

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche
Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electronique
Laboratoire Signal et
Communication

Mémoire de Master
En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Electronique

Thème

Simulation d'une Liaison
Satellitaire

Réalisé par :
BOUHOUN Salah

Encadré par :
Pr. BERKANI Daoud

Soutenu le 01/07/2013 devant le jury :

Le président : Pr. Z. Terra

Le rapporteur : Pr. D. Berkani

L'examineur : Dr. A. Moussaoui

Juillet 2013

Remerciement

Je tiens à remercier Dieu le tout Puissant et Maître de l'univers, qui m'a donné la force nécessaire, la forte volonté et la patience, afin d'accomplir ce travail.

Tout d'abord, je remercie particulièrement et très chaleureusement mon promoteur, Pr D. BERKANI, avec qui j'ai eu tant de plaisir à travailler et de profiter de son expérience, ses conseils précieux, ses remarques pertinentes.

J'exprime ma gratitude et mes remerciements sincères envers le Pr Z. TERRA qui m'a fait l'honneur de présider le jury. Je remercie aussi Dr A. MOUSSAOUI d'avoir accepté d'être membre du jury et d'examiner mon travail.

Que tous mes professeurs qui ont contribué à ma formation trouvent ici mon plus profonde gratitude.

Enfin, je souhaite dédier ce mémoire à mes parents. Rien n'aurait été possible sans leur soutien, confiance et générosité.

Dédicaces

A mes très chers parents

A mes frères et soeur

A mes oncles et tantes

A tous mes proches

A Monsieur : D. BERKANI

A mes amis : Amine, Ahmed, Abdennour, Ali ...

A tous mes camarades de classes électronique promotion 2013

A tous mes amis de l'ENP.

A tous ceux qui ont su croire en moi

A tous ceux qui me sont chers

Je dédie ce modeste travail

Salah BOUHOUN

ملخص :

هذا العمل هو دراسة لرابط اتصال قمر صناعية ونمذجته في برنامج محاكاة Matlab®. بعد تقديم سريع حول الاتصالات عبر الأقمار الصناعية، قمنا بوصف مختلف الآثار التي تؤثر على الإشارة في الاتصالات الفضائية. بعد ذلك قمنا بحساب ميزانية الربط بين القمر الاصطناعي والمحطة الأرضية التي تعطينا معامل نسبة الإشارة على الضجيج. معامل نسبة الإشارة على الضجيج هو مقياس ومؤشر على جودة الربط.

في النهاية قمنا بمحاكاة نموذج القناة، وتحصلنا على نتائج من هذه المحاكاة

الكلمات المفتاحية: القمر الاصطناعي، المحطة الأرضية، قناة، ميزانية الربط، معامل نسبة الإشارة على الضجيج

Résumé :

Ce travail est une étude qui porte sur la liaison satellitaire et sa simulation dans un logiciel Matlab®. Après une brève introduction sur les communications satellitaires, nous avons décrit les différents effets qui affectent notre signal dans une communication satellite. Après nous avons fait un bilan de liaison entre le satellite et la station terrienne qui nous donne le signal sur bruit. Le signal sur bruit est une mesure de la qualité de la liaison.

A la fin une simulation du modèle du canal satellite a été faite, et des résultats de cette simulation

Mots clés : satellite, station terrienne, canal, bilan de liaison, rapport signal sur bruit.

Abstract:

This work is a study that focuses on the satellite link and its simulation in software of simulation Matlab®. After a brief introduction on satellite communication, we have described the different effects that affect our signal in satellite communication. After that, we have calculated the link budget between a satellite and the earth station, which we give the signal to noise ratio. The signal to noise ratio is a measurement of the link quality.

Finally, we have simulate the satellite channel model, and we have got a results

Key words: satellite, earth station, channel, link budget, signal to noise ratio

Table des matières

Table des figures.....	v
Liste de tableaux.....	vi
Liste des abréviations	vii
Introduction générales.....	1
1 Introduction aux communications satellite.....	2
1.1 Principe des communications par satellite.....	2
1.1.1 Le secteur spatial.....	2
1.1.2 Secteur terrien.....	3
1.2 Gammes de fréquences utilisées par les satellites.....	4
1.3 Les orbites.....	4
1.3.1 L'orbite géostationnaire.....	5
1.3.2 Les orbites à basse altitude.....	5
1.3.3 Les orbites à moyen altitude.....	6
1.4 Les Services de télécommunications par satellites.....	7
1.4.1 La téléphonie.....	7
1.4.2 La télédiffusion.....	7
1.4.3 La transmission de données.....	8
1.5 Conclusion.....	9
2 Le canal satellite.....	10
2.1 Caractéristique d'une liaison satellite.....	10
2.1.1 le gain de l'antenne	10
2.1.2 Les pertes.....	11
2.1.3 La puissance de bruit.....	12
2.1.4 L'effet de non linéarité dans un amplificateur de puissance.....	13
2.1.5 autres effets.....	15
2.2 Bilan de liaison.....	17
2.2.1 La liaison montante	17
2.2.2 liaison descendante	19
2.3 Exemple.....	20
2.4 Conclusion.....	23
3 Simulation.....	24
3.1 Introduction	24
3.2 Simulations résultats	25
4 Conclusions.....	30
Bibliographie.....	31

Table des figures

1.1	composants d'un système de communication par satellite	2
2.1	la relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie pour	14
2.2	chaîne de transmission satellitaire	18
2.3	Les niveaux de puissance dans une liaison satellitaire	22
3.1	Modèle du canal satellite utilisé dans Simulink®	21
3.2	constellation du signal modulé à l'émission	23
3.3	le signal à l'émission après un filtre cosinus surélevé	24
3.4	le signal à la sortie de l'amplificateur haute puissance	25
3.5	le signal numérique récupérer avant démodulateur	26

Liste des tableaux

1.1	gammes de fréquences utilisées dans les télécommunications spatiales	4
1.2	comparaison des orbites pour les satellites de communications	6
2.1	affaiblissement consécutif à la pluie	12

Liste des abréviations

TTC : tracking, telemetry and command

VSAT : very small aperture terminal

RCVO : receive only

LEO :Low Earth Orbits

MEO :Medium Earth Orbits

GEO:Geostationary Earth Orbits

DVB-S : Digital Video Broadcasting Satellite

MPEG : Motion picture expert group

DAB : Digital Audio Broadcasting)

ADSL: asymmetric digital subscriber line

BER :Bit Error Rate.

XPD :cross polarisation discrimination

GPS :Global positioning system

LNA:Low Noise Amplifier (Amplificateur Faible Bruit)

Introduction Générale :

Depuis la première tentative de communiquer en utilisant un satellite, les recherches ont connu un grand avancement pour pouvoir transmettre un message à travers la liaison satellite avec le moins d'erreur. Avec l'augmentation des services utilisant les communications satellite, et la nécessité d'un débit et des performances élevés, plusieurs techniques sont développées pour répondre à ces besoins, sachant que la liaison satellite provoque des dégradations très importantes au signal.

Dans ce mémoire, on va étudier une liaison satellitaire et les différents effets qui affectent le signal transmis. On va simuler une liaison satellitaire descendante. Ce modèle va être exploité pour évaluer la performance d'une communication satellite, et les codes correcteurs d'erreurs qui sont utilisées.

Dans le premier chapitre on va voir des généralités sur les communications satellitaires, le principe des communications par satellite, les gammes de fréquences et les principales orbites utilisées, et les services offertes par les compagnies de satellites.

Dans le deuxième chapitre on va étudier une liaison satellite, les pertes, et les différents effets qui affectent notre signal. Puis on fait un bilan de liaison du canal satellitaire. Cette étude est faite pour évaluer la qualité de la liaison satellite, et pour pouvoir simuler une liaison satellitaire

Dans le dernier chapitre on va voir la simulation de la liaison conçu, la simulation et les résultats, de ces simulations.

1 Introduction aux communications satellite

1.1 Principe des communications par satellite

Les satellites fournissent des canaux de communication tout comme le font les systèmes basés sur les technologies terrestres : faisceaux hertziens et câbles (coaxiaux et fibres optiques). La figure(1.1) illustre les différentes composantes d'un système de télécommunications par satellite. On y distingue :

- un secteur spatial ;
- un secteur terrien.

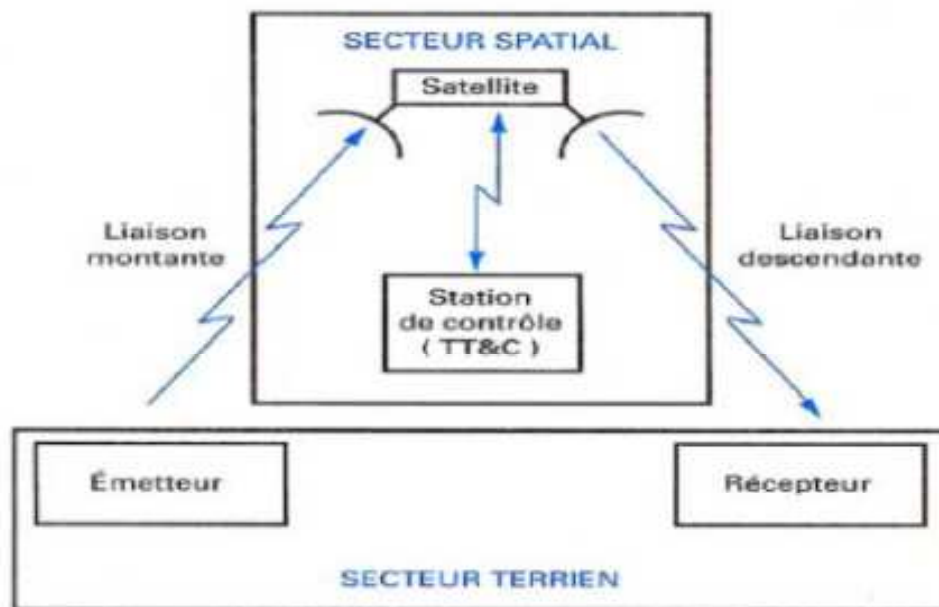


Figure.1.1 composants d'un système de communication par satellite [1]

1.1.1 Le secteur spatial

Le secteur spatial comporte le satellite et l'ensemble des moyens de contrôle situés au sol, c'est-à-dire l'ensemble des stations de poursuite, de télémétrie et de télécommande (TTC : tracking, telemetry and command), ainsi que le centre de contrôle du satellite, où sont décidées toutes les opérations liées au maintien à poste et vérifiées les fonctions vitales du satellite. Le satellite est constitué d'une charge utile et d'une plate-forme. La charge utile

comporte les antennes de réception et d'émission (canaux, amplificateur ...), et l'ensemble des équipements électroniques assurant la transmission des signaux. La plate-forme comporte l'ensemble des sous systèmes permettant à la charge utile de fonctionner. On y trouve :

- la structure ;
- l'alimentation électrique ;
- le contrôle thermique ;
- le contrôle d'attitude et d'orbite ;
- les équipements de propulsion ;
- les équipements de poursuite, de télémétrie et de télécommande (TTC).

Pour atteindre le satellite, la station émettrice emprunte un faisceau montant (uplink) et pour atteindre la station réceptrice, le satellite emprunte un faisceau descendant (down-link). Les principales caractéristiques qui déterminent les performances d'un système satellite sont les suivantes :

- la ou les zones couvertes par le satellite.
- la gamme de fréquences utilisées.
- la puissance et la capacité de transmission.
- la taille des antennes des stations terriennes.
- les techniques de modulation et de codage utilisées pour la transmission des signaux.
- les techniques d'accès aux capacités de transmission embarquées sur le satellite.

1.1.2 Secteur terrien

Le secteur terrien est constitué par l'ensemble des stations terriennes, le plus souvent raccordées aux terminaux des usagers par un réseau terrestre, ou directement dans le cas de petites stations (VSAT : very small aperture terminal) et de stations mobiles. Les stations se distinguent par leur taille, qui varie selon le volume de trafic à acheminer sur la liaison spatiale, et selon le type de trafic (téléphone, télévision, données). Les plus grandes sont équipées d'antennes de 30 m de diamètre (standard A du réseau Intelsat) et les plus petites

d'antennes de 0,6 m (stations de réception de la télévision directe). On distingue en outre les stations fixes, les stations transportables, les stations mobiles. Certaines stations sont à la fois émettrices et réceptrices. D'autres sont réceptrices uniquement (RCVO : receive only) : c'est le cas par exemple des stations de réception d'un système de radiodiffusion par satellite, ou d'un système de distribution de signaux de télévision ou de données.

1.2 Gammes de fréquences utilisées par les satellites

Les gammes de fréquences utilisées par les satellites sont désignées par des lettres et résultent d'accords internationaux. Deux modes d'exploitation ont été définis : télécommunication et télédiffusion directe. Le tableau (1.1) présente ces gammes de fréquences utilisables pour les communications par satellites. La bande C fut la première à être mise en exploitation Commerciale et elle est aujourd'hui très encombrée. De plus, cette bande est aussi utilisée par des systèmes terrestres de transmission hertzienne provoquant d'importants risques d'interférence.[2] L'usage de fréquences élevées permet d'utiliser des antennes de petite dimension mais la transmission est perturbée par des phénomènes naturels tels que la pluie. Les conditions climatiques de la zone à desservir privilégient l'usage de certaines bandes de fréquences. Les plus basses fréquences offrent une meilleure résistance à la rencontre de fortes pluies et les plus hautes permettent de réduire la taille des antennes au sol.

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

Tableau.1.1. gammes de fréquences utilisées dans les télécommunications spatiales

1.3 Les orbites :

Les satellites gravitent autour du satellite dans différentes orbites. Chaque orbite a des caractéristiques qui le qualifient à une application spécifique. Les orbites les plus connues

sont : les orbites à basse altitude (*LEO* :Low Earth Orbits), les orbites à moyen altitude (*MEO* :Medium Earth Orbits) et les orbite géostationnaire (*GEO* :Geostationary Earth Orbits). D'autres orbites moins utilisés on peut citer : les orbites de MOLNYA et les orbites de TUNDRA.

1.3.1 L'orbite géostationnaire :

Les satellites placés dans cette orbite font un tour autour de la terre tout les 24 heures, ils restent stationnaires à un point fixe sur la terre. Il a une vitesse angulaire similaire à celle de la terre, ce qu'il est de 35900 km en dessus de la mer.

Ces orbites ont plusieurs avantages, on peut citer :

- Ils ont un point fixe par rapport à la surface de la terre
- Les stations terrienne utilisent des antennes fixes, et ne nécessitent pas de système de tracking.
- La présence permanente
- L'effet doppler est éliminé, car ils n'ont pas un mouvement
- La nécessité de 3 satellites seulement pour couvrir toute la terre.

Mais ce type d'orbites présente des inconvénients tel que le délai de transmission qui est grand (de l'ordre de 250ms) à cause de leur distance élevée de la terre. On peut citer aussi la mauvaise couverture des régions des pôles, d'où la nécessité des grandes antennes.

1.3.2 Les orbites à basse altitude :

Ces satellites sont placés à environ 500 à 1500 km en dessus de la surface de la terre. Les satellites dans cette orbite ont une période la plus courte (95 à 120 minute). Ils assurent une bonne qualité de communication. Chaque satellite dans cette orbite est visible à un point de la terre pour une durée d'environ de 10 minutes. Le délai de transmission est très court d'où son utilité dans les communications mobile. Ces mobiles sont équipés par des antennes omnidirectionnelles avec des puissances d'émission faibles (1W). Les satellites dans cette orbite une zone de couverture très petite, ce qui permet une bonne réutilisation de fréquences.

Ces satellites présentent des inconvénients, parmi ces inconvénients, la nécessité de plusieurs satellites pour couvrir toute la terre. Le temps de visibilité nécessite des mécanismes pour la passation des communications (Handover). Dans les communications, le mouvement de ces satellites à des grandes vitesses, cause l'effet doppler d'où la nécessité de réglage à la réception pour avoir la bonne fréquence.

1.3.3 Les orbites à moyen altitude :

Cette orbite se situe entre le GEO et le LEO, à une altitude d'environ 10000km. Un système de satellites à cette orbite nécessite moins de satellite que celui d'un LEO pour couvrir toute la terre. Leur vitesse est moyen ce qui fait que la période soit de 6 heures environ. La zone de couverture est relativement large, donc moins de passation de communication (handover).

Les principaux inconvénients sont la nécessité d'une grande puissance de transmission et des antennes spéciales pour les frontières de la zone de couverture.

Le tableau 1.2 résume les principales caractéristiques des différentes orbites spatiales.

Orbites	LEO	MEO	GEO
Période orbital	1.5-2 h	5-10 h	24 h
Altitude	500-1500 km	8000-18000 km	35800 km
Durée de visibilité	15-20 mn/pass	2-8 h/pass	permanent
Délai de propagation	~ms	Dizaine de ms	>250 ms
Bilan de liaison	Favorable pour les petits satellites terminaux portatifs	Non favorable pour les terminaux portatifs	Non favorable pour les terminaux portatifs
Couverture instantanée de la terre	6000 km	12000-15000 km	16000 km
Exemples de systèmes	IRIDIUM, GLOBALSTAR, SKYBRIDGE...	ODYSSEY, INMARSAT P21...	INTELSAT, ARABSAT...

Tableau.1.2 comparaison des orbites pour les satellites de communications [3]

1.4 Les Services de télécommunications par satellites

Les satellites de télécommunications peuvent être classés en fonction des services qu'ils sont appelés à rendre. On distinguera ainsi les services de téléphonie, les services de télédiffusion et enfin les services de transmission de données. Une telle classification pourrait être rendue obsolète dans quelques années par le développement attendu des systèmes satellitaires multimédia qui pourraient, en théorie, véhiculer n'importe quel service.

1.4.1 La téléphonie

On peut distinguer les systèmes de téléphonie fixe par satellite et les systèmes de téléphonie mobile par satellite. La téléphonie fixe par satellite concerne essentiellement les appels internationaux qui mettent en jeu un satellite. Les satellites utilisés sont de type géostationnaire. Ces systèmes sont de plus en plus remplacés, lorsque c'est rentable, par des câbles sous marins.

A côté de la téléphonie fixe par satellite on trouve la téléphonie mobile par satellite et dans ce domaine, deux familles de systèmes existent. Les systèmes de téléphonie mobile par satellite géostationnaires et les systèmes de téléphonie mobile par satellites MEO et LEO. Parmi les systèmes utilisant des satellites GEO on peut citer Inmarsat qui a été le premier système de communications mobiles par satellites d'abord pour la desserte en mer puis en avion et en terrestre. Des systèmes sont actuellement en développement. On peut ainsi citer le cas récent de Thuraya qui offre un service de téléphonie mobile sur l'Asie centrale, le Moyen Orient, l'Afrique centrale et l'Europe. Ce système a la particularité d'offrir de la téléphonie mobile au moyen d'un satellite Géostationnaire. Le terminal de taille raisonnable (à peine plus volumineux qu'un terminal GSM) a une antenne omnidirectionnelle mais réussit cependant à "passer" le bilan de liaison d'une système GEO.

1.4.2 La télédiffusion

La transmission vidéo par satellite est la première application des satellites de télécommunications. Elle est estimée à 60% de la capacité du secteur spatial. La transmission

peut être faite en utilisant les normes vidéo analogiques (PAL, SECAM, NTSC) mais dans la plupart des systèmes actuels ce sont les normes vidéo numériques qui sont utilisées.

On utilise essentiellement la norme DVB-S (Digital Video Broadcasting Satellite) qui utilise un codage MPEG-2 du flux vidéo et permet le transfert du signal entre les systèmes à satellites, les systèmes hertziens et les systèmes par câbles. Tous les bouquets satellites européens utilisent (obligation réglementaire) la norme DVB-S. La norme numérique audio correspondante pour la diffusion de radio numérique s'appelle le DAB (Digital Audio Broadcasting).

1.4.3 La transmission de données

La transmission de données constitue la troisième grande application des satellites de télécommunication.

a- Les réseaux d'entreprise VSAT :

Les réseaux d'entreprise par satellite sont apparus vers 1980 grâce à la diminution de la taille et donc du coût des stations terriennes. Cette diminution a permis au satellite de concurrencer efficacement les infrastructures terrestres pour des réseaux d'au moins quelques dizaines de sites. On parle de VSAT (Very Small Aperture Terminal) pour des stations terriennes dont le diamètre d'antenne est inférieur à 2,4 mètres.

b- La radiomessagerie :

La radiomessagerie par satellites est un service offert sur plusieurs satellites GEO comme Inmarsat-C et D, OmniTracs ou encore EutelTracs. Elle existe aussi sur des constellations en orbite basse telle OrbComm.

c- L'Internet par satellite :

L'Internet par satellite est un sujet très important actuellement et le satellite fait partie des solutions d'accès local au même titre que le, l'ADSL, les solutions câblés ou d'autres technologies. Le programme SkyBridge d'Alcatel fait partie de ce type de systèmes.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu des généralités sur les systèmes de communication par satellite. On a expliqué leur fonctionnement, les stations terriennes et les stations spatiales.

On a vu le principe des communications satellitaires, et les gammes de fréquences utilisées. On a détaillé un peu les principales orbites utilisées par les satellites et une comparaison entre ces orbites. A la fin on a cité quelques services qui sont offertes par les compagnies de satellites.

2 La liaison satellitaire

Dans ce chapitre on étudie les différentes caractéristiques d'une liaison satellitaire, et les phénomènes qui affectent notre signal. Pour cela on va suivre le signal traversant les différents blocs du système d'émission, du système de réception, et le milieu de propagation.

Après avoir étudié les phénomènes qui affectent le signal, et les opérations qui le traitent au bord des systèmes d'émission et de réception, on fait un calcul de bilan de liaison qui sera utile pour évaluer la qualité de notre liaison de communication.

2.1 Caractéristique d'une liaison satellite

Une liaison satellitaire doit assurer une communication fiable et de bonne qualité, ce qui implique que le signal transmis par la station d'émission doit arriver à la station de réception avec une puissance de la porteuse d'information supérieure à la puissance du signal non désiré généré par les différentes sources de bruit et d'interférence inévitable.

La qualité d'une communication satellitaire est déterminée par le rapport signal sur bruit de la liaison. Pour une communication numérique on utilise le taux d'erreur binaire BER qui est dérivé du rapport signal sur bruit.

Pour la conception d'une liaison satellite, le facteur fondamental pris est de calculer le bilan de liaison en fonction des caractéristiques du satellite, des stations terriennes et de l'environnement. Avant de calculer le bilan de liaison, il faut d'abord voir les multiples effets qui affectent le signal tel que les gains, les bruits, et les pertes.

2.1.1 Le gain de l'antenne :

L'antenne est l'interface entre le guide d'onde du satellite et l'espace libre. Il transforme l'énergie électrique en une énergie magnétique qui se propage dans l'espace libre. Dans le domaine du satellite, les antennes sont choisies pour avoir le maximum d'information dans la station terrienne, pour minimiser les distorsions du signal dans l'espace.

Une antenne est en général caractérisée par son gain, et sa directivité. Une antenne jugée appropriée pour les communications satellitaires, devrait avoir un grand gain, et un angle à 3dB très étroit. Plusieurs types d'antennes sont utilisés pour remplir ses critères, dont les antennes à réflecteur parabolique, les antennes à lentille, et les réseaux d'antennes. Les antennes hélicoïdales sont plus particulièrement utilisées dans le domaine militaire.

Le gain d'une antenne dépend de son diamètre, son rendement et de la fréquence utilisée tel que démontré par l'équation suivante.[4]

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (2.1)$$

où

D : le diamètre de l'antenne ;

η : le rendement de l'antenne (généralement varie entre 0.5-0.6); λ : la longueur d'onde qui est définie comme : $\lambda = \frac{c}{f}$; avec C :la célérité de la lumière et f : la fréquence du signal.

La zone de couverture du satellite, dépend de l'angle d'ouverture à (3dB) du lobe principal de l'antenne. Les zones de couvertures différent selon l'utilisation du satellite, la PIRE dépend de la couverture désirée : Dans les couvertures globales elle est de l'ordre de 15 – 25dBW (ex : télédiffusion), de l'ordre de 25 – 35dBW (ex : communication téléphonique) dans les couvertures zonales et de l'ordre de 35 – 45dBW pour les couvertures ponctuelles.

La station terrienne doit avoir une antenne de réception sensible pour recevoir le signal émis par le satellite. L'antenne doit avoir un gain élevé, et un lobe très étroit pointé vers le satellite. Un lobe non directif n'est pas utile car la destination est ponctuelle. Un système de tracking est nécessaire si le satellite n'est pas géostationnaire.

La densité de puissance surfacique est donnée par :[4]

$$W_t = \frac{P_e G_e}{4\pi d_t^2} \quad (2.2)$$

Le produit $P_e.G_e$ est la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE), qui est une caractéristique de l'émetteur.

2.1.2 Les pertes :

- Les atténuations en espace libre :

Le signal est atténué dans l'espace, avant d'arriver à l'antenne de réception cette atténuation est décrite par l'équation :[4]

$$L_p = \left(\frac{4\pi d f_c}{c} \right)^2 \quad (2.3)$$

f_c : la fréquence du signal ;

C : La vitesse de la lumière.

d : la distance parcourue par le signal.

A la réception on va avoir, la puissance reçu par l'antenne est :[4]

$$P_r = \frac{P_e G_e G_r}{L_p} \quad (2.4)$$

G_r : est le gain de l'antenne de réception

- Les atténuations dues à la pluie :

La propagation des ondes centimétriques est perturbée par la pluie. L'importance de perturbation est en fonction de la fréquence utilisée. Le Tableau 2.1 montre l'atténuation due à la pluie dans deux régions (Europe et Afrique équatoriale) pour deux durées : 1% et 0.1% du temps. On constate que le signal est plus perturbé dans les régions pluvieuses (Afrique équatoriales). On constate aussi que les fréquences élevées sont très perturbés (Bande Ku) et peut entraîner des interruptions de service si elle est très perturbés (Bande Ka).

Bande	Temps	Europe	Afrique
L	1%	0	0
	0.1%	0	0
S	1%	0	0
	0.1%	0	0
C	1%	0	0
	0.1%	0	De 0 à 0.3 dB
Ku	1%	0.1 dB	De 0.2 à 2 dB
	0.1%	0.8 dB	De 2 à 16 dB

Tableau 2.1 affaiblissement consécutif à la pluie [2]

2.1.3 La puissance de bruit :

La puissance de bruit à la réception est due aux sources internes et aux sources externes.

La température de bruit

Dans le calcul du bilan de liaison, le terme N_0 (densité spectral du bruit) ou T (la température de bruit) est utilisé à la place de N (la puissance de bruit), donc ce n'est pas nécessaire de spécifier la bande passante du bruit. La relation entre ces deux termes :

$$N = kTB = N_0B \quad (2.5)$$

Où k est la constante de Boltzmann, et T en degré kelvin.

Le récepteur doit amplifier le bruit de l'entrée moins que le signal utile. A cause du bruit thermique du circuit, l'amplificateur va apporter plus de bruit au signal reçu.

L'antenne capte aussi les bruits externe qui sont produits par la terre, les phénomènes naturels, ou par les radiations extraterrestre comme le soleil, les étoiles...

Ces bruits sont capter dans la direction de l'antenne, l'expression de la température est :[3]

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \iint g(\Omega)T(\Omega)d(\Omega) \quad (2.6)$$

$d(\Omega)$:est l'élément d'angle solide dans la direction Ω

$g(\Omega)$ et $T(\Omega)$ sont le gain et la température équivalente de bruit dans la direction Ω

Le bilan de liaison dépend des caractéristiques du récepteur. La figure de mérite d'un récepteur est une caractéristique du récepteur définie par le rapport entre le gain de l'antenne et la température équivalente du bruit du système de réception G/T . Pour une station terrienne, cette valeur est dans un plage de 35dB(K⁻¹) pour une station équipé d'un antenne de 15 à 18 mètres à 4GHz, jusqu'à 15.5dB(K⁻¹) pour une station VSAT(12 GHz, antenne 1.2m).

2.1.4 L'effet de non linéarité dans un amplificateur de puissance

A la sortie d'un satellite ou d'une station terrienne, et avant l'émission, un amplificateur de puissance est utilisé pour amplifier le signal. Ces amplificateurs introduisent généralement une non-linéarité, à cause de l'effet de saturation.

Quand plusieurs porteuses sont transmises simultanément à des fréquences différentes, cette non-linéarité va entraîner une intermodulation qui n'est pas souhaité.

Malgré que le signal soit amplifié des effets indésirables vont apparaitre :

- Conversion AM-AM : distorsion de la sortie par rapport à l'amplitude de l'entrée
- Conversion AM-PM : un décalage non-linéaire de la phase entre l'entrée et la sortie. Cette conversion a un effet néfaste surtout pour les communications numériques, où l'information est généralement est portée sur la phase.

La figure 2.1 montre la relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie en pour le gain et la phase.[5]

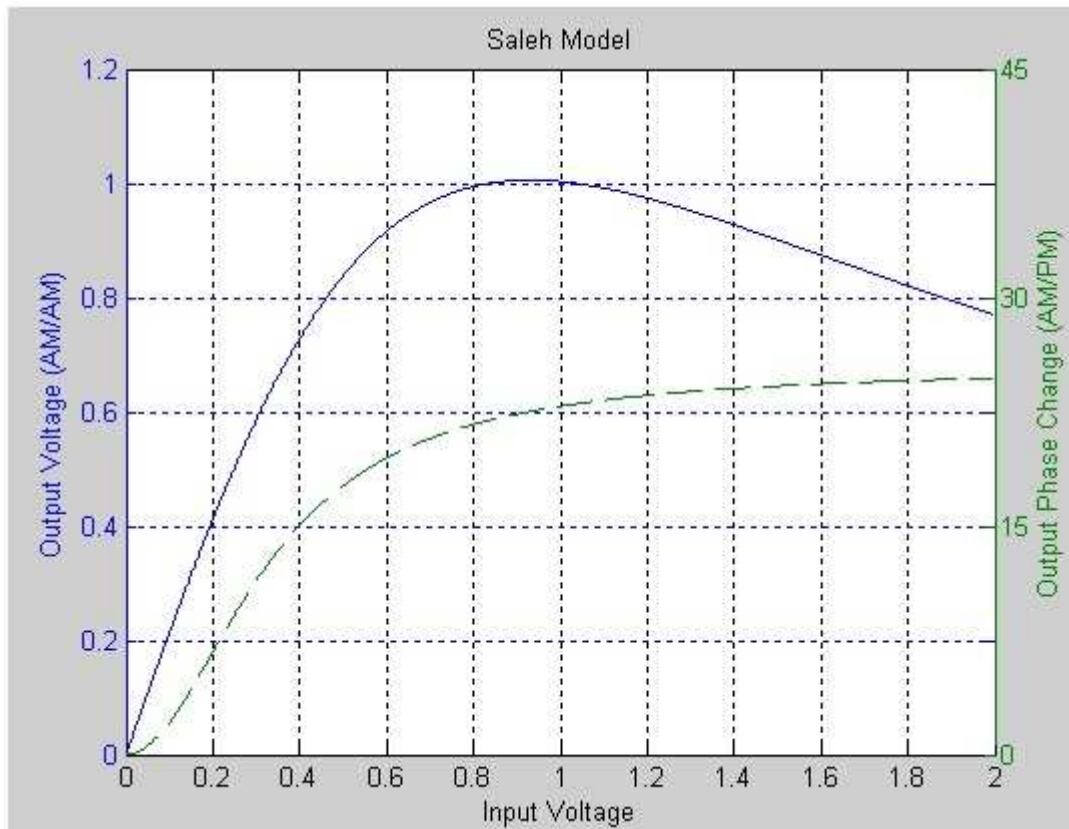


Figure.2.1 la relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie

La non-linéarité dans amplificateur de puissance provoque donc 3 types d'effets indésérables

- La génération des signaux indésirables qui interfère avec les signaux voulu. Ces signaux indésirables peuvent être assimilés à un bruit blanc et être compter dans le bilan de liaison.
- La dégradation du BER dans le cas des communications numériques.
- La réduction de la puissance de sortie, pour faire fonctionner l'amplificateur dans la zone linéaire.

2.1.5 Autres effets

- **influence de l'atmosphère**

Les ondes traversent l'atmosphère sur leur trajet entre les stations terriennes et le satellite. Dans la gamme de fréquences les plus couramment utilisées (entre 1 et 30 GHz) les effets de la troposphère (du sol à 15 km d'altitude environ) et de l'ionosphère (de 70 à 1 000 km d'altitude) sont prépondérants.[1]

Ils se traduisent par :

- **une rotation du plan de polarisation de l'onde (effet Faraday) dans la traversée de l'ionosphère** : cette rotation est inversement proportionnelle au carré de la fréquence et vaut quelques degrés à 4 GHz. Il en résulte une atténuation de l'onde porteuse reçue $L_{pol} \text{ (dB)} = -20 \log(\cos\gamma)$, où γ est l'angle de rotation, et une dégradation du découplage de polarisation XPD (cross polarisation discrimination) : $XPD \text{ (dB)} = -20 \log(\tan\gamma)$. Si l'on considère une rotation de 9° à 4 GHz, $L_{pol} = 0,1 \text{ dB}$ et $XPD = 16 \text{ dB}$;
- **une dégradation du découplage de polarisation sous l'effet de la pluie et des cristaux de glace dans les nuages proches de l'isotherme 0°** : à des fréquences proches de 12 GHz, la pluie provoque typiquement une réduction de XPD à des valeurs inférieures à 20 dB pendant 0,01 % du temps aux latitudes tempérées, tandis que les cristaux de glace provoquent une réduction supplémentaire de l'ordre de 2 dB de la valeur de XPD pendant le même pourcentage de temps ;

- **L'évanouissement multi chemin (Multipath fading)**

Ce phénomène est provoqué par les combinaisons constructives et destructives des répliques du signal arrivant au récepteur due au temps de propagation dans les différents chemins de l'émetteur jusqu'au récepteur qu'il n'est pas négligeable par rapport à la période de transmission des symboles. L'évanouissement multi chemin est encore appelé évanouissement sélectif en fréquence parce que il dépend fortement de la fréquence. Même lorsque la puissance reçue globalement est importante, cet évanouissement sélectif reste gênant car il provoque une déformation du signal émis qui peut grandement perturber le travail du récepteur. Pour étudier la faisabilité d'une transmission, nous avons donc besoin d'une mesure de ces délais. Mais l'influence d'un chemin de Propagation sur le signal dépend

aussi de son amplitude et de l'évaluation de l'écart entre le premier et le dernier chemin observé qui ne fournit pas une information suffisante.

Différents procédés existent pour limiter les effets de l'évanouissement multi chemin.

On peut agir à l'émission en adaptant la mise en forme des signaux pour les rendre moins sensibles aux déformations. Il existe aussi une possibilité de doter le récepteur de moyens d'analyse des déformations afin d'en tenir compte dans ses décisions, dites à maximum de vraisemblances, ou tout au moins d'y apporter des corrections avant de fournir le signal à un organe de décision simplifiée. On parle alors d'égalisation.

- **L'ombrage (Shadowing)**

Ce terme fait référence aux variations de puissance reçues dues à la présence d'obstacles de grandes dimensions. En première approximation, on considère qu'elles agissent uniformément sur la largeur de bande de transmission. En règle générale, elle peut être considérée comme très lente à l'échelle des débits de transmission. Le phénomène d'ombrage est d'ailleurs souvent désigné sous l'appellation d'évanouissement lent (Slow Fading), c'est à dire la durée d'un symbole est très inférieure au temps de cohérence du canal, et que le signal reçu ne varie donc pas ou très peu sur la durée d'un symbole.

- **Effet Doppler**

L'effet Doppler c'est le décalage en fréquence du a la mobilité, il est fonction de :

- Direction du déplacement ;
- Vitesse du déplacement.

Si en prend par exemple un satellite **LEO**, sa vitesse de défilement v est d'environ 7 km/s. L'écart de fréquence Δf qui résulte de cette vitesse est égal à v/c , ou c est la vitesse de la lumière.

$$f_{\text{reelle}} = f_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right) \quad (2.7)$$

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

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

2.2 Bilan de liaison

Dans cette partie nous allons aborder le calcul du bilan de liaison lors d'une communication entre deux stations au sol et un satellite.

Le bilan de liaison consiste à comptabiliser l'ensemble des pertes et des gains le long du trajet de la porteuse radioélectrique de la station terrienne d'émission à la station terrienne de réception. Cela fournit la puissance de la porteuse à l'entrée du récepteur de la liaison considérée.

Nous appelons « bilan de liaison » l'équation permettant de calculer le rapport signal utile sur bruit en sortie du récepteur en fonction de tous les paramètres qui influent sur la puissance de l'onde émise. Toute liaison satellite se décompose en deux parties.

- Liaisons montantes (uplink): station terrienne \rightarrow satellite;
- Liaisons descendantes (downlink): satellite \rightarrow stations terrienne;

Il peut y avoir éventuellement une liaison inter-satellites.

Les liaisons montantes et descendantes consistent aux porteuses RF modulées, cependant la liaison inter-satellite peut être radio ou optique. Les porteuses sont modulées par le signal en bande de base véhiculant l'information.

Comme il a été expliqué avant, le but du bilan de liaison est de calculer la qualité de la liaison satellitaire :[3]

- En cas d'une communication analogique, cette qualité est évaluée par le rapport signal sur bruit.
- En cas d'une communication numérique la qualité est mesurée par le taux d'erreur binaire (BER).

2.2.1 La liaison montante :

L'équation (2.4) nous donne la puissance reçue par l'antenne de réception. Dans une liaison montante on utilise cette équation pour calculer le bilan de liaison.

$$C_u = \frac{P_e G_{et} G_{sr}}{L_u} (W) \quad (2.8)$$

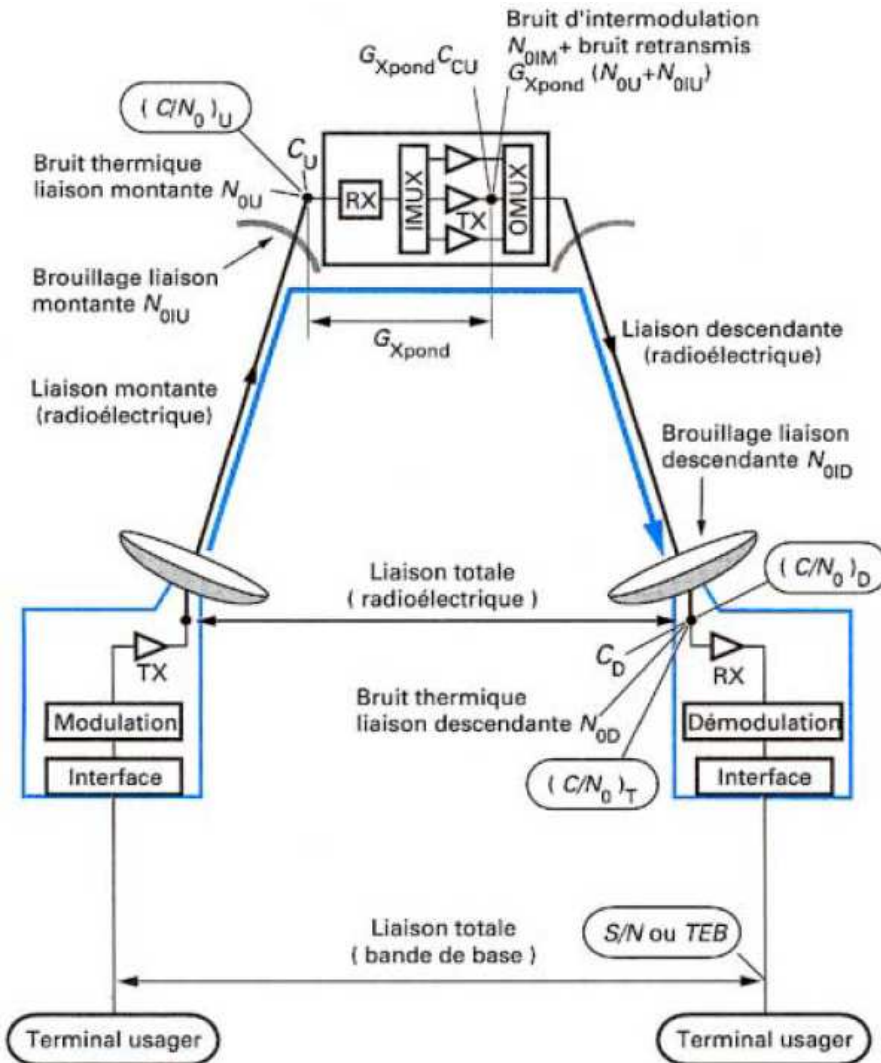


Figure 2.2 chaîne de transmission satellitaire [1]

P_e : la puissance de sortie de l'amplificateur haute puissance de la station terrienne

G_{et} : le gain de l'antenne d'émission de la station terrienne vers le satellite.

$P_e G_{et}$: est la puissance isotrope rayonnée équivalente

L_u : l'atténuation en espace libre dans la liaison montante.

G_{sr} : le gain de l'antenne de réception du satellite dans la direction de la station terrienne.

Le rapport signal sur densité de bruit dans la liaison montante est donnée par :

$$\frac{C}{N_0} = \frac{P_e G_{et} G_{sr}}{L_u k T_u}$$

$$\frac{c}{N_0} = \frac{(PIRE)_e \left(\frac{G}{T}\right)_s}{L_u k} \quad (2.9)$$

T_u : est la température équivalente de bruit à l'entrée de l'antenne de réception du satellite

$\left(\frac{G}{T}\right)_s$: Figure de mérite du récepteur satellite

En dB on peut écrire :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_u = \left(\frac{G}{T}\right)_s + (PIRE)_e - L_u + 228.6 \quad (2.10)$$

2.2.2 Liaison descendante :

L'équation (2.4) nous donne la puissance reçu par l'antenne de réception. Dans une liaison montante on utilise cette équation pour calculer le bilan de liaison.

$$C_d = \frac{P_s G_{st} G_{er}}{L_d} (W) \quad (2.11)$$

P_s : la puissance de sortie de l'amplificateur haute puissance du satellite.

G_{st} : le gain de l'antenne d'émission du satellite vers la station terrienne.

$P_s G_{st}$: est la puissance isotrope rayonnée équivalente

L_d : l'atténuation en espace libre dans la liaison descendante.

G_{er} : le gain de l'antenne de réception de la station terrienne dans la direction du satellite

Le rapport signal sur densité de bruit dans la liaison descendante est donnée par :

$$\frac{C}{N_0} = \frac{P_s G_{st} G_{er}}{L_d k T_d}$$

$$\frac{c}{N_0} = \frac{(PIRE)_s \left(\frac{G}{T}\right)_e}{L_d k} \quad (2.12)$$

T_d : est la température équivalente de bruit à l'entrée de l'antenne de réception de la station terrienne.

$\left(\frac{G}{T}\right)_e$: Figure de mérite du récepteur de la station terrienne.

En dB on peut écrire :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d = \left(\frac{G}{T}\right)_e + (PIRE)_s - L_d + 228.6 \quad (2.13)$$

2.3 Exemple [7]:

Dans cet exemple, on va étudier le bilan de liaison entre 2 stations terriennes (Washington et Los Angeles) en utilisant le satellite Telstar 5.

Telstar 5 est un satellite géostationnaire situé à 97.0° Ouest. La puissance isotrope rayonnée équivalente à travers la station de réception (Los Angeles) est de 49.2dBW, et la figure de mérite à la réception depuis la station d'émission est de 2.0dB/K. La liaison montante travaille à 14GHz et la descendante à 12GHz.

La distance entre station d'émission à Washington et le satellite est de 37722km. La station a une antenne de 9.2 m de diamètre avec un rendement de 0.55. La puissance à la sortie de l'amplificateur à haute puissance est de 100W (20dBW). On estime les pertes de ligne avant l'émission de 1dB. Le gain de l'antenne d'émission donc ça sera : (selon éq. 2.1)

$$G_{et} = 0.55 \left(\frac{\pi \cdot 9.2}{0.0214}\right)^2 = 1003253 = 60dBi$$

La puissance isotrope rayonnée équivalente est :

$$(PIRE)_e = 20 - 1 + 60 = 79dBW$$

Dans la liaison montante le signal subit une atténuation en espace libre de 206.9dB (selon l'éq.2.8), on ajoute l'atténuation due à la pluie 5.9dB. Si on considère la perte due au pointage de l'antenne de 0.2dB le rapport signal sur bruit sera donc :

$$\frac{C}{N_0} = 79 + 2 - 212.8 - 0.2 + 228.6 = 96.6dBHz$$

La bande passante du bruit B est de 22.5MHz (73.5dBHz)

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{dB} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{dB} - B_{dB} = 96.8 - 73.5 = 23.1dB$$

La distance entre la station d'émission et le satellite est de 37453km. Le diamètre de l'antenne de réception est de 5m avec une efficacité de 0.6, d'où un gain (selon 2.1):

$$G_{er} = 0.6 \left(\frac{\pi * 5}{0.025}\right)^2 = 53.7dBi$$

La fréquence utilisée pour la liaison descendante est 12GHz ($\lambda=0.025m$)

La température équivalente du bruit à la réception est de 150K (21.8dBK). Le facteur de mérite du récepteur sera donc :

$$\left(\frac{G}{T}\right)_e = 53.7 - 21.8 = 32dB/K$$

La puissance isotrope rayonnée équivalente vers la station de réception est de 49.2dB. L'atténuation en espace libre est de 205.5dB. Les autres pertes qui influent sur le signal sont : l'atténuation due à la pluie 1.9dB, les pertes dues aux gazes de l'atmosphère 0.1dB, la perte due à l'erreur du pointage de l'antenne 0.2dB. On peut ajouter une dégradation du facteur de mérite de 2.2dB. Le rapport signal sur bruit sera donc :

$$\frac{C}{N_0} = 49.2 + 32 - 205.5 - 1.9 - 2.2 - 0.1 - 0.2 + 228.6 = 99.9dBHz$$

$$\frac{C}{N} = \frac{C}{N_0} - B = 99.9 - 73.5 = 26.4dB$$

Le schéma (2.3) nous donne les niveaux de puissance au long de la liaison satellitaire.

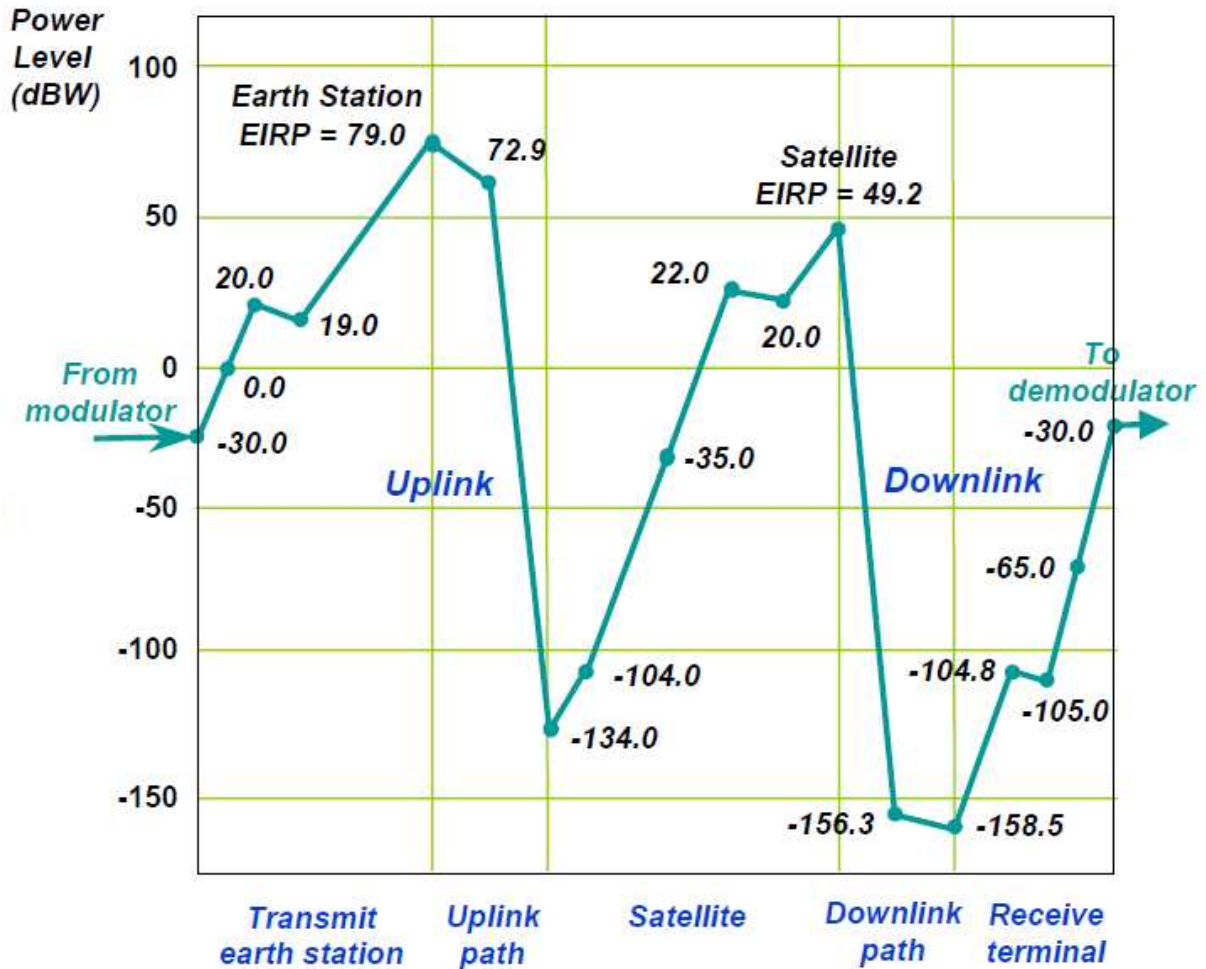


Figure.2.3 Les niveaux de puissance dans une liaison satellitaire [7]

Ce schéma illustre bien les niveaux de puissance dans une liaison satellitaire, à la sortie du démodulateur la puissance est de -30dBW.

La liaison montante

- 30.0 dB : Amplification du circuit de commande
- 20.0 dB : Amplificateur Haute Puissance de la station terrienne
- 1.0 dB : Perte de ligne
- 60.0 dB : Gain d'antenne de la station terrienne
- 6.1 dB : Atténuation due à la pluie + autres pertes
- 206.9dB : Atténuation en espace libre

Satellite

- 30.0 dB : Gain d'antenne de réception
- 69.0 dB : Amplificateur du récepteur
- 57.0 dB : Gain de l'amplificateur haute puissance en saturation

2.0 dB : autres pertes
29.2 dB : gain de l'antenne d'émission

La liaison descendante

205.5 dB : Atténuation en espace libre
2.2 dB : Atténuation due à la pluie + autres pertes
53.7 dB : Gain de l'antenne de réception de la station terrienne
0.2 dB : Pertes de ligne
40.0 dB : gain du LNA
35.0 dB : gain de l'amplificateur FI et du convertisseur abaisseur

-30 dBW : Entrée du démodulateur

2.4 Conclusion

On a vu dans ce chapitre les différentes caractéristiques d'une liaison satellitaires : les pertes, les gains, les distorsions qui affectent le signal.

Après on a vu le calcul d'un bilan de liaison satellitaire, la liaison montante et la liaison descendante. Un exemple de calcul nous montrés une vue général sur le comportement du signal dans le long de la liaison satellitaire

L'étude des différentes caractéristiques de la liaison satellitaire et le bilan de liaison nous permet d'étudier la qualité de la liaison et de concevoir notre modèle de canal satellite.

3 Simulation

3.1 Introduction :

Dans cette étude, on a simulé une liaison satellitaire en simulant les différents effets qui influent sur le signal à transmettre. La figure (3.1) montre les différents blocs qui sont utilisés. Cette simulation est faite sur Matlab®.

Dans cette simulation on a utilisé un canal d'un satellite géostationnaire dans la bande C (4 GHz). Seulement la liaison descendante est simulée. Les caractéristiques de cette liaison sont :

- Une distance entre l'émetteur et le récepteur de 35600 km.
- L'absence de l'effet doppler.
- L'absence de l'effet de la pluie.

On a utilisé une modulation PSK d'ordre 2 et d'ordre 4 (BPSK et QPSK).

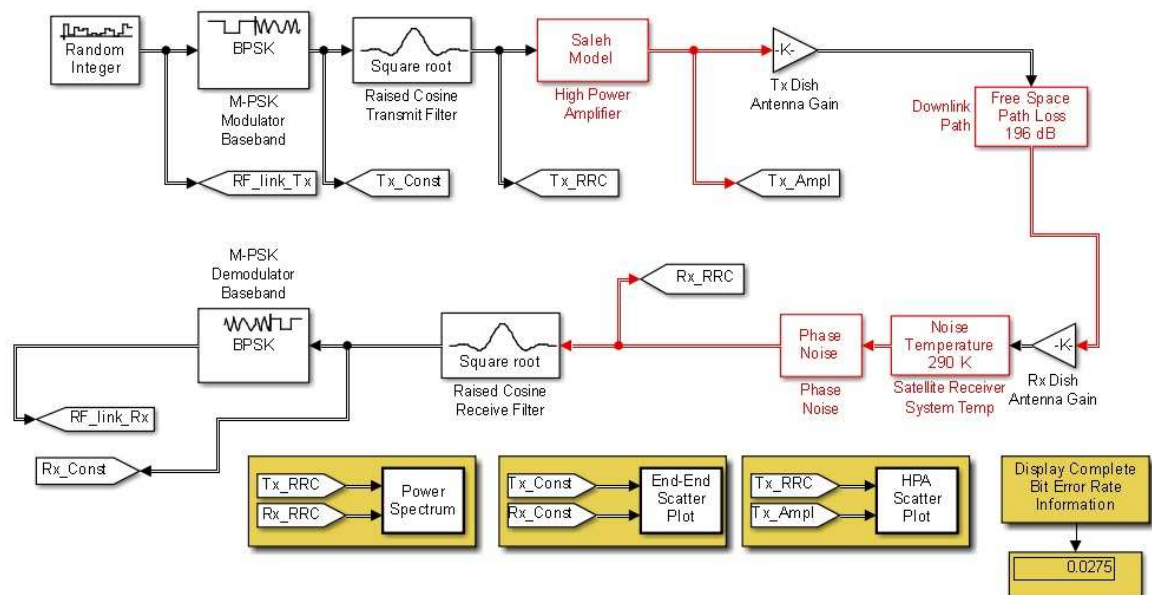


Figure 3.1 Modèle du canal satellite utilisé dans Simulink®

Le programme utilise une source continue. Cette source génère un signal numérique aléatoire.

Le premier bloc est un modulateur numérique PSK. Dans cette simulation on a utilisé deux ordres de modulation PSK : BPSK et QPSK.

Un filtre cosinus surélevé est utilisé pour éliminer les interférences inter-symboles. Ce filtre a un roll-off factor de 0.3.

Pour simuler l'effet de saturation d'un amplificateur haute puissance, on a utilisé un bloc de non-linéarité sans mémoire (memoryless non-linearity) avec le model de Saleh qui est défini par les équations du gain et de la phase à la sortie.[6]

$$g(r) = \frac{\alpha_g \cdot r}{1 + \beta_g \cdot r^2} \quad (3.1)$$

$$\Phi(r) = \frac{\alpha_\Phi \cdot r^2}{1 + \beta_\Phi \cdot r^2} \quad (3.2)$$

α et β sont des facteur qui caractérise la non linéarité, r est le signal d'entrée.

Les antennes d'émission et de réception sont simulées par des blocs de gain, ce gain est calculé en fonction de la fréquence du signal (4GHz) est du diamètre de l'antenne (1.2 m).

L'atténuation en espace libre est un bloc qui est atténue le signal par un facteur en fonction de la fréquence du signal et de la distance entre le satellite et la station terrienne.

Le bruit thermique à a réception est simulé par un bloc (Receiver Thermal noise), la température équivalente à la réception est de 290K. Un autre bloc est ajouté pour simuler les bruits de phase, la valeur prise est (-48dBc/Hz à 100Hz).

A la fin un filtre cosinus surélevé de réception permet de restituer le signal numérique, et il l'envoie au démodulateur.

3.2 Simulations et résultats :

On a utilisé le modulateur BPSK et le modulateur QPSK, la simulation montre les figures suivantes :

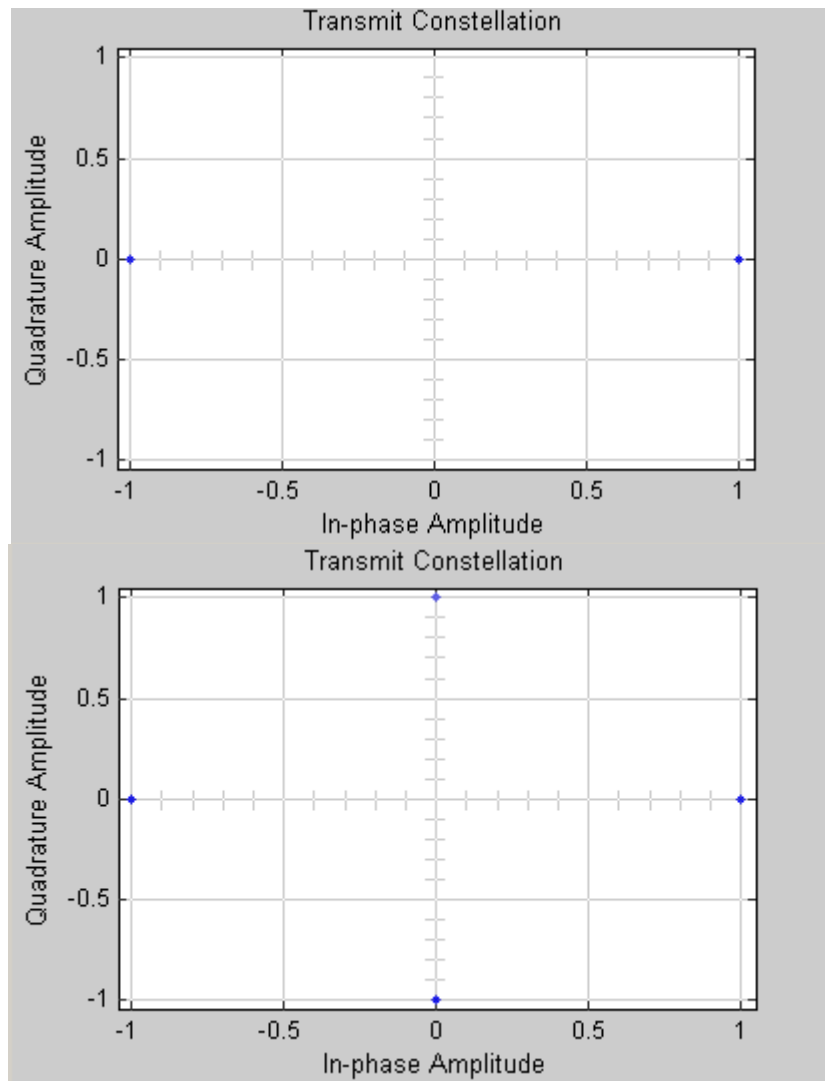


Figure 3.2 constellation du signal modulé à l'émission

La figure 3.2 montre la constellation du signal modulé à l'émission, ce signal, passe par un filtre cosinus surélevé pour éliminer les interférences inter-symboles. La figure 3.3 montre le signal après le filtrage.

Après l'amplification du signal par l'amplificateur haute puissance, on peut voir bien (figure (3.4)) la distorsion du signal due à la saturation de l'amplificateur. La distorsion en gain et en phase est visible, on peut observer la rotation de la constellation, et la dispersion non linéaire des points.

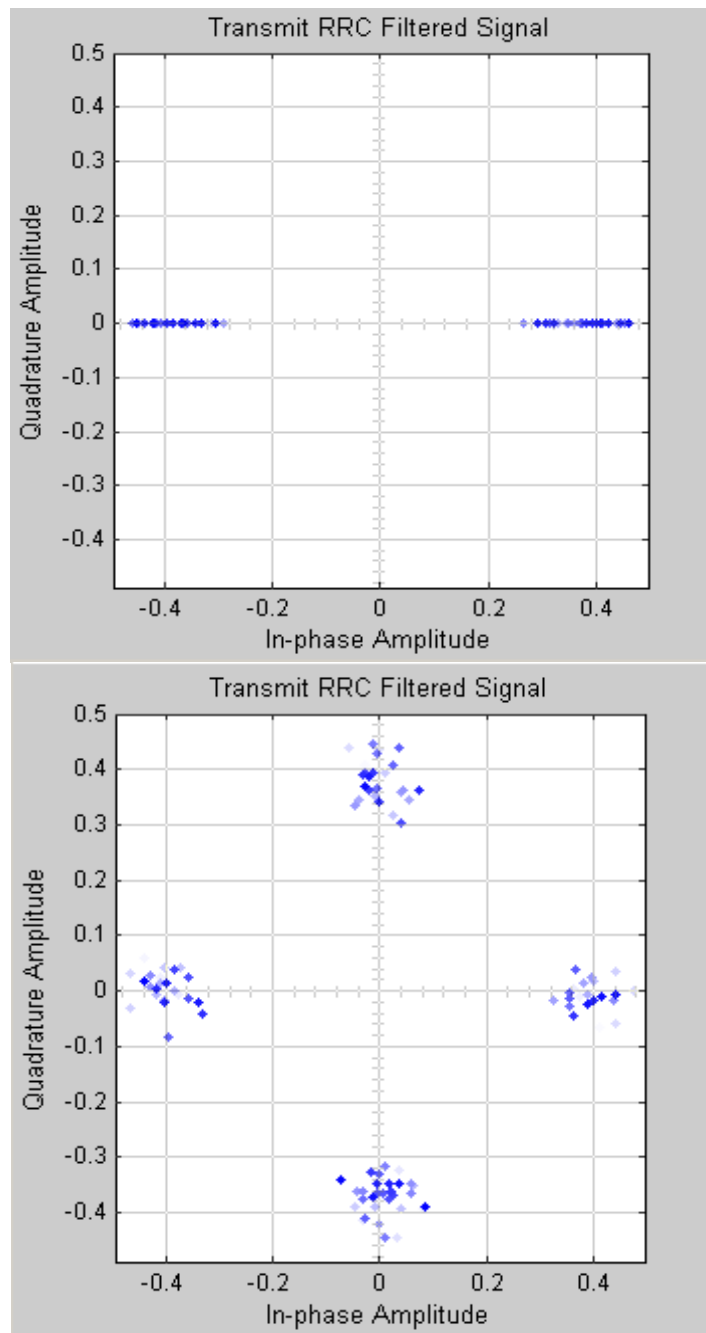


Figure 3.3 le signal à l'émission après un filtre cosinus surélevé

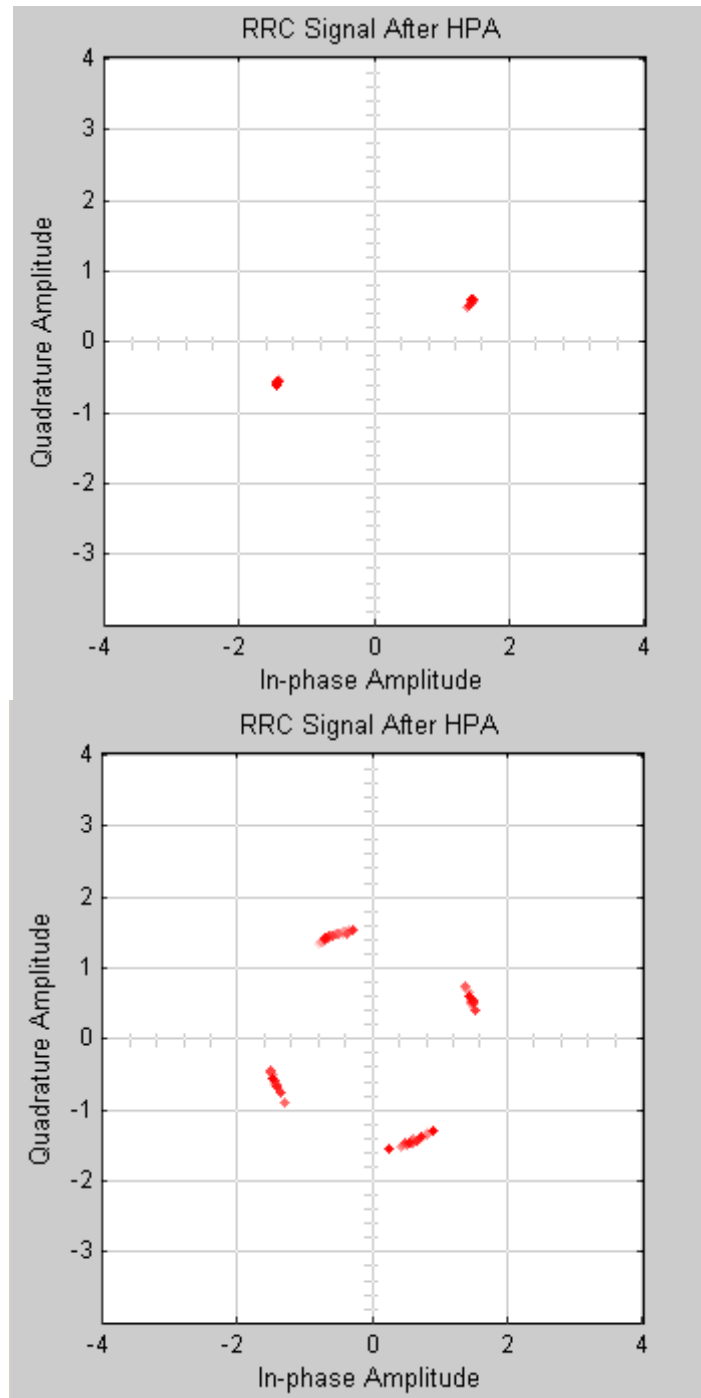


Figure 3.4 le signal à la sortie de l'amplificateur haute puissance

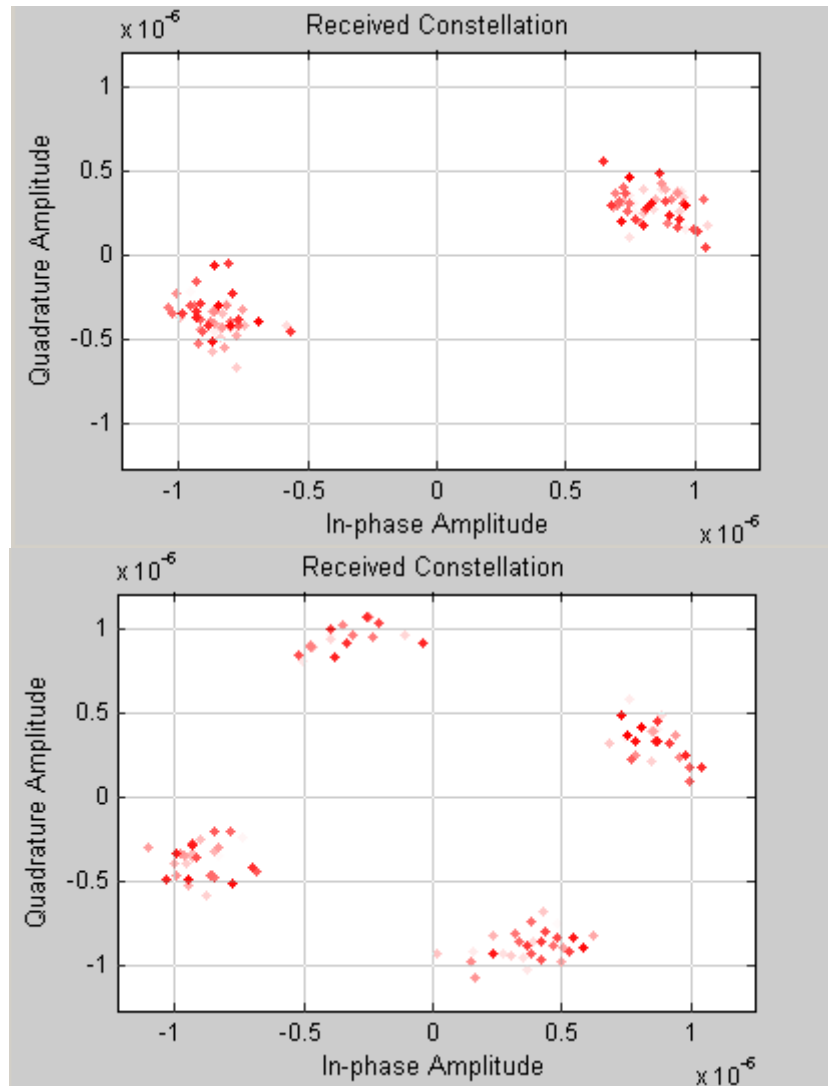


Figure 3.5 le signal numérique récupéré avant démodulateur

A la réception figure (3.5), la constellation montre le signal reçu après les distorsions et le bruit du canal. Le signal est très faible il faut un amplificateur faible bruit pour l'amplifier.

Le signal reçu peut être rectifié pour minimiser le taux d'erreur binaire, en amplifiant le signal jusqu'à le seuil de exigence par le détecteur. La phase peut être corrigée aussi, pour qu'elle soit dans les régions de décision correctes.

Cette simulation ne donne pas les valeurs réelles d'un canal satellite. On peut voir que le bruit et les différentes distorsions n'affectent pas beaucoup le signal comme c'est le cas dans la réalité.

Plusieurs sources de bruits, et d'interférence ne sont pas simulées, ce qui rend la simulation incomplète, et ne donne pas les résultats voulus. Des blocs qui interviennent dans le

traitement du signal, dans le satellite et dans la station terrienne, ne sont pas tenus en considération.

4 Conclusions

Les satellites sont parmi les moyens les plus utilisés dans les domaines de télécommunications, vu leurs présence permanent, les services qu'ils offrent, et leur grande couverture, ce qui les rend les plus utilisés surtout dans les endroits désertés. Ces avantages sont confrontés par la forte dégradation de la qualité du signal qui traverse plusieurs milieux perturbants et une longue distance, des phénomènes inévitables d'où la nécessité d'évaluer la qualité de la liaison avant de concevoir un système satellite. Plusieurs d'où la nécessité de les comptabiliser

Dans ce mémoire on a étudié quelques caractéristiques d'une liaison satellitaire, on vu plusieurs phénomènes qui perturbent le signal, les bruits qui l'affecte. On a étudié le bilan de liaison d'une liaison satellite, les caractéristiques non-linéaire, les pertes...

La simulation de la liaison satellitaire conçue est loin de présenter une liaison satellitaire réelle. Ceci est du au plusieurs raisons :

- Un canal réel présente des interférences avec les signaux des fréquences voisines.
- La non-linéarité génère des fréquences images ce qui affecte les autres signaux.
- Les systèmes de réception contiennent plusieurs blocs en cascade qui ont bruit thermique
- Plusieurs pertes ne sont pas tenu en compte, comme les pertes du à la mauvaise orientation des antennes.
- Les effets atmosphériques qui, parfois, distordent beaucoup le signal.

Malgré que ce travail ne simule pas une liaison satellitaire réelle, il simule les principales caractéristiques de cette liaison.

Bibliographie :

- [1] Gérard Maral "systèmes de télécommunication par satellite" technique de l'ingénieur
- [2] Marc Boisseau "Les télécommunications par satellite"
- [3] ITU "Handbook on satellite communication 3rd edition"
- [4] R.Aksas "cours antennes et propagation des ondes 5ème année" école nationale polytechnique 2012-2013
- [5] The Mathworks Inc "Matlab® Documentation" 2013
- [6] Saleh, A.A.M., "Frequency-independent and frequency-dependent nonlinear models of TWT amplifiers," IEEE Trans. Communications, vol. COM-29, pp.1715-1720, November 1981.
- [7] Robert A.Nelson "Satellite Communication System Engineering", Applied Technology Institute.