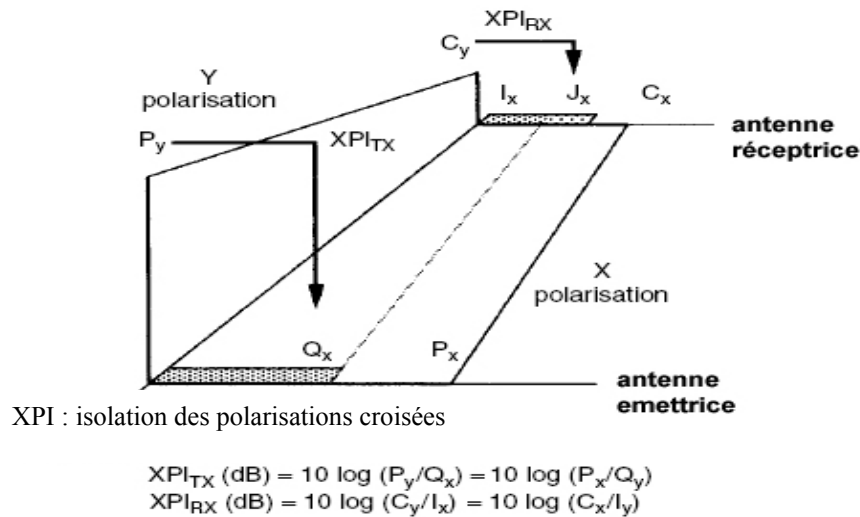


Figure IV-14 : Polarisations croisées

L'antenne de réception reçoit les porteuses voulues émises (C_x) avec la polarisation X et les contributions d'interférences I_x dues à l'isolation imparfaite des deux polarisations X et Y à l'émission auxquelles il s'ajoute la contribution J_x due à l'isolation imparfaite des deux polarisations à la réception. Un processus semblable se produit pour la polarisation Y.

Le rapport porteuse sur interférence est $\frac{C_x}{I_x + J_x}$ pour la polarisation X et

$\frac{C_y}{I_y + J_y}$ pour la polarisation Y. l'expression de chaque composant est donnée

par le tableau suivant :

	Polarisation X	Polarisation Y
Puissances transmises (W)	P_x	P_y
Puissances transmises par les polarisations croisées (W)	$Q_x = P_y 10^{-(XPI_{TX}/10)}$	$\dot{Q}_y = P_x 10^{-(XPI_{TX}/10)}$
Puissances des porteuses reçues (W)	C_x	C_y
Interférences générées par les polarisations croisées	$I_x = C_y 10^{-(XPI_{RX}/10)}$	$\dot{I}_y = C_x 10^{-(XPI_{RX}/10)}$
Puissances d'interférences à la réception	$J_x = Q_x C_x / P_x$	$J_y = Q_y C_y / P_y$
Rapport de la porteuse sur la puissance des interférences dues aux polarisations croisées	$C_x / (I_x + J_x)$	$\dot{C}_y / (\dot{I}_y + \dot{J}_y)$

Finalemment :

$$\frac{C_x}{(I_x + J_x)} = \left[\frac{P_y}{P_x} 10^{-\frac{XPI_{TX}}{10}} + \frac{C_y}{C_x} 10^{-\frac{XPI_{RX}}{10}} \right]^{-1}$$

$$\frac{C_y}{(I_y + J_y)} = \left[\frac{P_x}{P_y} 10^{-\frac{XPI_{TX}}{10}} + \frac{C_x}{C_y} 10^{-\frac{XPI_{RX}}{10}} \right]^{-1}$$

b- Interférence intra-canal :

La mise en parallèle de plusieurs canaux au niveau du satellite présente un inconvénient : une fraction de l'énergie du signal peut échapper au canal adjacent. La figure suivante illustre la situation où les interférences du canal adjacent (ACI) affectent les porteuses de la liaison descendante.

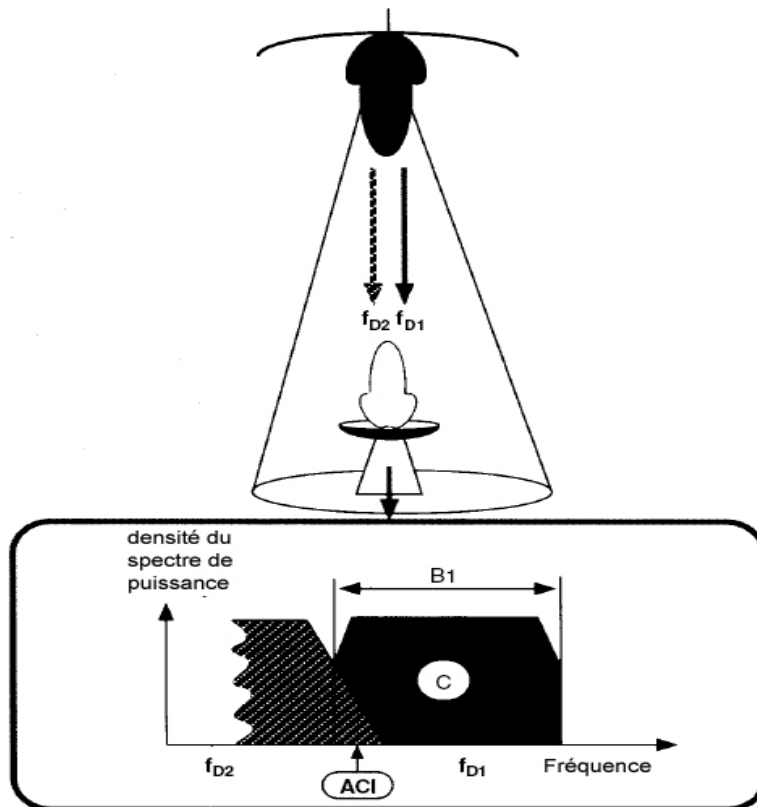


Figure IV-15 : Interférence de la liaison descendante due au canal adjacent

Une partie du spectre de la porteuse adjacente de fréquence F_{D2} tombe dans le récepteur de la station terrienne accordée à la porteuse de fréquence F_{D1} . Ces interférences peuvent être réduites en élargissant l'espacement (bande de garde) entre les canaux du satellite.

7-2-2- Interférence externes :

Les interférences externes sont dues au satellite adjacent où par les relais à micro-ondes terrestres.

a- Interférences dues au satellite adjacent :

Elles sont générées par la station terrienne et affectent le satellite adjacent ou générés par ce dernier et affectent la station terrienne. Le niveau des interférences au récepteur d'une liaison par satellite dépend de la séparation angulaire (θ) des deux satellites et de l'angle de leur séparation en longitudes (α).

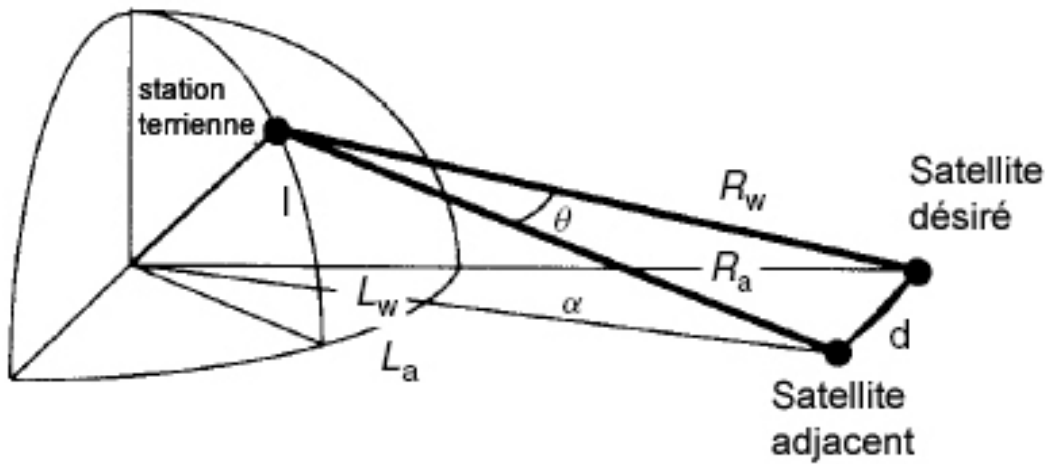


Figure IV-16 : Position de la station terrienne par rapport aux satellites désiré et adjacent

La distance **d** les deux satellites est donnée par

$$d^2 = R_w^2 + R_a^2 - 2R_w R_a \cos \theta \quad (\text{m}^2)$$

R_w : distance entre la station terrienne et le satellite désiré

R_a : distance entre la station terrienne et le satellite adjacent

D'autre part :

$$d/2 = (R_e + R_0) \sin(\alpha/2)$$

Donc :

$$d^2 = 4(R_e + R_0)^2 \sin^2(\alpha/2) = 2(R_e + R_0)^2(1 - \cos \alpha) \quad (\text{m}^2)$$

Par combinaison des deux formules précédentes on aura :

$$\theta = \arccos \left[\frac{R_w^2 + R_a^2 - 2(R_e + R_0)^2(1 - \cos \alpha)}{2R_w R_a} \right] \quad (\text{degrees})$$

L'angle α est donné par : $L_a - L_w = \alpha$

Avec L_a et L_w sont les différences de longitude entre la station terrienne et les deux satellites adjacent et désiré respectivement.

La figure suivante donne un exemple des interférences dues au système du satellite adjacent.

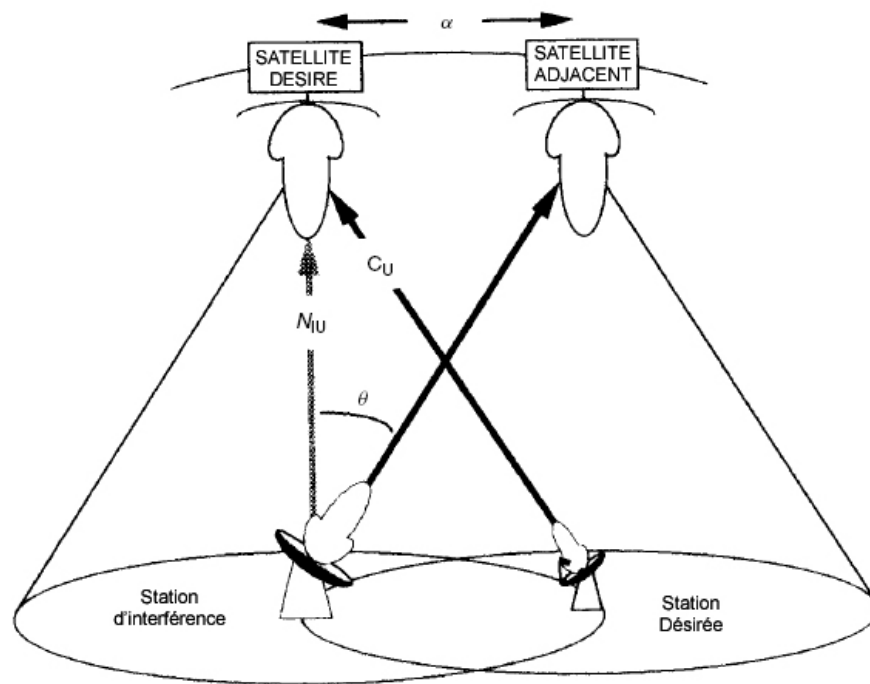


Figure IV-17 : interférence due au système du satellite adjacent

b- Interférences dues aux systèmes à micro-ondes terrestres :

Les systèmes de communication par satellite partagent les mêmes bandes de fréquences avec les systèmes terrestres à micro-ondes. Contrairement aux bandes de fréquences Ku et Ka, les réseaux VSAT souffrent des interférences dues aux liaisons terrestres à micro-ondes dans la bande C à cause du partage de cette bande avec ces dernières.

8- DETERMINATION DU TAUX D'ERREUR BINAIRE (BER)

Après avoir cité les performances de la liaison radiofréquence en terme de $(C/N_0)_T$ dans les sections précédente, on s'intéresse maintenant à étudier la qualité du signal délivré à l'utilisateur final en terme du taux d'erreur binaire (BER). Ce dernier est donné par le rapport E_b/N_{0T}

E_b est l'énergie par bit d'information

N_{0T} est la densité spectrale du bruit de liaison globale.

L'énergie par bit d'information est définie comme l'énergie des porteuses C_D accumulées au récepteur pendant un intervalle de temps égale au temps de réception d'un seul bit d'information (T_b). À un débit binaire R_b , le temps que prend un débit d'information $T_b = 1/R_b$, donc :

$$E_b = \frac{C_D}{R_b}$$

Et

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C_D/R_b}{N_{0T}} = \frac{(C/N_0)_T}{R_b}$$
$$\frac{E_b}{N_0} \text{ (dB)} = \left(\frac{C}{N_0} \right)_T \text{ (dBHz)} - 10 \log R_b$$

Le BER dépend du type de modulation et la technique de correction d'erreur.

CONCLUSION

Les systèmes de satellite de télécommunications sont entrés dans une période de transition, allant des communications point par point entre stations terrestres de grandes dimensions et très onéreuses, jusqu'aux communications plus denses en information entre de petits équipements à faible coût. Cette évolution est liée au divers progrès technologiques réalisés dans ce domaine : la transmission numérique, les faisceaux étroits, les méthodes d'accès multiple. Les capacités des canaux ont été ainsi démultipliées, l'emploi des fréquences optimisées, ce qui s'est traduit par une réduction des coûts de transmission et l'emploi de terminaux au sol beaucoup plus petits (tel que les stations VSAT). Le développement de la télévision numérique par satellite constitue à ce jour la conséquence la plus concrète de ces améliorations.

Cependant le développement des réseaux en fibre optique est venu concurrencer les satellites dans certaines applications, comme la téléphonie internationale grâce à la pose de nombreux câbles sous-marins. Ainsi un satellite relativement modeste, doté d'une dizaine de canaux, possède une capacité de transmission équivalente à celle d'une seule fibre optique. En outre, les satellites possèdent une durée de vie restreinte, car leurs propulseurs de stabilité n'ont pas une réserve de carburant illimitée.

Néanmoins, les satellites présentent plusieurs avantages sur les fibres optiques, comme celui d'offrir une très grande capacité de diffusion en termes de surface couverte. En outre, ils disposent d'une grande souplesse opérationnelle et peuvent être en effet reconfigurés en fonction de l'évolution des techniques et des besoins. Enfin ils peuvent desservir des téléphones mobiles et des sites isolés s'affranchissant des contraintes géographiques. De ce fait, les systèmes de télécommunication par satellite demeurent promis à un bel avenir et appelés à se développer pour un certain nombre d'applications (Couverture des zones géographiques dépourvues d'infrastructures comme : les forêts équatoriales ou les déserts. Collecte d'informations météorologiques ou hydrologiques. Complément de réseaux terrestres notamment en cas de panne de ces derniers. ... etc).

ANNEXES

Annexe 1 : *Protocole d'interface*

- **HDLC** (High Data Link Protocol) : Un protocole de la couche liaison qui règle le transfert ordonné d'informations entre les bornes connectées. Les fonctions de base de ce protocole sont particulièrement : l'assurance d'intégrité des messages par détection des erreurs, également la demande de retransmission ainsi que les accusés de réceptions (positifs et négatifs).
- **RS232** : Protocole de la couche physique, facilite la transmission des données ne dépassant un débit binaire de 20Kbs^{-1} d'un terminal à un autre à travers les circuits de connexion. Il présente un (0) logique pour une tension positive (entre +5V et +25V) et un (1) logique pour une tension négative (entre -5V et -25V). Il utilise 25 pins de connexion.
- **RS422** : Protocole de la couche physique utilisé pour transmettre des données à un débit binaire important.
- **V35** : Protocole définissant les circuits d'inter change de transmission de données à 48Kbs^{-1} . Il utilise 35 pins de connexion.
- **X25** : Protocole définissant des fonctions aux trois couches inférieurs (physique, liaison, réseau)

Annexe 2 : *Paramètres de l'antenne*

- **Gain en puissance** : C'est le rapport entre la puissance rayonnée (qui correspond à une direction privilégiée) et la puissance rayonnée par la même antenne.
- **Gain maximal** : Le gain de l'antenne est maximal dans la direction ou le rayonnement est maximal, il est donné par :

$$G_{\max} = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) A_{\text{eff}}$$

où : $\lambda = c/f$

c : célérité de la lumière dans le vide ($3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$)

f : fréquence de l'onde électromagnétique (Hz)

eff : aire effective de l'antenne

Pour une antenne à réflecteur circulaire de diamètre D et une surface géométrique $A = \pi D^2/4$:

$$A_{\text{eff}} = \eta_a A$$

où : η_a est le rendement de cette antenne.

Donc :

$$G_{\max} = \eta_a \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = \eta_a \left(\frac{\pi Df}{c} \right)^2$$

$$G_{\max} \text{ (dBi)} = 10 \log \left[\eta_a \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] = 10 \log \left[\eta_a \left(\frac{\pi Df}{c} \right)^2 \right] \text{ (dBi)}$$

- **Diagramme de rayonnement** : Le diagramme de rayonnement indique les variations du gain avec la direction. Pour une antenne à réflecteur circulaire, ce diagramme présente une symétrie autour de l'axe principale. Il peut être représenté en coordonnées polaires (Figure a) ou en coordonnées cartésiennes (figure b)
- **Ouverture du faisceau à la demi-puissance** : C'est l'angle entre les deux axes tangents au lobe principal correspondant au $G_{\max}/2$

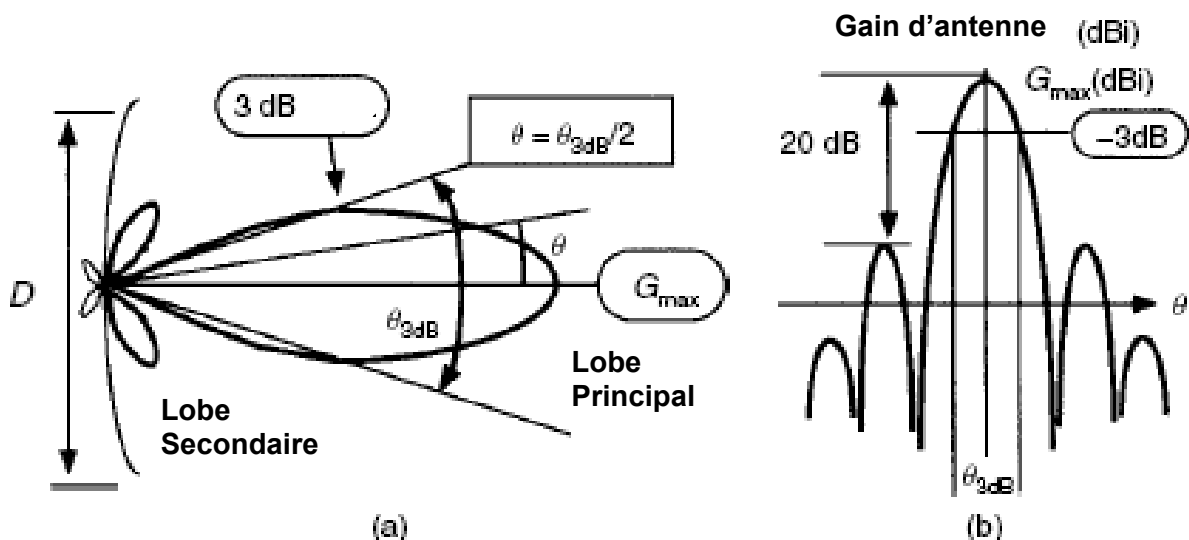


Figure 2-1 : *Diagramme de rayonnement*

- **Polarisation** : l'onde rayonnée par une antenne est obtenue par la superposition des deux composantes d'un champ électrique et magnétique. Ces deux composantes sont orthogonales et perpendiculaires à la direction de propagation de cette onde. La polarisation de l'onde est définie par la direction du champ électrique. En générale, la direction du champ électrique n'est pas fixe et sa composante n'est pas constante. Pendant une période, la projection de l'extrémité du vecteur \vec{E} représentant le champ électrique sur le plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, décrit une ellipse. L'onde est dite elliptique (voire figure...)

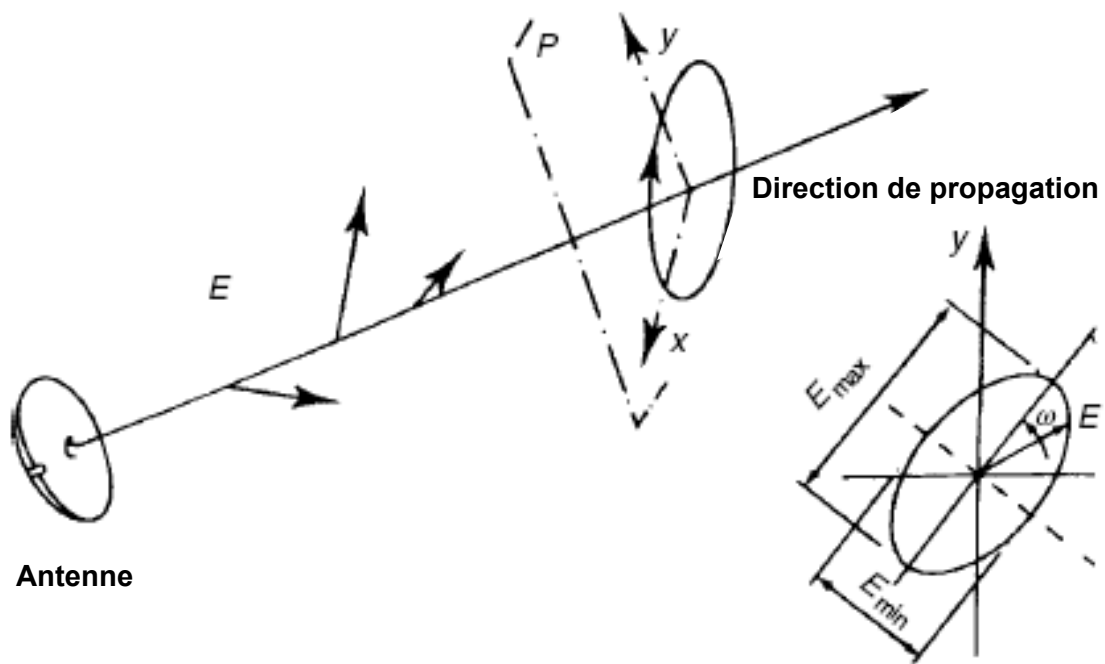


Figure 2-2 : Polarisation de l'onde

Deux ondes sont en polarisation orthogonale, si leurs champs électriques décrivent deux ellipses identiques en sens opposé

Annexe 3 : Puissance émise et reçue

- **La puissance isotrope rayonnée effective de l'émetteur** : La puissance rayonnée par unité d'angle solide par une antenne isotrope ($G_T=1$) alimenté par une source radiofréquence de puissance P_T est donnée par : $P_T/4\pi$

Comme l'antenne de l'émetteur présente dans la direction du récepteur un gain absolu G_T , la puissance rayonnée par une unité d'angle solide est donnée par : $G_T P_T/4\pi$ (W frd⁻¹)

Le produit $G_T P_T$ est appelé puissance isotrope rayonnée effective (PIRE), exprimée en Watt.

$$\text{PIRE}(\text{dBW}) = P_T (\text{dBW}) + G_T (\text{dBW})$$

- **Puissance reçue par le récepteur** : L'antenne de réception de surface équivalente à A_{Reff} prélève sur l'onde reçue la puissance reçue donnée par :

$$P_R = \left(\frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \right) A_{\text{Reff}} = \phi A_{\text{Reff}} \quad \text{en (W)}$$

où ; ϕ : est la densité de flux de puissance à l'émission

R : est la distance entre l'émetteur (T) et la surface équivalente A_{Reff}

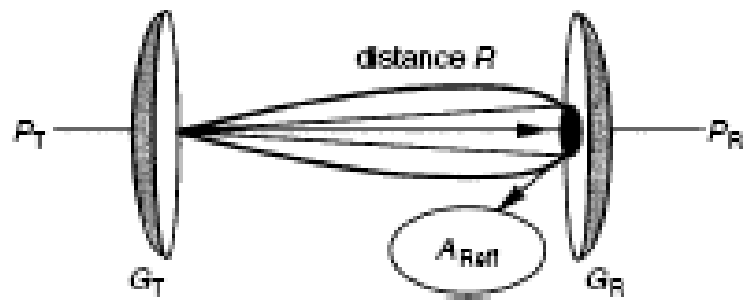


Figure 3-1 : *Puissance reçue*

GLOSSAIRE

- ACI** : (Adjacent Canal Interférence) Inférence du canal adjacent
- ACK** : (Acknowledgment) Accusé de réception.
- ARQ** : (Automatique Repeat Request) Procédure de correction par retransmission.
- ALOHA** : Politique d'accès à un canal satellite, cette technique fut développée par l'université de Hawaï
- AMRC** ou **CDMA** : Accès multiple à répartition par code.
- AMRF** ou **FDMA** : Accès multiple à répartition en fréquence.
- AMRT** ou **TDMA** : Accès multiple à répartition dans le temps.
- AZIMUT** : Position d'un satellite géostationnaire par rapport au méridien de Greenwich. S'exprime en degré.
- Atténuation** : Perte d'amplitude du signal à travers les lignes et les équipements de transmission.
- Bande de base** : se dit d'un signal non modulé qui est transmis dans sa bande de fréquence d'origine.
- BER** : (Bit error rate) Taux d'erreur calculé sur un nombre prédéterminé d'éléments binaires pendant une période de temps définie.
- BPE** : filtre passe bande.
- BPSK** : (binary phase shift keying) technique de modulation numérique à déplacement de phase à deux états.
- Bruit** : toute perturbation du signal.
- BSS** : (Broadcasting Satellite Service) Service de diffusion par satellite.
- Capacité de transmission** : débit maximal d'un canal, exprimé en bits par seconde.
- Couverture** : zone de forme déterminée où les signaux émanant du satellite sont reçus sur terre.
- Codage** : transformation du signal en vue de sa transmission ; application d'un code à un signal.
- Compression de donnée** : système de réduction du volume de données à transmettre, qui réduit la redondance contenue dans les messages à transmettre.
- DAMA** : (Demande Assignment Multiple Access) accès multiple à la demande d'assignement.
- Débit binaire** : Nombre d'éléments binaires transmis par seconde (bit/s).
- Donnée** : toute information soumise au traitement informatique ou au transport.
- DVB** : (Digital Video Broadcasting) Norme de diffusion numérique télévisuelle par satellite associée au codage d'image en MPEG-2.
- Élévation** : dans le plan verticale d'un site géographique considéré, angle définissant la position d'un satellite par rapport au plan horizontal.
- Erreur**: Altération de transmission numérique qui est identifiée par un calcul.

Fréquence : Quantité d'éléments d'un signal transmis pendant un temps donné, généralement la seconde.

FSK : (Frequency Shift Keying) Technique de modulation à déplacement en fréquence.

FSS : (Fixe Satellite Service) Service fixe par satellite.

GBN : (Go back N) Protocole de transmission automatique.

Intégrité : Qualité d'un réseau relative à la transmission sans pertes des informations.

Interface : liaison entre deux équipements.

IDU : (indoor unit) Unité intérieure, c'est l'interface d'une station terrestre avec l'utilisateur final ou avec un réseau local.

IBO : (Input Back Off) Recul à l'entrée du transpondeur.

LAN : (Local Area Network) Réseau local d'entreprise caractérisé par des accès privés numériques.

Longueur de bande : intervalle de fréquence borné par deux valeurs F_1 et F_2 , disponible sur un support de transmission.

Multiplexage : Opération réalisée par les multiplexeurs.

Multiplexeur : Equipement qui regroupe plusieurs voies à basse vitesse sur un même canal.

NMS : (Network Management System) système de gestion de réseau.

NTSC : National Television System

ODU : (outdoor unit) Unité extérieure : c'est l'interface de la station terrestre avec le satellite.

PAL : Phase Alternée en Ligne.

Polling : Au sein d'un réseau, interrogation des équipements par un site central.

Porteuse : Signal analogique défini par ses caractéristiques de fréquence, d'amplitude et de phase, qui est utilisée pour le transport de l'information.

QPSK : (Quadrature Phase Shift Keying) techniques de modulation numérique à déplacement de phase à quatre états.

SECAM : Séquentielle à mémoire.

Spectre : Gamme ou ensemble de fréquence.

SR : (Selective Repeat) Protocole de transmission automatique.

SW : (Stop and Wait) Protocole de transmission automatique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: Léo THOUREL
« Les antennes » édition 1971
- [2]: G. BARUE
« Télécommunication et infrastructure »
- [3]: RENE BESSON
«Aide mémoire d'électronique pratique, composants. Radio. Television. Video. Sonorisation. » 6^{ème} édition.
- [4]: G. MARAL, M. BOUSQUET, J. PARES
« Télécommunication par satellite » édition 1982.
- [5]: Roger L. Freman
«Radio system design for telecommunication», 3rd edition.