

Projet : Ingénierie des Télécoms 2

Filière : 5^{ème} Année Télécoms Réseaux et Systèmes Embarqués

Thème : Etudes et Simulations de la tête de réception (LNB)



Réalisé par :
Saliou Mohamadou

Encadré par :
M. Nabil Arsalane

Remerciements

Avant tout propos nous tenons à remercier Dieu tout puissant qui nous a donné la patience, la volonté, le courage d'aller jusqu'au bout de notre travail.

Nous tenons évidemment à remercier, M. Nabil Arsalane, qui est notre Professeur actuel à l'IGA, pour sa patience et le partage de son expertise au quotidien. Ainsi que les membres de l'administration de IGA.

Résumé

Ce rapport présente une analyse approfondie de la tête de réception LNB (Low Noise Block) utilisée dans les systèmes de communication par satellite. L'objectif principal de cette étude est de comprendre le fonctionnement de la tête de réception LNB, ainsi que d'explorer les différentes composantes et paramètres qui influent sur ses performances.

La première partie du rapport examine les principes fondamentaux de fonctionnement de la tête de réception LNB, mettant en lumière son rôle crucial dans la conversion du signal satellite en un format utilisable par les récepteurs. Une attention particulière est accordée à la réduction du bruit, un aspect essentiel pour garantir une réception optimale des signaux faibles.

La deuxième partie du rapport se concentre sur la modélisation et la simulation de la tête de réception LNB. À l'aide d'outils de simulation avancés (ADS), nous explorons les différents scénarios et configurations possibles, évaluant l'impact de divers paramètres tels que la fréquence, la température, et les conditions atmosphériques sur les performances de la tête de réception.

En conclusion, ce rapport offre une vision approfondie de la tête de réception LNB, combinant une compréhension théorique approfondie avec des simulations pratiques. Ces résultats peuvent servir de base pour des optimisations futures et des avancées technologiques dans le domaine des communications par satellite.

Bibliographie

Remerciements.....	2
Résumé.....	3
Bibliographie.....	4
Listes des Figures.....	6
Chapitre 1 : GENERALITES.....	9
1.1 L'orbite géostationnaire.....	9
1.1.1 Définition.....	9
1.1.2 Propriétés.....	9
1.1.3 Altitude de l'orbite géostationnaire et la vitesse du satellite.....	10
1.2 La télévision numérique.....	11
1.2.1 Principe.....	11
1.2.2 Normes.....	11
1.2.3 Codage d'une image de télévision.....	11
1.3 Les facteurs intervenant dans les liaisons montantes et descendantes [2].....	12
1.3.1 Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE).....	12
1.3.2 Affaiblissement pendant le trajet.....	13
1.3.3 Gain à l'entrée du récepteur.....	13
1.3.4 Rapport C/N (Carrier/Noise ou porteuse/bruit).....	14
1.4 Position orbitale des satellites [2].....	14
1.4 Typologie des satellites [2].....	15
1.4.1 Les satellites de télécommunication de faible puissance (de 10 à 20 W Intelsat par exemple).....	15
1.4.2 Les satellites de télécommunication de puissance moyenne (45 à 50 W, Astra-Télécom2-Eutelsat2).....	16
1.4.3 Les satellites de diffusion directe de forte puissance (plus de 130 W, TDF1-2, Télé X, TV Sat).....	16
1.6 Antennes paraboliques [3].....	16
1.6.1 Le réflecteur.....	17
1.6.2 La source.....	18
1.6.1. L'antenne satellite universelle.....	19
1.7 Principes de la réception satellite (LNB).....	19
1.7.1 Fonctionnement d'une LNB.....	20
1.7.1.2 Bandes de fréquences et modulation des signaux satellitaires.....	20
1.8 Caractéristiques techniques des LNB.....	21
1.8.1 Types de LNB (universel, monobloc, etc.) [5].....	21
1.8.1.1 LNB à une tête	22
1.8.1.2 LNB bi-tête (à deux tête).....	22
1.8.1.3 LNB multi-tête (à multi-têtes).....	23
1.8.2. Caractéristiques de gain, de bruit et de polarisation.....	23
1.8.2.1 Gain [8].....	23
1.8.2.2 Facteur de bruit (Noise Figure).....	23
1.8.2.3 Bruit de phase en numérique	24

Chapitre 2 : la chaîne de réception typique(LNB).....	25
2.1 Invention du LNB [14].....	25
2.2 Description détaillée de la chaîne de réception.....	26
2.2.1 Convertisseur de fréquence (Downconverter).....	26
2.2.2 Amplificateur à faible bruit (LNA - Low Noise Amplifier) [11].....	28
2.2.3 Filtre passe-bande.....	29
2.2.4 Réjection d'harmoniques.....	29
2.2.5 Connecteur de sortie (F-connector).....	29
2.2.6 Alimentation électrique	30
2.2.7 Boîtier étanche	30
2.2.8 Support de fixation.....	30
2.3 Fonctionnement interne de la LNB[14].....	31
2.4 Formulation du problème.....	31
2.5 Liaison entre l'antenne et la LNB.....	32
2.6 Le récepteur numérique ou décodeur.....	32
2.6 La carte d'abonné.....	33
2.7 Le montage des antennes paraboliques [15]	34
2.8 Analyse des perturbations et des obstacles dans la réception.....	37
2.8.1 Absorption atmosphérique.....	37
2.8.1.1 Absorption atmosphérique solaire[16].....	37
2.8.1.2 Absorption atmosphérique satellitaire[16].....	38
2.9 Effets météorologiques (pluie, neige, etc.).....	40
2.10 Obstacles physiques (arbres, bâtiments, etc.).....	41
2.11 Solutions pour minimiser les perturbations.....	42
Chapitre 3 : Simulations et Résultats.....	43
3.1 Méthodologie de simulation.....	43
3.1.1 Choix de logiciels de simulation (ADS).....	43
3.2 Modélisation de la chaîne de réception dans le logiciel sélectionné.....	44
3.2.1 Les Composants utilisés sous ADS.....	45
P_1Tone (Power Source, Single Frequency) :.....	45
Filtre BPF_Butterworth (Butterworth Bandpass Filter) :.....	45
Amplificateur LNA (Low Noise Amplifier) :.....	46
Mixer:.....	47
Oscillateur V_1Tone :.....	47
La résistance Term :.....	48
Simulateur S-Parameters :.....	48
Filtre LPF_Bessel (situé à la sortie du mélangeur) :.....	49
3.3 Résultats des simulations réalisées.....	50
3.3.1 Simulation 1 : Simulation des paramètres d'impédance et Gain.....	50
3.3.2 Analyse du résultat.....	51
A. Coefficient de réflexion S22 du signal en sortie LNB.....	51
B. Coefficient 21 de Gain.....	52
3.3.3 Simulation 2 : Simulation du niveau de bruit dans la LNB.....	53
3.3.4 Résultats de simulation.....	54

Listes des Figures

Figure 1.1 : Schéma à l'échelle montrant la Terre, les principales orbites (orbites basse, moyenne, géostationnaire et de rebut).....	10
Figure 1.2 : Prédiction et compensation de mouvement.....	13
Figure 1.3 : Durée de l'éclipse du soleil sur le satellite pendant les équinoxes de printemps et d'automne	16
Figure 1.4 : Types de réflecteurs paraboliques.....	18
Figure 1.5 : Le réflecteur parabolique.....	18
Figure 1.6 : Diagramme de rayonnement de l'antenne parabolique.....	19
Figure 1.6 : Types de sources d'antenne parabolique.....	21
Figure 1.7 : exemple de tête LNB.....	21
Figure 1.8 : LNB à une tête.....	23
Figure 1.9 : LNB bi-tête.....	23
Figure 1.10 Exemple de LNB à multi-têtes.....	24
Figure 2.1 Synoptique d'une d'une LNB.....	27
Figure 2.2 Oscillateur locale du LNB.....	28
Figure 2.3 Fréquence d'oscillation.....	28
Figure 2.4 Bandes de fréquences utilisées.....	28
Figure 2.5 Amplificateur à faible bruit.....	29
Figure 2.6 Filtre passe-bande.....	30
Figure 2.7 Connecteur de sortie.....	30
Figure 2.8 : Boîtier LNB.....	31
Figure 2.9 : Support de fixation.....	31
Figure 2.10 : Liaison entre l'antenne et la LNB.....	33
Figure 2.11 : Décodeur TNT.....	33
Figure 2.12 : La carte d'abonné.....	34
Figure 2.13 : Composants d'une antenne Parabolique à tête LNB.....	35
Figure 2.14 : Choix de l'emplacement du parabole.....	35
Figure 2.15 : Fixation de la parabole.....	36
Figure 2.16 : Connexions des câbles.....	37
Figure 2.17 : Pointage de la parabole.....	37
Figure 2.18 Absorption atmosphérique du rayonnement solaire.....	38
Figure 2.19 Courbe d'absorption de l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde.....	39
Figure 2.20 les fenêtres atmosphériques de transmission (en blanc sur le schéma) [17].....	40
Tableau 1 : Effets météorologiques.....	41
Figure 2.21 : Obstacles physiques.....	42
Figure 3.1 Logiciel ADS.....	44
Figure 3.2 Modélisation des blocs LNB.....	45

Figures 3.3 : Générateur de signal RF.....	46
Figure 3.4 Filtre Passe Bande.....	46
Figure 3.5 Amplificateur LNA.....	47
Figure 3.6 Mixer.....	48
Figure 3.7 Bloc Oscillateur.....	48
Figure 3.8 Résistance.....	49
Figure 3.9 Simulateur de paramètre S.....	49
Figure 3.10 : Filtre Bessel.....	50
Figure 3.11 Simulation du paramètre S.....	51
Figure 3.12 : Analyse du coefficient de réflexion S22 du signal en sortie.....	52
Figure 3.13 : Coefficients de gain S21 du LNB.....	53
Figure 3.14 Simulation du niveau de bruit du signal.....	54
Figure 3.15 Oscillateur OSCwPhNoise.....	54
Figure 3.16 Affaiblissement du bruit par le bloc LNB.....	55

Chapitre 1 : GENERALITES

1.1 L'orbite géostationnaire

1.1.1 Définition

Une orbite géostationnaire (en abrégé GEO, geostationary orbit) est une orbite circulaire caractérisée par une période orbitale (durée d'une orbite) égale à la période de rotation de la planète Terre et une inclinaison orbitale nulle (donc une orbite dans le plan équatorial). Cette orbite est fréquemment utilisée par des satellites terrestres car elle leur permet de rester en permanence au-dessus du même point de l'équateur : dans cette position, le satellite est visible depuis tous les points de l'hémisphère terrestre qui lui fait face, et inversement les instruments du satellite peuvent observer en permanence cet hémisphère [1].

1.1.2 Propriétés

Ces propriétés de l'orbite géostationnaire sont exploitées en particulier par

- Les satellites de télécommunications et informatiques
- Pour diffusion de programmes de télévision
- Pour les satellites météorologiques.

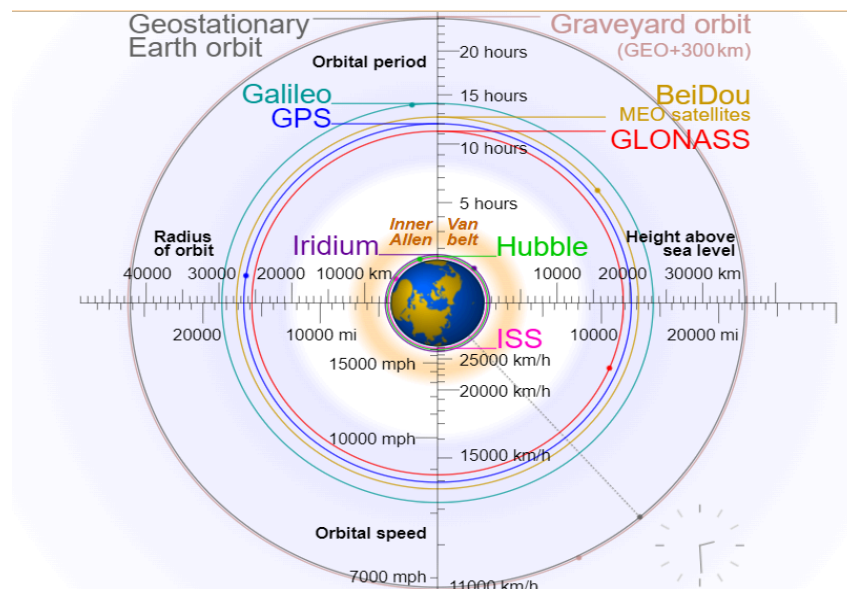


Figure 1.1 : Schéma à l'échelle montrant la Terre, les principales orbites (orbites basse, moyenne, géostationnaire et de rebut)

Utilisées par les satellites, les vitesses et les périodes orbitales à différentes altitudes ainsi que la position de quelques satellites ou constellations de satellites remarquables : GPS, GLONASS, Galileo et Beidou, Station spatiale internationale, télescope Hubble et la constellation Iridium.

L'orbite de la Lune est environ 9 fois plus grande que l'orbite géostationnaire

1.1.3 Altitude de l'orbite géostationnaire et la vitesse du satellite

Afin de déterminer l'altitude de l'orbite géostationnaire où est station des satellites on suit cette démarche de calculs suivante :

La seconde loi de Newton donne : $F = m \cdot a$

Le mouvement étant circulaire uniforme on a : $a = \frac{v^2}{R}$

La loi de la gravitation universelle énonce : $F = G \cdot M_T \left(\frac{m_s}{R^2} \right)$

Avec :

- a est l'accélération du satellite
- G est la constante gravitationnelle $G = 6,67 \cdot 10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$
- M_T est la masse de la Terre $M_T = 5,9722 \cdot 10^{24} kg$
- m_s est la masse du satellite
- $R = R_T + h$ tel que :
- R_T est le rayon de la Terre à l'équateur $R_T = 6378,14 km$

La vitesse de la trajectoire circulaire est :

$$v = \frac{2\pi(R_T + h)}{T}$$

Où T est la période de révolution du satellite, c'est-à-dire le temps que prend le satellite pour faire un tour autour de la Terre, qui doit être égale à la période de rotation sidérale de la Terre $T=86164,1s$.

Après calcul on obtient :

$$h = \left(\frac{G \times M_T \times T^2}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}} - R_T \text{ soit } h = 35786 km.$$

A partir de la seconde loi de Newton et de la loi de la gravitation universelle on peut écrire :

$$\frac{m_s \times v^2}{R_T + h} = \frac{G \times M_T \times m_s}{(R_T + h)^2} \quad \text{d'où } v = \sqrt{\frac{G \times M_T}{R_T + h}}$$

pour $h = 35784 \text{ km}$, on obtient $v = 3,074 \text{ km.s}^{-1}$, soit $v = 3\,074 \text{ m.s}^{-1}$

1.2 La télévision numérique

1.2.1 Principe

La télévision numérique ou télédiffusion numérique est une évolution technologique visant à progressivement se substituer à la télévision analogique. Les signaux vidéo, audio et des services multimédias éventuellement associés d'une ou plusieurs chaînes de télévision sont échantillonnés, traités et combinés pour être retransmis sous forme de flux de données binaires, de type informatique.

1.2.2 Normes

Digital Video Broadcasting (DVB) est la norme de télévision numérique édictée par le consortium européen DVB et principalement utilisée en Europe, en Afrique et en Australie :

- DVB-C : l'application de la norme DVB aux transmissions par câble ;
- DVB-T : l'application de la norme DVB aux transmissions terrestres hertziennes ;
- DVB-S : l'application de la norme DVB aux transmissions satellitaires

1.2.3 Codage d'une image de télévision

Compensation de mouvement Deux images successives permettent de deviner, par simple extrapolation linéaire, la position d'un bloc donné dans l'image suivante.

Toutefois, cette prédiction est approximative, et il se peut qu'elle se révèle inexacte si le mouvement réel n'est pas linéaire. Il suffit, dans ce cas, de transmettre la valeur de l'erreur de prédiction (c'est-à-dire l'écart du mouvement réel par rapport à la loi linéaire) pour décrire le mouvement exact tout en réalisant une bonne économie de moyens. D'où la figure qui suit [2]

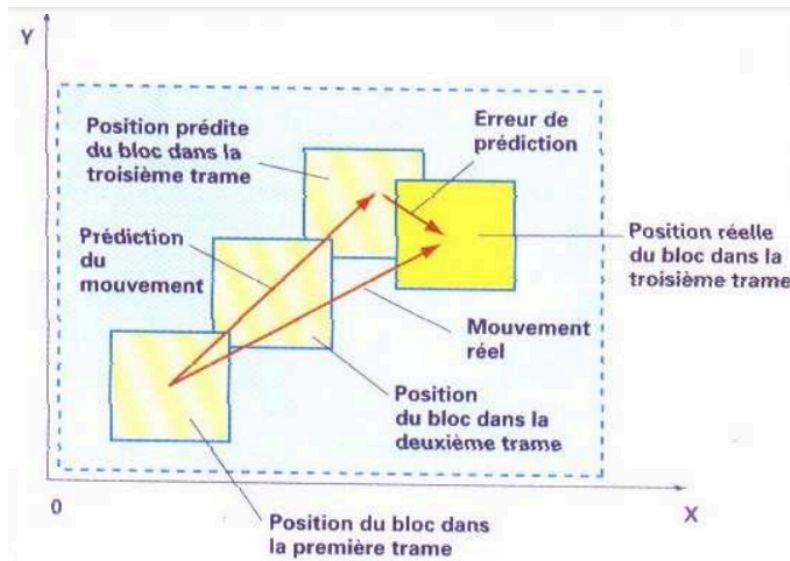


Figure 1.2 : Prédiction et compensation de mouvement

1.3 Les facteurs intervenant dans les liaisons montantes et descendantes [2]

Il s'agit de définir les facteurs intervenant dans la liaison entre le sol et le satellite (montante) et celle entre le satellite et l'utilisateur au sol (descendante). Les mêmes paramètres sont applicables à la liaison montante comme à la liaison descendante

1.3.1 Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)

Une antenne isotrope émet dans toutes les directions de la sphère, comme une lampe pendue à un fil. La densité de la puissance à la surface interne de la sphère est : $P \frac{t}{(4\pi R^2)}$;

Watts par mètre carré [W/m^2].

Une antenne placée au foyer d'une parabole émet un fin pinceau qui contient toute puissance de l'émetteur, au rendement près. On ne conçoit que la puissance en watts par mètre carré est beaucoup plus importante, c'est le gain de l'antenne G :

$$G = \frac{\text{Puissance rayonnée par le satellite}}{\text{Puissance rayonnée par l'antenne Isotrope}}$$

Plus l'antenne est grande, plus le faisceau est étroit. La dimension de l'antenne au sol n'est pas limitée, tandis que celle du satellite doit tenir dans la coiffe de lanceur. Une parabole de 2.80 m de diamètre correspond à un faisceau de 0.6° d'ouverture et définit la plus petite zone terrestre couverte pour la plage de 12 GHz. L'ouverture en radians du faisceau d'une antenne parabolique circulaire est donnée par le quotient de la longueur d'onde (2.5 cm à 12 GHz) par le diamètre de l'antenne. Ainsi, la densité de puissance, à la distance D est :

$$P'_t = \left(\frac{\rho_t}{4\pi D^2} \right) G$$

La puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) est calculée en connaissant la puissance de l'émetteur et le gain de l'antenne. Elle s'exprime en décibels watts.

$$PIRE = 10 \log \log (P_t * G)$$

Les pertes dans le câblage sont de l'ordre de 1 dB. Pour les satellites actuels dont la puissance est de l'ordre de 50 W par canal, on obtient une PIRE de 52 dBW. C'est la valeur qui est inscrite sur la première courbe de niveau dans l'axe de l'antenne, au centre de la zone couverte. Plus on s'éloigne de ce centre, plus les niveaux PIRE diminuent et plus les récepteurs nécessitent des antennes paraboliques de diamètre plus important [2].

1.3.2 Affaiblissement pendant le trajet

Il comprend : L'affaiblissement en espace libre (Low Noise Free) est fonction de la fréquence et de la distance. C'est l'affaiblissement que subirait le signal si la transmission s'effectue dans le vide parfait :

$$A = (4 * \pi)^2 * \left(\frac{v}{\lambda} \right)^2$$

$$\text{Soit en décibel (dB) : } A = 22 + 20 \log \log \left(\frac{v}{\lambda} \right)$$

λ : longueur d'onde de la fréquence d'émission

L'affaiblissement dû à l'absorption atmosphérique varie entre 1.5 dB pour 99 % du mois le plus défavorable et 4.5 dB pendant 0.1% du mois le plus défavorable.

- L'affaiblissement total est compris entre 207.5 dB et 210.5 dB.
- Le niveau isotrope au sol est de : + 52 - 207 = - 155.5 dBW.

1.3.3 Gain à l'entrée du récepteur

Si on adapte une antenne parabolique de 60 cm de diamètre, avec un rendement de 70% à 12 GHz, on obtient un gain de 36 dB (cf. tableau).

Perte de couplage entre l'antenne et la tête SHF : 0.5 dB

Perte due à un pointage imprécis de l'antenne : 1 dB

Gain net : 36 - 0.5 - 1 = 34.5 dB

Niveau du signal à l'entrée du récepteur : - 155.5 + 34.5 = - 121 dBW

1.3.4 Rapport C/N (Carrier/Noise ou porteuse/bruit)

C'est le rapport de la puissance du signal reçu (C) dans la bande de fréquence B du récepteur, sur la puissance N du bruit qui est donnée par : $N = k \cdot T \cdot B$

$$\frac{C}{N} = E + G - A - 10 \log \log T - 10 \log \log B - 10 \log \log k$$

Avec :

- E = PIRE (dBW)
- G : gain (dB)
- A : atténuation globale (dB)
- T : température du bruit de l'antenne et de la tête SHF (K)
- B : largeur de bande F.I du récepteur (MHz), avec $10 \log k = + 226.6$ dB (constante de Boltzmann).

Le rapport C/N donne la qualité de l'image sur l'écran du récepteur :

- $C/N = 6$: très bruyant, mauvaise qualité d'image, pas de couleur.
- $C/N = 8$: seuil limite, quelques traces de bruit.
- $C/N = 10$: bonne réception, bonnes couleurs.
- $C/N = 12$: excellente réception, qualité TV par câble.
- Et au-delà.

Le bruit se traduit sur l'image par des points blancs ou sombres. Il est intéressant de connaître ces valeurs que l'on retrouve sur les catalogues et de savoir comment elles sont calculées [2]

1.4 Position orbitale des satellites [2]

L'orbite géostationnaire sur laquelle se trouvent les satellites de radiodiffusion leur permet de faire le tour de la terre en 23h 56min 4s. Ainsi, ces satellites, appelés géosynchrones, donnent l'impression d'être immobiles pour un observateur terrien. La figure ci-dessous montre que l'orbite utilisée est de forme circulaire. Elle est située sur le plan équatorial à une altitude de 35 800 km. Ceci explique que les antennes satellites doivent être pointées en direction de l'équateur. Ensuite, elles seront orientées à l'Ouest ou à l'Est par rapport à la référence choisie : le méridien de Greenwich (longitude 0°). L'examen des positions relatives du satellite géostationnaire, de la Terre et du Soleil montre qu'aux périodes d'équinoxe, le satellite passe dans le plan de l'écliptique à minuit, heure locale du méridien, à la verticale duquel il se trouve. La

figure 1.04 donne la durée de l'éclipse pendant les périodes d'équinoxe de printemps et d'automne. Cette durée atteint 70 minutes pendant dix jours, des 15 à 25 mars et Septembre.

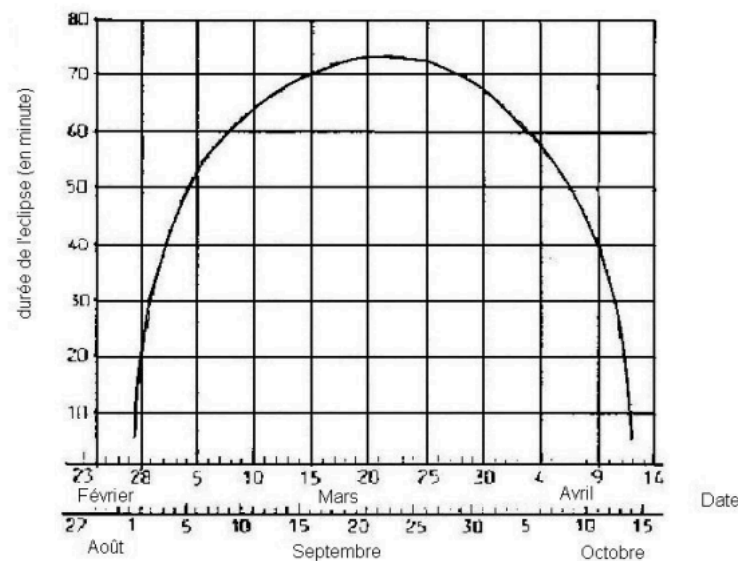


Figure 1.3 : Durée de l'éclipse du soleil sur le satellite pendant les équinoxes de printemps et d'automne

L'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du satellite est fournie par des cellules solaires. Lorsqu'il passe dans l'ombre, il n'est plus alimenté. C'est pourquoi les satellites disposent d'une batterie d'accumulateurs Ni-Cd ou Ni-H pour assurer leur mission en permanence, même pendant les éclipses des équinoxes.

1.4 Typologie des satellites [2]

La diffusion de télévision a longtemps fait appel à trois types de satellites, qui permettaient trois niveaux de services :

1.4.1 Les satellites de télécommunication de faible puissance (de 10 à 20 W Intelsat par exemple)

Dotés d'un grand nombre de canaux (répéteurs, 16 en moyenne) et qui ne peuvent que difficilement être reçus par des particuliers. Ce sont des satellites dits « de contribution » qui assurent des liaisons de point à point, sur de larges zones ou entre deux continents. Ils reçoivent des programmes provenant d'une station émettrice et les renvoient vers une ou plusieurs stations réceptrices fixes, reliées à des réseaux terrestres (hertzien, câble). Dans la mesure où ces satellites ne sont pas très puissants, les stations de réception qu'ils nécessitent doivent être

très performantes. Leur position sur l'orbite géostationnaire découle du principe « premier arrivé premier servi ».

1.4.2 Les satellites de télécommunication de puissance moyenne (45 à 50 W, Astra-Télécom2- Eutelsat2)

Ce sont des satellites comportant de 10 à 16 canaux (ou répéteurs) et sont, de fait, des satellites de télécommunication de seconde génération. Ils peuvent être reçus avec des antennes de 60 à 120 cm de diamètre, selon les satellites. Il s'agit des satellites de distribution semi-directe qui concentrent leurs faisceaux vers des zones de dimension moyenne (un ou plusieurs pays) et peuvent atteindre un grand nombre de stations réceptrices. La puissance de leur signal leur permet de toucher, outre les usagers collectifs des immeubles, le marché de la réception individuelle. Eux aussi profitent, pour le choix de leur position orbitale, du principe « premier arrivé premier servi ».

1.4.3 Les satellites de diffusion directe de forte puissance (plus de 130 W, TDF1-2, Télé X, TV Sat)

Ils disposent de peu de canaux (4 à 6 répéteurs) et visent le marché de la réception individuelle avec une antenne de faible diamètre (moins de 50 cm de diamètre). Au lieu d'assurer des transmissions entre des stations terriennes relativement chères et complexes, ils desservent directement des récepteurs individuels ou les usagers collectifs d'un immeuble d'habitation. Ils sont régis par les accords de la Conférence Administrative de l'UIT, et pour ce qui concerne leur position orbitale et leur bande de fréquences. Ils ont tous été conçus au début des années 80 pour créer un marché de diffusion directe de télévision par delà le développement des réseaux câblés.

1.6 Antennes paraboliques [3]

Une antenne parabolique communément appelée parabole par le grand public désigne un dispositif technique équipé d'un réflecteur permettant de capter, concentrer et focaliser les signaux provenant d'un satellite, d'une liaison hertzienne radio ou d'un émetteur de télévision terrestre, vers une « source » ou « tête de réception » équipée d'un bloc-convertisseur à faible bruit ou « LNB », destiné à être connecté par l'intermédiaire d'un câble coaxial, jusqu'à un récepteur ou un démodulateur satellite ou encore à une unité de télédistribution.

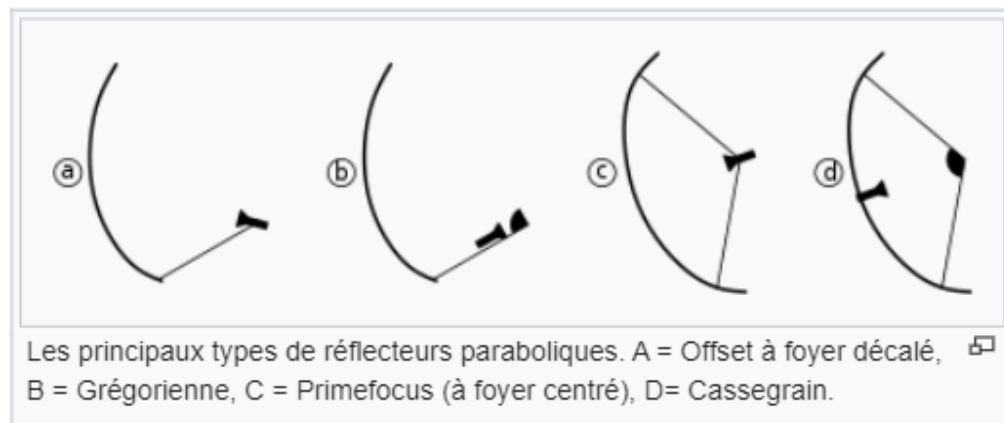


Figure 1.4 : Types de réflecteurs paraboliques

- La plus répandue auprès du grand public est de type « offset » à foyer décalé
- L'antenne grégorienne exploite une apparence mécanique différente
- Les antennes paraboliques à foyer centré dite « Prime Focus » sont de plus grande taille que les antennes « offset » plus modernes.

1.6.1 Le réflecteur

Le réflecteur parabolique est chargé de concentrer les ondes reçues ou émises, radar, télévision, ISM et Wi-Fi, radio-amateurisme, faisceaux hertziens, ou signaux électromagnétique émis par les astres en radioastronomie, vers la source, qui se situe au foyer de la parabole ou sur un bras déporté.

Le réflecteur peut être en tôle emboutie (acier ou aluminium) ou formé d'un grillage dont l'espacement des lattes doit être inférieur à $\lambda/10$ (λ = longueur d'onde d'émission).

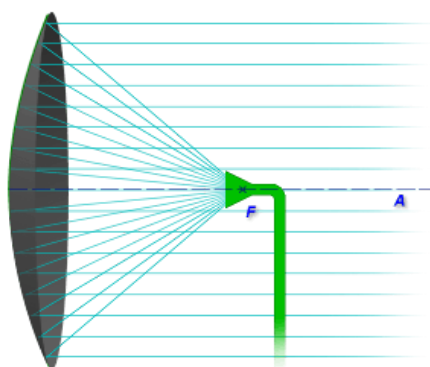


Figure 1.5 : Le réflecteur parabolique

Un cône d'émission situé au foyer de la parabole et un guide d'onde qui amène le signal à ce cône depuis le transmetteur.

Chaque point de la surface du réflecteur va rayonner comme une source ponctuelle

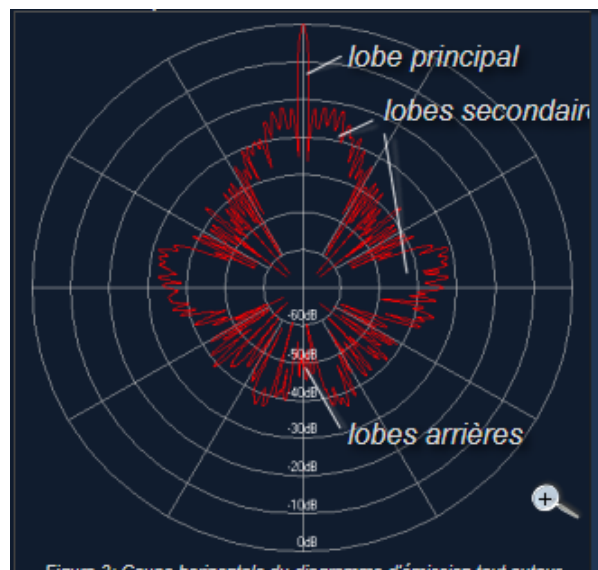


Figure 1.6 : Diagramme de rayonnement de l'antenne parabolique

Le lobe principal peut avoir une ouverture angulaire qui varie entre moins d'un degré et 15 ou 20 degrés selon les besoins. Il suit la direction de visée de l'antenne. Il y a ensuite des lobes secondaires tout autour du réflecteur. L'énergie de chacun de ces derniers est une fraction minime du lobe principal comme montré dans la figure 3. Le faisceau principal y est normalisé à 0 dB alors que les autres lobes sont plus faibles que -20 dB, chaque tranche de -3 dB signifiant que l'énergie radiée diminue de moitié ($-21 \text{ dB} = 1/(27)$). Cependant, la somme de leur énergie n'est pas négligeable.

1.6.2 La source

Dans le cas des antennes réceptrices, le signal fait le trajet inverse de l'antenne au cornet d'alimentation (appelé également « source ») puis dans le guide d'ondes vers cette fois le récepteur. Ce dernier filtre les ondes radioélectriques reçues pour en extraire les informations qui y ont été incorporées lors de leurs émissions : sons ou signaux numériques.

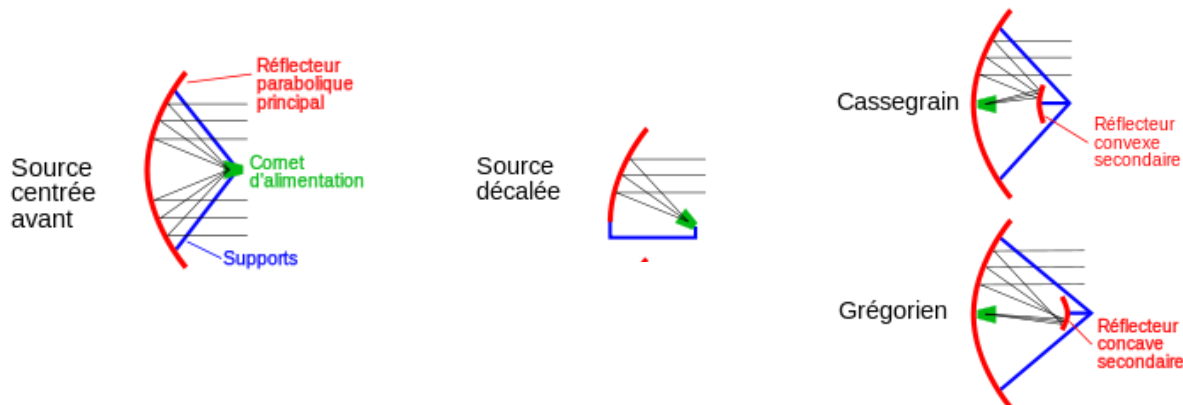


Figure 1.6 : Types de sources d'antenne parabolique

Il existe quatre types d'antennes paraboliques : les antennes avec source centrée, les antennes avec source décalée, les antennes Cassegrain et Grégorienne. Avec les antennes classiques de base le rendement tourne autour de 60~65 % mais peut atteindre 72 % sur du foyer décalé.

1.6.1. L'antenne satellite universelle

La qualification « universelle » de certaines antennes paraboliques ne concerne que la tête de réception et de son bloc-convertisseur ou LNB.

Les caractéristiques de ce type de têtes de réception par satellite permettant de sélectionner et capter la bande basse de 10,9 à 11,7 GHz les hautes des fréquences de 11,7 à 12,75 GHz et la commutation de polarisation, généralement horizontale ou verticale.

Le convertisseur à faible bruit ou LNB doit capter puis convertir les fréquences émises par le satellite, en des fréquences intermédiaires ou BIS qui s'étendent pour la bande basse, de 950 MHz à 1,950 GHz, et pour la bande haute, de 1,950 GHz à 2,15 GHz permettant de plus facilement et efficacement véhiculer les signaux par un câble coaxial jusqu'au récepteur.

1.7 Principes de la réception satellite (LNB)

Le LNB (convertisseur abaisseur de fréquence à faible bruit) est un amplificateur convertisseur abaisseur basse fréquence composé d'un mélangeur et d'un oscillateur local. On utilise la parabole d'une façon générale, pour réfléchir les signaux venant du ciel.

Pour une antenne standard munie d'un seul LNB (tête), on pointe le satellite qui se trouve dans l'axe du bras de l'antenne.

Dans ce cas, le plus simple et le plus général, on place le LNB dans le foyer de l'antenne sur la fixation LNB qui va recevoir le maximum de puissance du satellite [5].



Figure 1.7 : exemple de tête LNB

1.7.1 Fonctionnement d'une LNB

Le LNB peut généralement être divisé en lnb en bande c (3.7 GHz-4.2 GHz) et en lnb en bande ku (10.7 GHz-12.75 GHz). Parce que le signal satellite est assez faible avant d'atteindre l'antenne et plus la fréquence de transmission du câble coaxial est élevée, plus la perte de signal est importante. Par conséquent, lnb est nécessaire pour amplifier, et le rapport signal / bruit ne peut pas être trop détérioré [6].

Le flux de travail de lnb consiste à amplifier d'abord le signal haute fréquence du satellite, puis à utiliser le circuit d'oscillation local pour convertir le signal haute fréquence à la fréquence intermédiaire de 950 mhz - 2150mhz (déterminer la gamme de fréquences intermédiaires en fonction du type de lnb) puis l'amplifier à nouveau le signal amplifié et converti est ensuite transmis via un câble coaxial au récepteur (comme un décodeur satellite ou un téléviseur satellite) pour être décodé et affiché sous forme de chaînes de télévision ou d'autres données, selon l'usage prévu. [6].

1.7.1.2 Bandes de fréquences et modulation des signaux satellitaires

Les signaux satellitaires sont transmis sur différentes bandes de fréquences et peuvent être modulés de différentes manières.

Les bandes de fréquences et les types de modulation varient en fonction de l'application, de la région géographique et des normes de transmission

Bandes de fréquences [7] :

- ❖ **Bande Ku** : Cette bande de fréquences est souvent utilisée pour les transmissions satellite directes vers les consommateurs pour la télévision directe par satellite, l'accès à Internet par satellite etc. elle se situe généralement entre 10,7 GHz et 12,75 GHz pour la réception et entre 13,75 GHz et 14,5 GHz pour la transmission.
- ❖ **Bande Ka** : Cette bande est utilisée pour des services plus avancés tels que l'Internet à haut débit par satellite. Elle se situe dans la gamme de 17,7 GHz à 30 GHz.
- ❖ **Bande C** : Principalement utilisée pour les communications et les services gouvernementaux, cette bande de fréquences se situe généralement entre 3,7 GHz et 4,2 GHz pour la réception et entre 5,9 GHz et 6,4 GHz pour la transmission.

Modulation des signaux :

- ❖ **QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)** : C'est l'une des méthodes de modulation les plus courantes utilisées pour les signaux satellitaires. Elle permet de transporter les données sur des signaux radio en modulant la phase de la porteuse.
- ❖ **8PSK (8-Phase Shift Keying)** : Une version plus avancée du QPSK, l'8PSK, permet de transporter davantage de données en modifiant la phase de la porteuse sur huit valeurs différentes.
- ❖ **16QAM (Quadrature Amplitude Modulation)** : Cette méthode modifie à la fois l'amplitude et la phase de la porteuse pour transporter un plus grand volume de données par symbole.
- ❖ **DVB-S/DVB-S2** : Ce sont des normes de transmission pour la diffusion de télévision numérique par satellite, utilisant différentes méthodes de modulation adaptées aux besoins de bande passante et de qualité de réception.

1.8 Caractéristiques techniques des LNB

Les LNB (Low-Noise Block downconverters) possèdent plusieurs caractéristiques techniques essentielles qui déterminent leurs performances et leur fonctionnement. Voici quelques-unes des caractéristiques techniques importantes des LNB

1.8.1 Types de LNB (universel, monobloc, etc.) [5]

Il existe essentiellement quatre (4) grands types de blocs à faible bruit convertisseur (LNB) qui sont en application. Ils comprennent

- **Le LNB universel**
- **Le LNB standard en bande KU** d'Amérique du Nord ou le LNBS linéaire standard
- **Le satellite de diffusion directe (DBS)** d'Amérique du Nord LNBS.
- **Le LNB en bande C**

1.8.1.1 LNB à une tête

Pour une antenne standard munie d'un seul LNB (tête), on pointe le satellite qui se trouve dans l'axe du bras de l'antenne comme le montre la figure ci-dessous.

Réception mono-tête

- o Convient pour un seul décodeur satellite, 1 seule TV
- o Convient pour recevoir 1 seul satellite
- o Existe avec 1 sortie ou plusieurs



Figure 1.8 : LNB à une tête

1.8.1.2 LNB bi-tête (à deux tête)

Dans le cas où l'on veut recevoir 2 satellites de puissance équivalente, le mieux est de disposer d'un support symétrique.

Dans ce cas, les 2 LNB sont déportés et l'axe du bras se trouve entre les 2 positions orbitales.

Pointage de la parabole bi-têtes symétrique :

On pointe (c'est-à-dire qu'on cherche le maximum de puissance) le satellite de son choix, et on peaufine les réglages pour la deuxième tête.

Réception bi-têtes

- o Convient pour 2 satellites (Astra, Hotbird, etc.) pour 1 ou plusieurs décodeurs selon nombre de sorties
- o Existe avec 1 sortie ou plusieurs

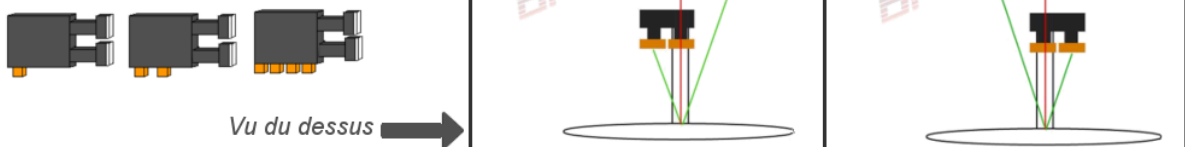


Figure 1.9 : LNB bi-tête

1.8.1.3 LNB multi-tête (à multi-têtes)

Ceux-ci permettent de capter plus de 2 satellites en simultané avec la même parabole.

Il faut trouver un compromis pour pointer l'antenne afin que les LNB reçoivent le maximum de puissance de chaque satellite. On peut ainsi imaginer recevoir Astra 19 Est, Eutelsat 16 Est, Hot-Bird 13 Est sur la même parabole

Réception multi-tête

- o Autant de décodeurs que de **sorties disponibles** sur la tête de parabole
- o Autant de satellites recevables que de **têtes disponibles** sur la tête de parabole

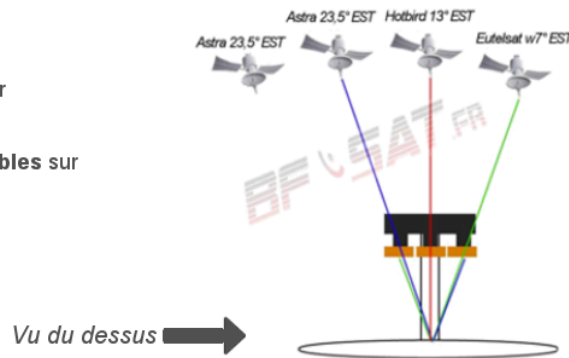


Figure 1.10 : Exemple de LNB à multi-têtes

1.8.2. Caractéristiques de gain, de bruit et de polarisation

1.8.2.1 Gain [8]

Le gain d'une LNB représente sa capacité à amplifier le signal reçu du satellite. Mesuré en décibels (dB), un gain plus élevé signifie une capacité accrue à amplifier le signal, ce qui est important pour compenser les pertes dues à la distance entre le satellite et l'antenne réceptrice néanmoins un gain excessif peut également amplifier le bruit, et dégrader la qualité du signal. Le gain varie entre 36 et 39 dB en fonction du type d'antenne.

1.8.2.2 Facteur de bruit (Noise Figure)

Le facteur de bruit d'une LNB mesure la quantité de bruit ajoutée au signal reçu lors de l'amplification et représenté en dB.

Plus cette valeur est basse (exprimée en dB), meilleure sera la qualité du LNB, elle vaut en général 0,6 à 0,8 dB, et quelquefois moins ; si elle est trop élevée, le signal utile risque d'être « noyé » dans le bruit et son exploitation par le tuner devient aléatoire. Au contraire, si cette valeur est faible, il sera possible d'exploiter un signal plus faible et de compenser, dans une certaine mesure, la taille de l'antenne.

1.8.2.3 Bruit de phase en numérique

La transmission de signaux numériques utilise la Modulation d'Amplitude en Quadrature (ou QAM) qui permet d'obtenir, à partir de deux signaux I et Q, une constellation de points correspondant aux symboles transmis.

Dans le cas du satellite, seuls quatre points ou états, correspondant aux sommets d'un carré sont utilisés : c'est le 4-QAM ou QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Pour que la démodulation soit assurée de manière correcte et stable, ces quatre points doivent rester au sommet du carré ; s'ils s'en écartent trop, les symboles ne seront plus détectés (pixellisations et gels d'images).

dans un LNB, les circuits de conversion de fréquence/amplification peuvent induire un décalage de phase dont la conséquence sera justement que les points en question ne sont plus à leur place. Pour apprécier le bruit de phase, on mesure, en balayant l'espace du carré (360 degrés ou un cycle), la dispersion de ces points ; cette mesure s'effectue par rapport aux fréquences de l'oscillateur local dans une bande déterminée par rapport à celle-ci (1 kHz, 10 kHz et 100 kHz) et s'exprime en dBc/Hz (décibel cycle par Hertz).

Chapitre 2 : la chaîne de réception typique(LNB)

2.1 Invention du LNB [14]

Le convertisseur de bloc à faible bruit (LNB) a été inventé par deux technologues chinois en microélectronique, KUO TIEN CHANG et JIA LUN CHEN. Le premier mode de réalisation de leur invention comprenait un oscillateur local, un mélangeur, un amplificateur FI et un régulateur. L'amplificateur à faible bruit amplifie un signal reçu en bande haute. L'oscillateur local génère un signal de fréquence locale. Le mélangeur mélange le signal à fréquence locale et le signal reçu en bande haute en un signal à fréquence intermédiaire. Le régulateur est couplé à l'amplificateur IF pour fournir une tension ou un courant régulier à l'amplificateur à faible bruit et à l'oscillateur local.

Le deuxième mode de réalisation de la présente invention est un bloc à faible bruit comprenant un amplificateur à faible bruit, un oscillateur local, un mélangeur, un amplificateur FI et un régulateur. Le faible bruit mélange le signal à fréquence locale et le signal reçu en bande haute en un signal à fréquence intermédiaire. L'amplificateur IF amplifie le signal de fréquence intermédiaire. Le régulateur est couplé à l'amplificateur à faible bruit pour fournir une tension ou un courant régulier à l'amplificateur IF et à l'oscillateur local.

Le troisième mode de réalisation de la présente invention est un bloc à faible bruit à sorties multiples comprenant un circuit de commutation, un premier bloc à faible bruit selon le premier mode de réalisation et un deuxième bloc à faible bruit selon le premier mode de réalisation. Le premier bloc à faible bruit reçoit la composante de phase verticale du signal d'entrée. Le deuxième bloc à faible bruit reçoit la composante de phase horizontale du signal d'entrée. Le circuit de commutation est couplé aux sorties du premier bloc à faible bruit et du second bloc à faible bruit pour fournir un signal de sortie.

2.2 Description détaillée de la chaîne de réception

Une tête de réception satellite, également connue sous le nom de LNB (Low Noise Block), est un composant essentiel d'une antenne parabolique qui reçoit les signaux satellites et les convertit en signaux que le récepteur satellite peut interpréter [9].

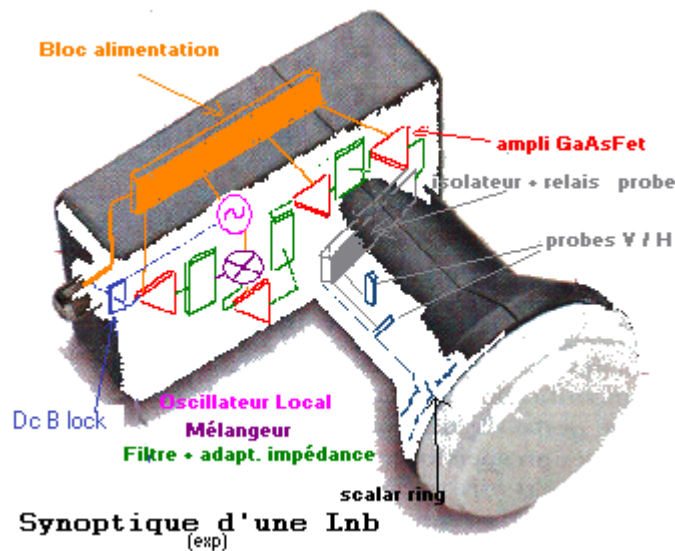


Figure 2.1 Synoptique d'une d'une LNB

Voici une analyse des principaux composants internes d'une LNB :

2.2.1 Convertisseur de fréquence (Downconverter)

La conversion de fréquence est effectuée via un oscillateur local (OL) pour les LNB (convertisseur à faible bruit) simple bande ou deux oscillateurs locaux pour les LNB double bande [10].

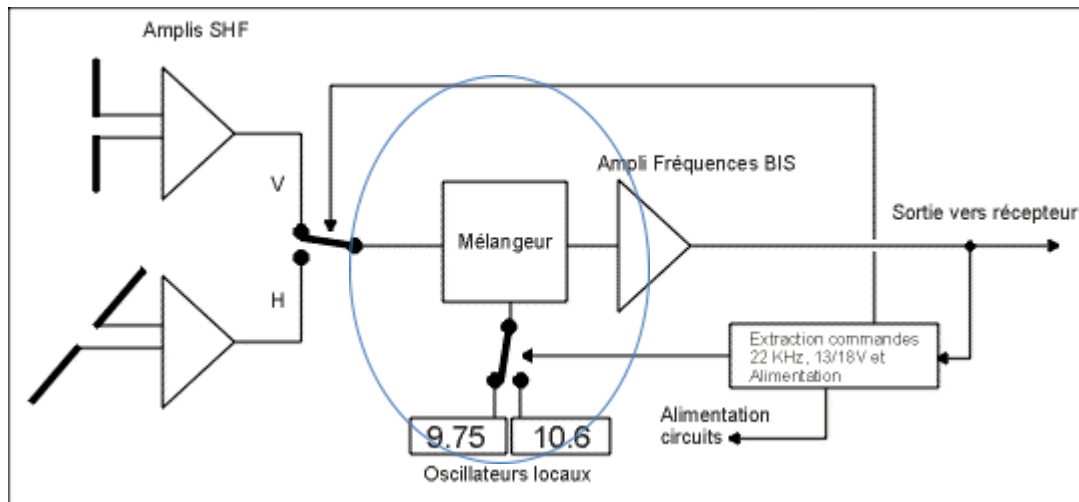


Figure 2.2 : Oscillateur locale du LNB

L'oscillateur local du LNB (OL) transforme la fréquence d'émission en GHz par la fréquence BIS (en MHz). La BIS (Bande Intermédiaire satellite) est la fréquence qui peut être acceptée par le tuner du récepteur satellite : 950 à 2050 MHz
Ces oscillateurs ont des caractéristiques différentes selon les fréquences que l'on désire recevoir.

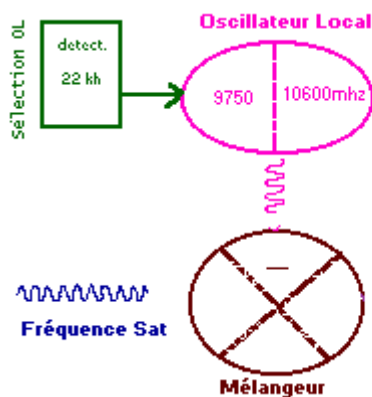


Figure 2.3 : Fréquence d'oscillation

Bande	Fréquences en Ghz
C	3,700 - 4,200
Ku-FSS	10,900 - 11,700
Ku-DBS	11,700 - 12,500
Ku-Télécom	12,500 - 12,750

Figure 2.4 : Bandes de fréquences utilisées

Vous trouverez ci-dessous la méthode de calcul fréquence réelle (FR)/BIS du LNB.

LNB avec Oscillateur local 9750 MHz (Bande Ku basse, LNB Universel, FSS ou full-band) BIS = FR en MHz - 9750 :

Exemple : FR = 11,020 GHz ou 11020 MHz

BIS : 11020 - 9750 = 1270

2.2.2 Amplificateur à faible bruit (LNA - Low Noise Amplifier) [11]

La LNB intègre un LNA pour amplifier le signal satellite dès qu'il est capté par la parabole. Il est important que cet amplificateur soit à faible bruit pour ne pas ajouter de bruit au signal déjà faible capté par la parabole.

Le bruit peut dégrader un signal analogique ou les taux d'erreur de bits et de trames des systèmes de communication numériques, sachant que le bruit est causé par des sources thermiques et autres.

Le facteur de bruit (NF) est un paramètre de conception qui décrit la quantité de bruit additif généré par un amplificateur dans la chaîne de signal ainsi que le gain et la linéarité.

Le facteur de bruit est défini comme le facteur de bruit, F , exprimé en décibels [$NF = 10 \times \log(F)$], avec F défini comme $(S_i/N_i)/(S_o/N_o)$, le rapport du rapport signal sur bruit (SNR) à l'entrée par rapport au SNR à la sortie.

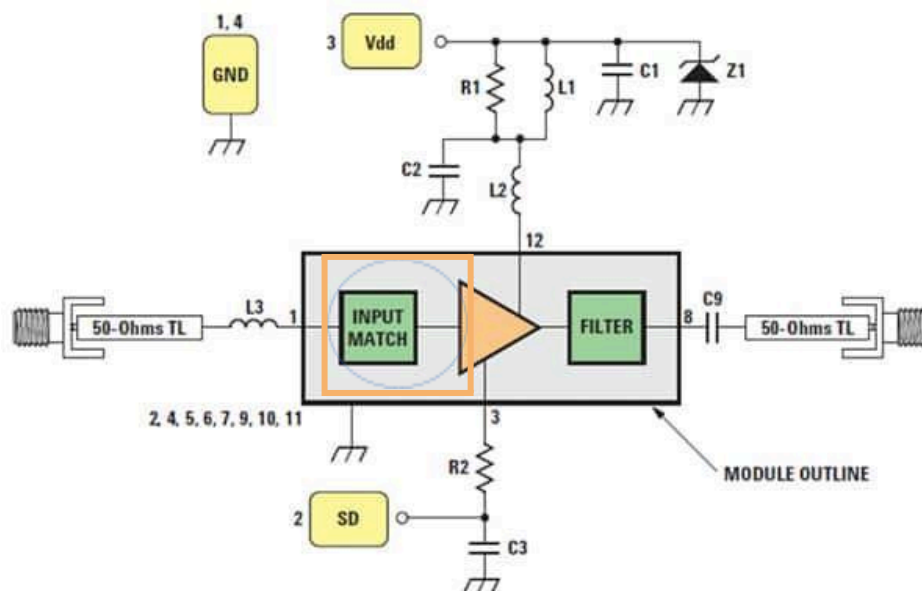


Figure 2.5 : Amplificateur à faible bruit

La fonction de l'amplificateur à faible bruit est d'acquérir le signal incertain et extrêmement faible de l'antenne, généralement de l'ordre de microvolts ou en dessous de -100 dBm, puis de l'amplifier à un niveau plus approprié, d'environ un demi-volt à un volt (Figure 1). À titre d'exemple, dans un système de 50 Ω , une valeur de 10 μV équivaut à -87 dBm et 100 μV à -67 dBm.

2.2.3 Filtre passe-bande

Un filtre passe-bande est utilisé pour limiter la plage de fréquences qui atteint le convertisseur de fréquence. Cela aide à éliminer les signaux indésirables et à améliorer la sélectivité du système.

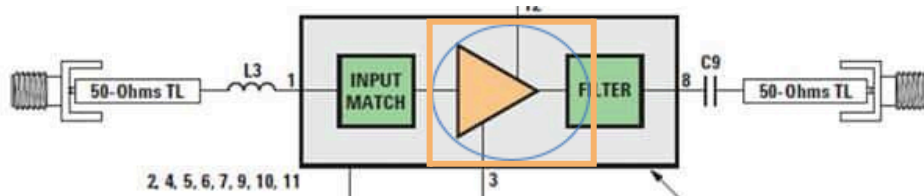


Figure 2.6 : Filtre passe-bande

2.2.4 Réjection d'harmoniques

Pour éviter les interférences, une LNB est souvent équipée d'un réjection d'harmoniques qui élimine les multiples de la fréquence de la porteuse satellite.

Le réjecteur d'harmoniques est conçu pour détecter ces multiples de fréquence indésirables et les atténuer de manière significative. Il agit comme un filtre sélectif qui laisse passer la fréquence souhaitée (la porteuse satellite) tout en bloquant ou atténuant les harmoniques.

2.2.5 Connecteur de sortie (F-connector)

La LNB est équipée d'un connecteur de sortie (souvent de type F) pour connecter le câble coaxial qui transmet les signaux convertis au récepteur satellite.

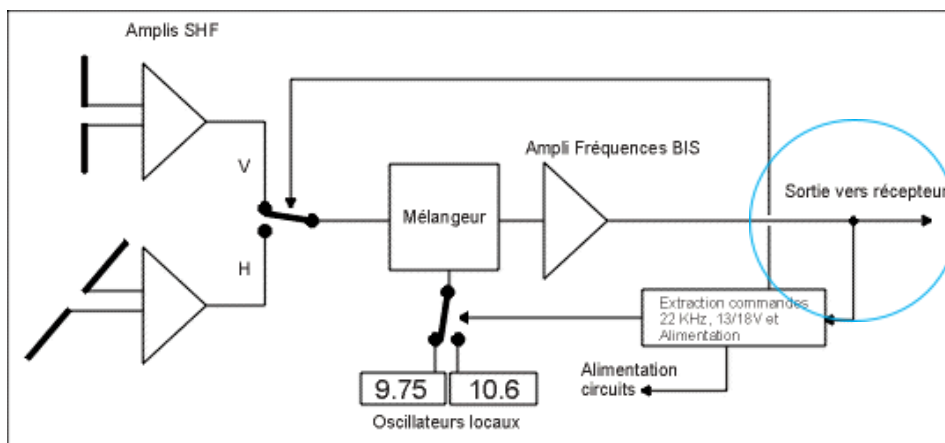


Figure 2.7 Connecteur de sortie

2.2.6 Alimentation électrique

Certains modèles de LNB intègrent un système d'alimentation électrique pour alimenter des composants tels que des moteurs dans les antennes paraboliques motorisées.

2.2.7 Boîtier étanche

Étant donné que la LNB est généralement exposée aux intempéries, elle est souvent encapsulée dans un boîtier étanche pour la protéger des éléments extérieurs.

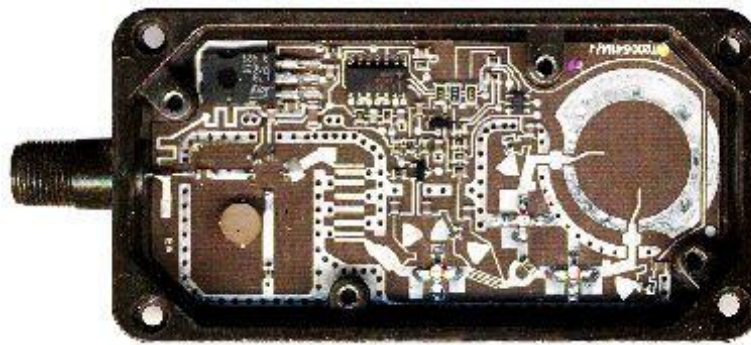


Figure 2.8 : Boîtier LNB

2.2.8 Support de fixation

Un support de fixation est généralement intégré pour permettre une installation facile sur la parabole.

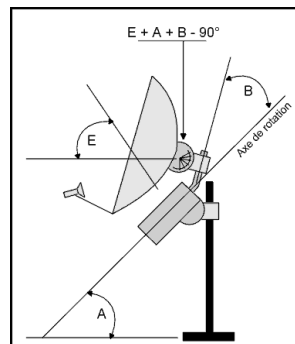


Figure 2.9 : Support de fixation

<http://g.guenin.chez-alice.fr/prati/motorise.htm>

LNB est un dispositif complexe qui combine plusieurs composants pour recevoir, amplifier et convertir les signaux satellites en une forme utilisable par un récepteur satellite standard. Chaque composant joue un rôle crucial dans la performance globale du système de réception satellite.

2.3 Fonctionnement interne de la LNB^[14]

Le convertisseur de bloc à faible bruit communément appelé LNB ou LNB C est un dispositif solidement fixé sur l'antenne parabolique qui reçoit les signaux micro-ondes de très faible niveau du satellite, les amplifie pour filtrer le bruit (c'est-à-dire les signaux radio ne transportant pas de programmeurs) change les signaux sur une bande de fréquence inférieure et les envoie par les câbles vers l'antenne parabolique. récepteur intérieur.

Le LNB utilise le principe de super hétérodyne pour prendre un large bloc (ou bande) de fréquences relativement élevées, les amplifier et les convertir en signaux similaires transportés à une fréquence beaucoup plus basse appelée fréquence intermédiaire (FI). Ces fréquences plus basses voyagent à travers les câbles avec beaucoup moins d'atténuation du signal, il reste donc beaucoup plus de signal sur l'extrémité du récepteur satellite du câble.

Il est également beaucoup plus facile et moins coûteux de concevoir des circuits électroniques fonctionnant à ces basses fréquences, plutôt qu'aux très hautes fréquences de transmission par satellite. Le LNB peut être commuté électroniquement entre la réception à polarisation horizontale et verticale. Le composant correspondant dans la liaison de transmission de liaison montante est appelé Block Up Converter (BUC).

La qualité à faible bruit d'un LNB s'exprime sous forme de facteur de bruit ou de température de bruit.

Spécificité:

La partie « bloc » fait référence à la conversion d'un bloc supérieur de fréquences micro-ondes (reçu du satellite, généralement dans la plage de 4 GHz à 21 GHz) qui est converti en une plage de fréquences de bloc inférieure pour le récepteur

L'effet super hétérodyne du LNBC aide à compenser la perte de signal associée au câble coaxial typique à des fréquences relativement élevées.

On l'appelle convertisseur de bloc à faible bruit car il convertit une bande entière ou un « bloc » de fréquences en une bande inférieure^[14].

2.4 Formulation du problème

Lors de la conversion d'un large bloc (ou bande) de fréquences relativement élevées, le facteur de bruit et le facteur de bruit peuvent être convertis en température de bruit. Par conséquent, plus la température du bruit est basse, mieux c'est. Ainsi, un LNBC avec une température de bruit de 100K est deux fois meilleur qu'un LNBC avec une température de bruit de 200K^[14].

2.5 Liaison entre l'antenne et la LNB

La liaison entre l'antenne et la LNB est le câble coaxial qui transporte le signal satellite capté par la parabole vers le convertisseur de fréquence basse bruit (LNB). Le LNB est le dispositif qui se monte au bout du bras de l'antenne et qui transpose les fréquences élevées du signal satellite en fréquences plus basses pour les rendre compatibles avec le démodulateur [12]

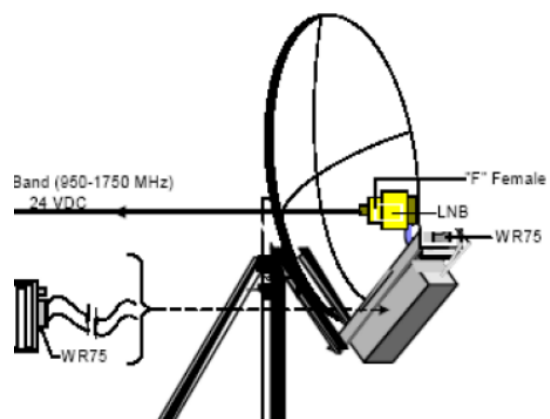


Figure 2.10 : Liaison entre l'antenne et la LNB

2.6 Le récepteur numérique ou décodeur

Le récepteur numérique ou décodeur est un appareil qui permet de recevoir les chaînes de télévision diffusées en format numérique.

Il existe différents types de récepteurs numériques selon le mode de transmission : terrestre (TNT), satellite, câble ou ADSL [13].



Figure 2.11 : Décodeur TNT

Le récepteur numérique décode le signal reçu et le transmet au téléviseur par un câble HDMI ou péritel. Il offre une meilleure qualité d'image et de son que la télévision analogique, ainsi qu'un plus grand choix de chaînes. Certains récepteurs numériques sont compatibles avec la haute définition (HD) ou la très haute définition (4K) [13].

2.6 La carte d'abonné

La carte d'abonné est une carte qui permet de recevoir des chaînes de télévision payantes ou par satellite sur votre téléviseur. Elle s'insère dans un module qui se connecte au port Common Interface de votre téléviseur ou de votre décodeur. La carte d'abonné contient les droits d'accès aux chaînes auxquelles vous êtes abonné



Figure 2.12 : La carte d'abonné

Le décodeur du LNB est un appareil qui reçoit le signal satellite capté par la parabole et le convertit en une fréquence plus basse pour le transmettre au téléviseur ou au module avec la carte d'abonné.

Le décodeur du LNB peut être intégré au téléviseur ou être externe

Pour utiliser la carte d'abonné dans le cadre des chaînes TV liées au décodeur du LNB, vous devez :

- Brancher et orienter correctement votre parabole vers le satellite de votre choix.
- Brancher le décodeur du LNB à la parabole et au téléviseur ou au module avec la carte d'abonné.
- Insérer la carte d'abonné dans le module et le connecter au port Common Interface du téléviseur ou du décodeur du LNB.
- Activer les droits de la carte d'abonné en contactant votre fournisseur de services.
- Lancer la recherche des chaînes sur votre téléviseur ou votre décodeur du LNB[14].

2.7 Le montage des antennes paraboliques [15]



Figure 2.13 : Composants d'une antenne Parabolique à tête LNB

Les Étapes de réalisation ou de mise en place de la parabole se résume comme suite :

- **Choix de l'emplacement :**
- **Fixation de la parabole**
- **Connexion des câbles**
- **Pointage de la parabole**

Choix de l'emplacement



Figure 2.14 : Choix de l'emplacement du parabole

Les satellites européens sont situés au sud. Il vous faut trouver un emplacement dans cette direction. Assurez-vous que l'environnement est dégagé et qu'aucun obstacle ne peut perturber la réception des ondes (arbres, immeubles).

Quant aux satellites africains, leur positionnement peut varier en fonction de l'opérateur de satellite et de la mission spécifique du satellite. De manière générale, la plupart des satellites de communication africains sont également situés en orbite géostationnaire, ce qui signifie qu'ils peuvent être accessibles depuis des emplacements similaires à ceux utilisés pour les satellites européens.

Fixation de la parabole

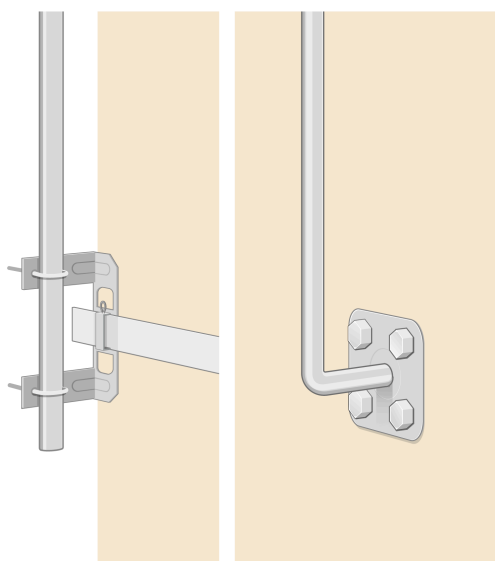


Figure 2.15 : Fixation de la parabole

Une fois l'emplacement choisi, assurez-vous que pour permettre le réglage, la rotation de la parabole soit possible d'au moins 20° de part et d'autre du support. Fixez la platine du support au moyen de chevilles et d'une perceuse à percussion. À l'aide d'un niveau à bulle, vérifiez la parfaite verticalité du support (important pour le réglage de l'angle de réception).

Assemblez le bras et la tête LNB et fixez le tout sur la parabole. Placez ensuite l'ensemble sur le support principal à l'aide des étriers de fixation fournis. En fonction de votre résidence, un tableau récapitulatif du fournisseur vous indique l'azimut (angle en degré par rapport au nord magnétique exemple : sud = 180°) ainsi que l'angle d'inclinaison idéal pour une réception optimisée. Procédez au réglage et à la fixation en tenant compte de ces critères.

Connexions des câbles

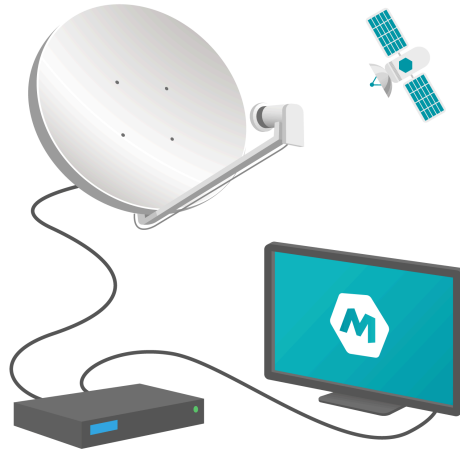


Figure 2.16 : Connexions des câbles

Déroulez le câble coaxial jusqu'au démodulateur. Placez les fiches F de part et d'autre du câble et connectez-les. Après avoir connecté le démodulateur sur le téléviseur, mettez-le en marche et sur le canal souhaité selon le satellite (exemple réglage satellite Astra mettre le décodeur sur AV).

Pointage de la parabole



Figure 2.17 : Pointage de la parabole

Les professionnels disposent d'appareils qui leur permettent de régler seuls la parabole en direction du satellite. L'aide d'une personne (à proximité du téléviseur) vous sera précieuse pour vous guider dans l'orientation définitive. Si vous êtes en possession d'une tablette ou d'un Smartphone il existe des applications adaptées au réglage des paraboles. Ces applications, appuyées par une boussole

virtuelle, souvent fournies par les propriétaires des satellites vous indiquent : la géolocalisation de votre résidence ;

- la localisation du satellite ;
- le réglage de l'élévation ;
- le réglage de l'azimut ;
- le réglage de l'inclinaison.

2.8 Analyse des perturbations et des obstacles dans la réception

2.8.1 Absorption atmosphérique

L'absorption atmosphérique est le phénomène par lequel l'atmosphère terrestre absorbe une partie du rayonnement électromagnétique émis par les sources célestes, comme le soleil les satellites. L'absorption dépend de la longueur d'onde du rayonnement et des gaz présents dans l'atmosphère

2.8.1.1 Absorption atmosphérique solaire[16]

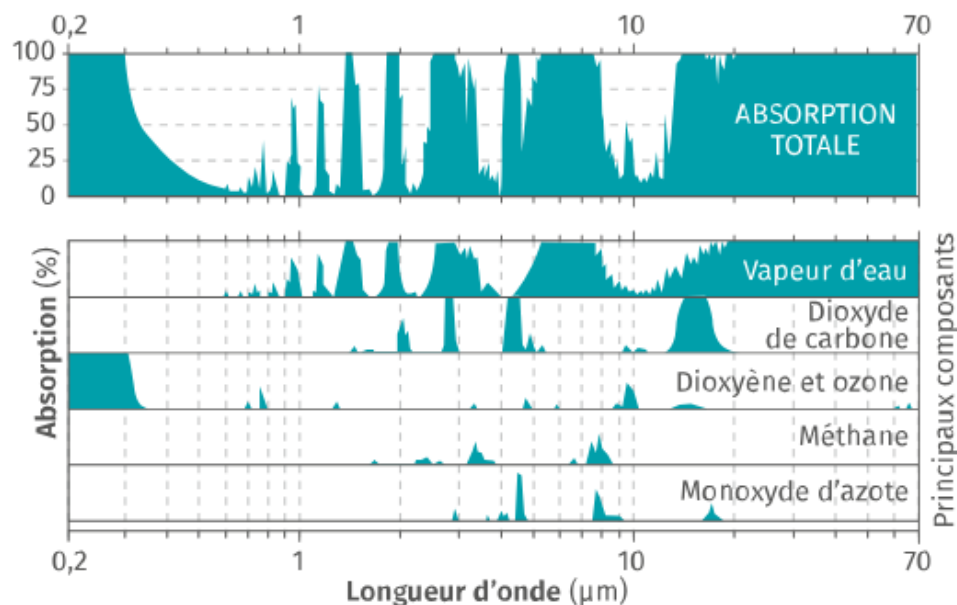


Figure 2.18 Absorption atmosphérique du rayonnement solaire

Parmi les gaz atmosphériques, les gaz les plus représentés, à savoir le diazote (N_2) et le dioxygène (O_2) sont des gaz biatomiques et symétriques qui peuvent être considérés comme neutres vis-à-vis des rayonnements émis par le Soleil. Les molécules non symétriques, qui ne représentent que 1,04 % des gaz atmosphériques, présentent la capacité d'absorber les rayonnements de différentes longueurs d'onde.

2.8.1.2 Absorption atmosphérique satellitaire[16]

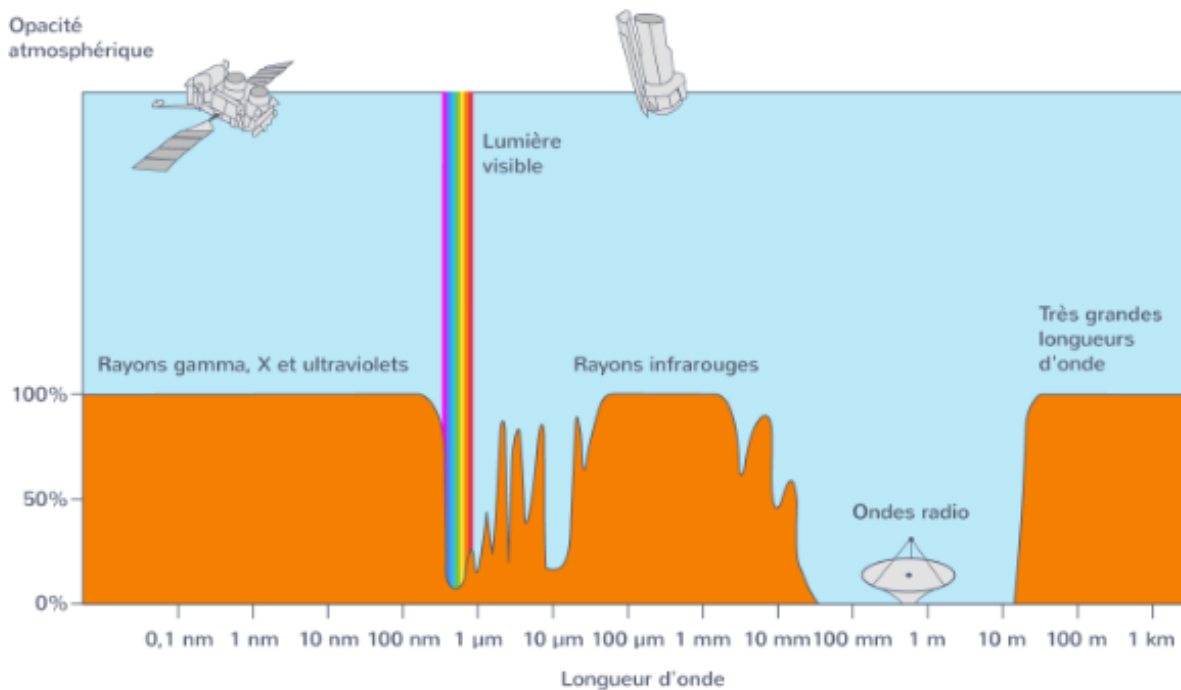


Figure 2.19 Courbe d'absorption de l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde

D'après cette courbe, On constate que:

- Les ondes radio ne sont pas du tout absorbées par l'atmosphère terrestre
- Les très grandes longueurs d'onde sont complètement absorbées par l'atmosphère terrestre
- Les rayons gamma sont complètement absorbés par l'atmosphère terrestre

Pour un rayonnement de longueur d'onde donné, plus l'opacité de l'atmosphère est grande, plus ce rayonnement est absorbé. Ainsi, les rayons gamma et la majorité des rayons infrarouges sont complètement absorbés par l'atmosphère terrestre et ne peuvent donc être reçus au niveau de la surface terrestre.

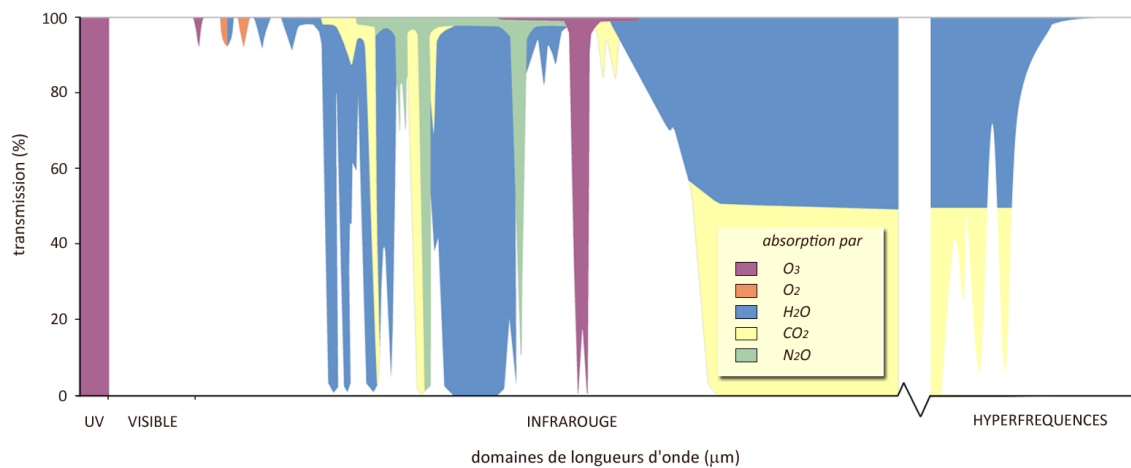


Figure 2.20 les fenêtres atmosphériques de transmission (en blanc sur le schéma) [17]

L'observation du schéma ci-dessus permet de dégager les points essentiels du phénomène d'absorption :

- Les rayonnements ultraviolets ($\lambda \sim 0,29\mu\text{m}$) sont totalement absorbés par l'ozone.
- Les domaines spectraux du visible et du proche infrarouge présentent une très bonne transmission et sont par conséquent très largement utilisés par les capteurs satellitaires dédiés à l'observation de la terre.
- Dans le moyen infrarouge et l'infrarouge thermique, seules quelques bandes spectrales permettent la transmission du rayonnement.
- La vapeur d'eau et le dioxyde de carbone présents dans l'atmosphère absorbent la quasi-totalité du rayonnement dans l'infrarouge lointain.
- Dans le domaine des hyperfréquences, le phénomène d'absorption est inexistant et l'atmosphère est totalement transparente au rayonnement.

2.9 Effets météorologiques (pluie, neige, etc.)

Perturbation Atmosphérique	Atténuation du Signal (LNB)	Effet sur la Qualité du Signal
Temps Clair	Faible atténuation	Qualité du signal optimale
Pluie Légère	Légère augmentation	Légère dégradation de la qualité
Pluie Intense	Forte augmentation	Forte dégradation de la qualité
Neige	Modérée à forte	Dégradation de la qualité
Brouillard	Légère à modérée	Dégradation légère à modérée
Nuages denses	Modérée à forte	Dégradation de la qualité
Orages	Forte augmentation	Forte dégradation de la qualité

Tableau 1 : Effets météorologiques

La fréquence choisie est 12 GHz, qui se situe à l'extrémité inférieure de la bande Ku et est largement utilisée dans les applications de communication par satellite à haut débit de données en raison de son équilibre souhaitable entre trois paramètres clés de performances du système :

- (1) bande passante disponible (~ 500 MHz),

- (2) les caractéristiques de propagation des micro-ondes (l'évanouissement dû à la pluie devient plus grave à mesure que la fréquence augmente encore)
- (3) la taille d'antenne requise (qui est approximativement adaptée à la fréquence).

La discussion est fournie à un niveau élevé pour des informations générales. Les conceptions réelles nécessitent des connaissances et une expertise beaucoup plus approfondies dans le développement de produits LNB [18].

2.10 Obstacles physiques (arbres, bâtiments, etc.)

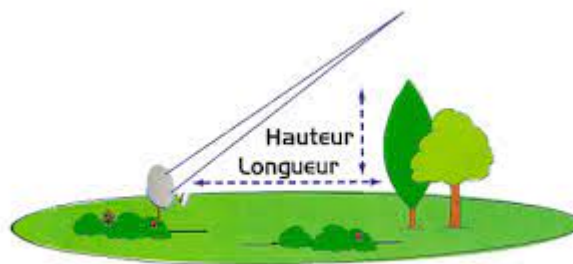


Figure 2.21 : Obstacles physiques

Les obstacles physiques tels que les arbres, les bâtiments et d'autres structures peuvent avoir un impact significatif sur la réception des signaux par la tête de réception LNB (Low Noise Block) utilisée dans les systèmes de communication par satellite. Ces obstacles peuvent entraîner des perturbations ou une dégradation de la qualité du signal, voire une perte totale de réception dans certains cas. Voici comment ces obstacles peuvent influencer la réception des signaux par le LNB :

Blocage du champ de vision :

Les arbres, les bâtiments et d'autres obstacles peuvent bloquer le champ de vision direct du LNB vers le satellite. Comme la communication par satellite dépend d'une ligne de vue directe, tout obstacle sur cette ligne peut entraîner une atténuation du signal.

Atténuation du signal :

Les signaux satellites peuvent être affaiblis lorsqu'ils traversent des obstacles physiques. Les matériaux des bâtiments, en particulier, peuvent absorber ou réfléchir les ondes radio, entraînant une réduction de l'intensité du signal arrivant au LNB.

Interférences :

Les obstacles peuvent également causer des interférences en réfléchissant les signaux. Des phénomènes tels que la diffraction, la réflexion ou la réfraction peuvent perturber la propagation du signal et altérer sa qualité.

Effet de pluie et de neige sur les arbres :

Les arbres peuvent accumuler de la neige ou de la pluie, ce qui peut accentuer l'atténuation du signal. La présence de feuilles mouillées peut également absorber les ondes radio.

2.11 Solutions pour minimiser les perturbations

Pour minimiser l'impact de ces obstacles, il est crucial de sélectionner un emplacement d'installation soigneusement dégagé, en évitant tout ce qui pourrait obstruer la ligne de vue entre le LNB et le satellite visé. De plus, des analyses approfondies de site, des simulations de propagation des ondes et des ajustements d'orientation peuvent être nécessaires pour optimiser la réception dans des environnements sujets à des obstacles physiques.

Chapitre 3 : Simulations et Résultats

3.1 Méthodologie de simulation

3.1.1 Choix de logiciels de simulation (ADS)



Figure 3.1 Logiciel ADS

ADS, ou Advanced Design System, est un logiciel de conception électronique développé par Keysight Technologies. Il s'agit d'une plateforme complète et intégrée destinée à la conception, la simulation et la vérification de circuits électroniques analogiques et radiofréquences. Utilisé par les ingénieurs et les concepteurs de circuits électroniques, ADS offre une gamme d'outils puissants pour la modélisation de circuits, l'analyse de signaux, la simulation et l'optimisation.

Voici quelques caractéristiques et points forts d'ADS :

Modélisation avancée :

ADS propose une bibliothèque étendue de composants électroniques prêts à l'emploi, ainsi que des outils pour créer des modèles personnalisés. Cela permet aux concepteurs de simuler avec précision le comportement de leurs circuits.

Simulation RF/Microwave :

ADS excelle dans la simulation des circuits radiofréquences (RF) et hyperfréquences, permettant aux ingénieurs de concevoir des systèmes de communication sans fil, des amplificateurs RF, des filtres et d'autres dispositifs.

Analyse de signaux :

Le logiciel offre des outils d'analyse de signaux avancés, permettant aux utilisateurs de caractériser la réponse en fréquence, le bruit, la distorsion, et d'autres paramètres cruciaux pour la conception électronique.

Conception d'émetteurs et de récepteurs :

ADS prend en charge la conception complète d'émetteurs et de récepteurs, y compris la modélisation des circuits analogiques, des filtres, des antennes et d'autres composants.

Que ce soit pour la conception de circuits intégrés, la création d'amplificateurs haute fréquence ou la simulation de systèmes de communication, ADS est largement utilisé dans l'industrie électronique pour accélérer le processus de conception et garantir des performances optimales des circuits électroniques. C'est au regard de toutes ces particularités de ADS que nous avons choisie ADS pour notre simulation des blocs LNB.

3.2 Modélisation de la chaîne de réception dans le logiciel sélectionné

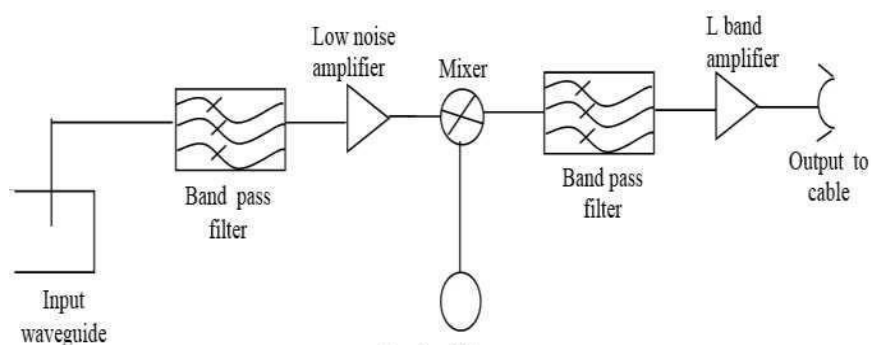


Figure 3.2 : Modélisation des blocs LNB

Dans le logiciel ADS, nous allons concevoir notre montage selon la modélisation ci-dessus. Pour ce faire, voici les différents composants à utiliser dans ADS.

3.2.1 Les Composants utilisés sous ADS

P_1Tone (Power Source, Single Frequency) :

La source de puissance P_1Tone génère un signal à fréquence unique, simulant le signal reçu d'un satellite. Elle alimente le reste du système en fournissant une puissance cohérente pour émuler le signal d'entrée.

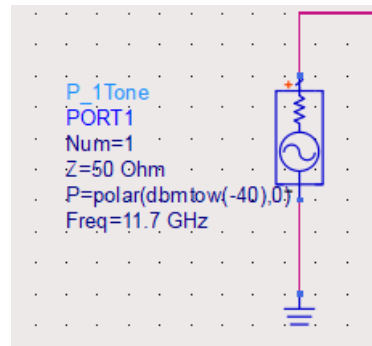


Figure 3.3 : Générateur de signal RF

Les paramètres à prendre en compte pour ce composant sont :

- L'impédance $Z = 50 \text{ Ohm}$
- `polar(...)` La fonction `polar` est généralement utilisée pour représenter graphiquement des données en coordonnées polaires, elle convertit une grandeur ou une valeur en coordonnées polaires. on le laisse par défaut.
- La fréquence $\text{Freq} = 11.7 \text{ GHz}$, elle représente la fréquence du signal reçu du satellite.

Filtre BPF_Butterworth (Butterworth Bandpass Filter) :

Le filtre BPF_Butterworth a pour rôle de filtrer le signal d'entrée, en ne laissant passer que les fréquences comprises dans une plage spécifique. Dans le contexte de la simulation LNB, il est utilisé pour éliminer les composants indésirables du spectre, focalisant le système sur la bande de fréquences satellite.

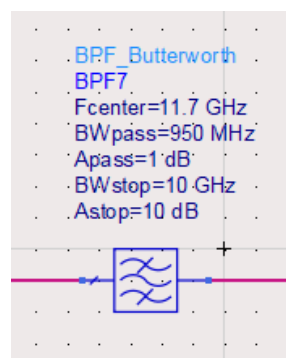


Figure 3.4 Filtre Passe Bande

Les paramètres à prendre en compte pour ce composant sont :

- $F_{center} = 11.7 \text{ GHz}$, correspondant à la fréquence centrale d'un filtre passe-bande (BPF) ou encore fréquence médiane ou centrale de la bande passante dans laquelle le filtre permet le passage du signal.
- $BW_{pass} = 950 \text{ MHz}$: Bande passante acceptable en sortie du filtre
- $BW_{stop} = 1 \text{ GHz}$: fréquence seuil à bloqué au niveau du filtre
- $A_{stop} = 10 \text{ dB}$: Amplitude limite

Amplificateur LNA (Low Noise Amplifier) :

L'amplificateur LNA a pour fonction d'amplifier le signal tout en introduisant le moins de bruit possible. Cela permet de compenser les pertes du système et d'augmenter la puissance du signal avant la conversion.

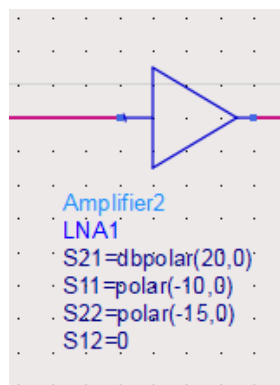


Figure 3.5 Amplificateur LNA

Les paramètres à prendre en compte pour ce composant sont :

- S_{11} (Coefficient de réflexion à l'entrée) : S_{11} mesure la réflexion du signal à l'entrée de l'amplificateur. $S_{11} = \text{polar}()$ pour une représentation graphique
- S_{12} (Transfert d'isolation) : S_{12} représente la puissance transférée de la sortie vers l'entrée de l'amplificateur $S_{12} = 0$
- S_{21} (Gain) : S_{21} est le coefficient de transmission ou le gain de l'amplificateur. Il mesure l'amplification du signal entre l'entrée et la sortie de l'amplificateur. Un S_{21} élevé indique une capacité élevée à amplifier le signal. En représentation graphique $S_{21} = \text{polar}(20,0)$
- S_{22} (Coefficient de réflexion à la sortie) : S_{22} mesure la réflexion du signal à la sortie de l'amplificateur. Il indique la quantité de signal réfléchi à la sortie. Un S_{22} faible indique une bonne adaptation d'impédance à la sortie, minimisant la réflexion. $S_{22} = \text{polar}(-15,0)$

Mixer:

Le mélangeur (ou mixer) effectue la conversion de fréquence en mélangeant le signal amplifié avec un signal provenant d'un oscillateur local. Cela produit des composantes à des fréquences résultantes, facilitant ainsi le traitement ultérieur du signal.

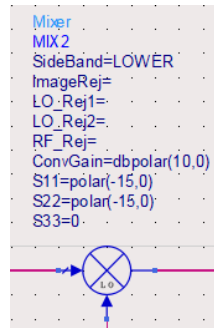


Figure 3.6 Mixer

Les paramètres à prendre en compte pour ce composant sont :

- SideBand=LOWER : indique que la bande latérale inférieure (LOWER) du signal de sortie du mélangeur
- ConvGain = dbpolar(10,0) : Cela indique le gain de conversion du mélangeur pour le signal de fréquence intermédiaire produit lors du mélange
- S11 : mesure la réflexion du signal à l'entrée du mélangeur vérifie l'adaptation d'impédance à l'entrée, minimisant la réflexion du signal
- S22=polar(-15,0) : indique une bonne adaptation d'impédance à la sortie, minimisant la réflexion du signal à cet endroit

Oscillateur V_1Tone :

L'oscillateur V_1Tone génère un signal à une fréquence spécifique, souvent utilisé comme signal local dans le mélangeur pour réaliser la conversion de fréquence.

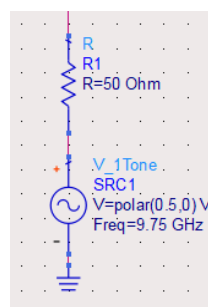


Figure 3.7 Bloc Oscillateur

Les paramètres à prendre en compte pour ce composant sont :

- Freq=9,75 GHz : fréquence d'oscillation pour obtenir une fréquence IF de quelques mégahertz à la sortie du mélangeur
- V=polar(1,0) v : tension complexe V en coordonnées polaires, magnitude=1, angle =0

La résistance Term :

La résistance Term est généralement utilisée pour terminer le circuit de manière appropriée, assurant la cohérence des caractéristiques d'impédance dans la simulation. On utilise ici une résistance de 50 Ohm.

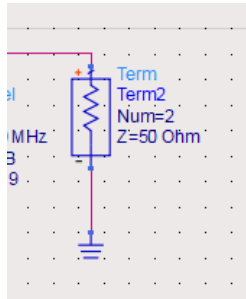


Figure 3.8 Résistance

Simulateur S-Parameters :

Le simulateur S-Parameters évalue le comportement du circuit en termes de paramètres de dispersion (S-parameters). Il permet d'analyser les caractéristiques de transmission, de réflexion, et d'interconnexion entre les composants du système, fournissant une compréhension approfondie du comportement du LNB simulé.

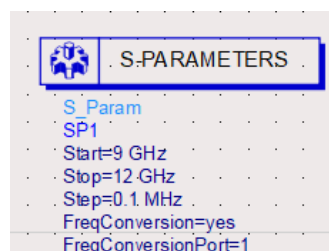


Figure 3.9 Simulateur de paramètre S

Les paramètres à prendre en compte pour ce composant sont : ces paramètres définissent les conditions de fréquence pour la simulation des S-parameters, activent la conversion de fréquence si nécessaire, et précisent le port auquel cette conversion doit être appliquée dans le simulateur

- Start=1.0 GHz : Ce paramètre spécifie la fréquence de départ pour la simulation des S-parameters. La simulation commencera à cette fréquence
- Stop=3.0 GHz : Ce paramètre spécifie la fréquence de fin pour la simulation des S-parameters. La simulation s'arrêtera à cette fréquence.
- FreqConversion=yes : Lorsque ce paramètre est défini sur "yes", il active la conversion de fréquence dans le simulateur
- FreqConversionPort=1 : Ce paramètre spécifie le port auquel la conversion de fréquence sera appliquée

Filtre LPF_Bessel (situé à la sortie du mélangeur) :

Le filtre LPF_Bessel, également appelé filtre passe-bas de type Bessel, est un type de filtre électronique caractérisé par une réponse de phase relativement constante dans la bande passante. Contrairement à d'autres filtres passe-bas, les filtres Bessel minimisent la distorsion du signal en préservant la linéarité temporelle, ce qui signifie que les signaux en sortie conservent leurs formes d'onde temporelles.

La caractéristique distinctive du filtre Bessel est son délai de groupe constant, ce qui signifie que toutes les fréquences du signal passent par le filtre avec le même délai.

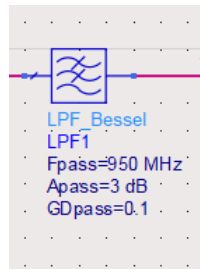


Figure 3.10 : Filtre Bessel

- $F_{pass} = 950 \text{ MHz}$ à 2.2 GHz : Fréquence de coupure basse pour le filtre LPF_Bessel. Cette plage peut dépendre de la bande de fréquences satellite que vous utilisez.
- $A_{pass} = 1 \text{ dB}$ à 3 dB : Perte d'insertion maximale dans la bande passante du filtre. Les filtres Bessel sont souvent conçus pour avoir une réponse de magnitude plate dans la bande passante.
- $GD_{pass} = 0.1 \text{ ns}$ à 0.5 ns : Délai de groupe dans la bande passante du filtre. Cela dépendra de la conception spécifique du filtre et de la bande passante souhaitée.

3.3 Résultats des simulations réalisées

3.3.1 Simulation 1 : Simulation des paramètres d'impédance et Gain

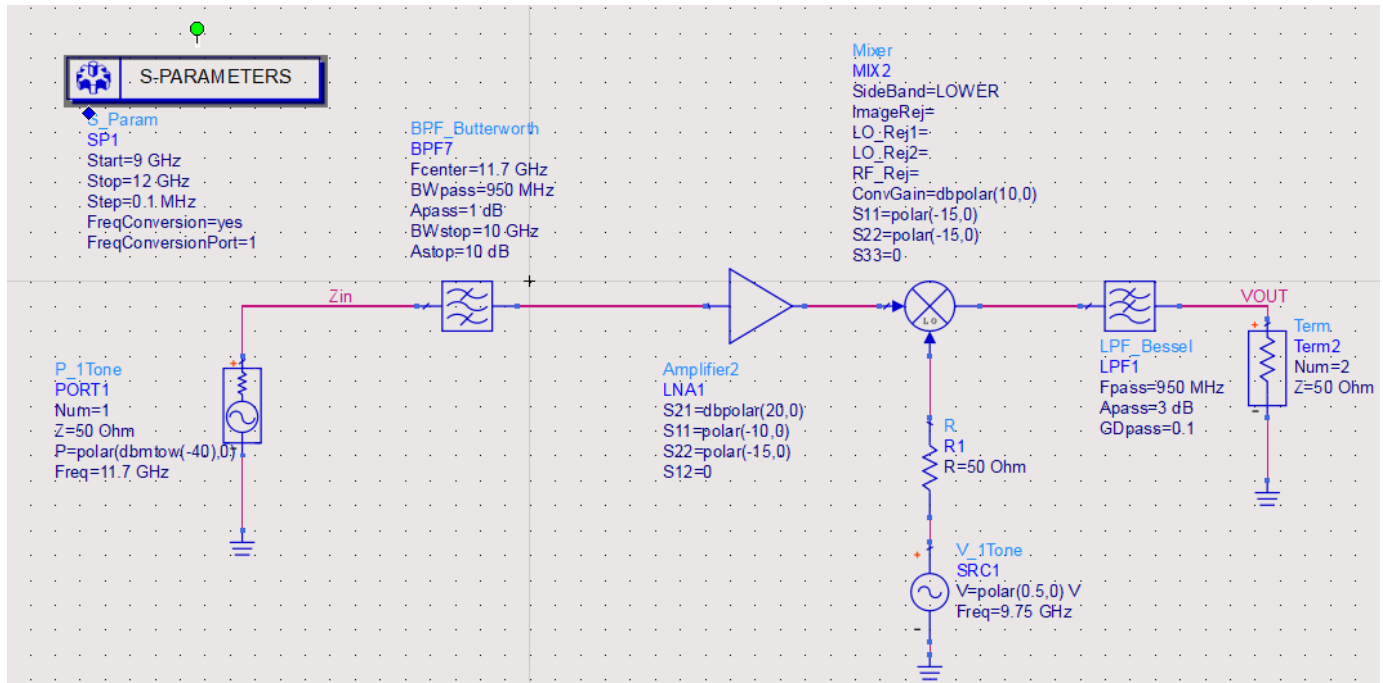


Figure 3.11 Simulation du paramètre S

On simule le paramètre le gain du paramètre S en fonction de la fréquence.

Le contrôleur de simulation S-PARAMETER dans Advanced Design System (ADS) est essentiel pour la simulation du bloc LNB (Low Noise Block) car il permet de caractériser le comportement des composants à travers leurs paramètres S (paramètres de diffusion) à différentes fréquences. Ces paramètres S décrivent comment les signaux se propagent à travers un réseau de composants, offrant une compréhension détaillée de la réponse en fréquence, des gains, des pertes, et des réflexions.

On peut analyser et optimiser chaque composant du LNB, évaluer la stabilité, minimiser les réflexions indésirables, et assurer une conception cohérente et performante.

3.3.2 Analyse du résultat

A. Coefficient de réflexion S22 du signal en sortie LNB

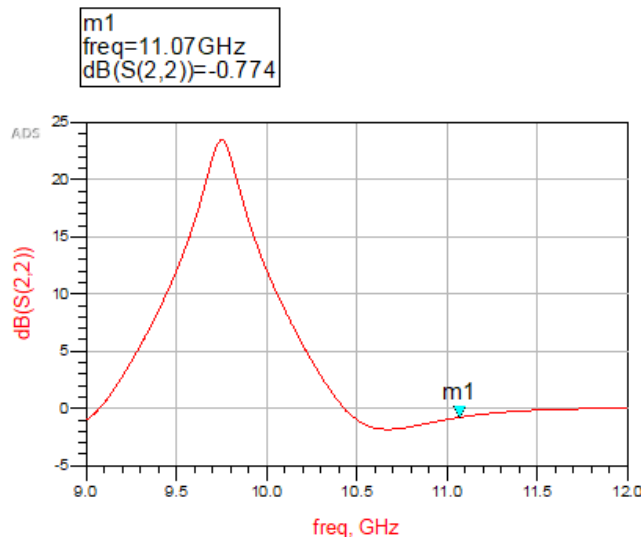


Figure 3.12 : Analyse du coefficient de réflexion S22 du signal en sortie

Le coefficient de réflexion à la sortie, noté S22 dans le contexte des paramètres S (S-parameters) d'un composant, est une mesure de la réflexion du signal à la sortie du composant en fonction de la fréquence. Plus précisément, il représente la proportion du signal réfléchi par rapport au signal incident à la sortie du composant.

Mathématiquement, S22 est généralement exprimé en coordonnées complexes, où la partie réelle représente l'amplitude de la réflexion et la partie imaginaire la phase associée à cette réflexion.

Lorsqu'on trace le coefficient de réflexion S22 en fonction de la fréquence, on obtient un graphique appelé "réponse en fréquence de la réflexion". Cette courbe montre comment la réflexion du signal à la sortie du composant varie à différentes fréquences. Une réflexion minimale (S22 proche de zéro) indique une bonne adaptation d'impédance, où le signal est efficacement transféré sans réflexion importante.

Analyser S22 est essentiel pour concevoir des systèmes électroniques, en particulier dans les applications RF et micro-ondes. Une bonne adaptation d'impédance à la sortie d'un composant (S22 proche de zéro) permet d'optimiser le transfert de puissance et de minimiser les pertes de signal.

B. Coefficient 21 de Gain

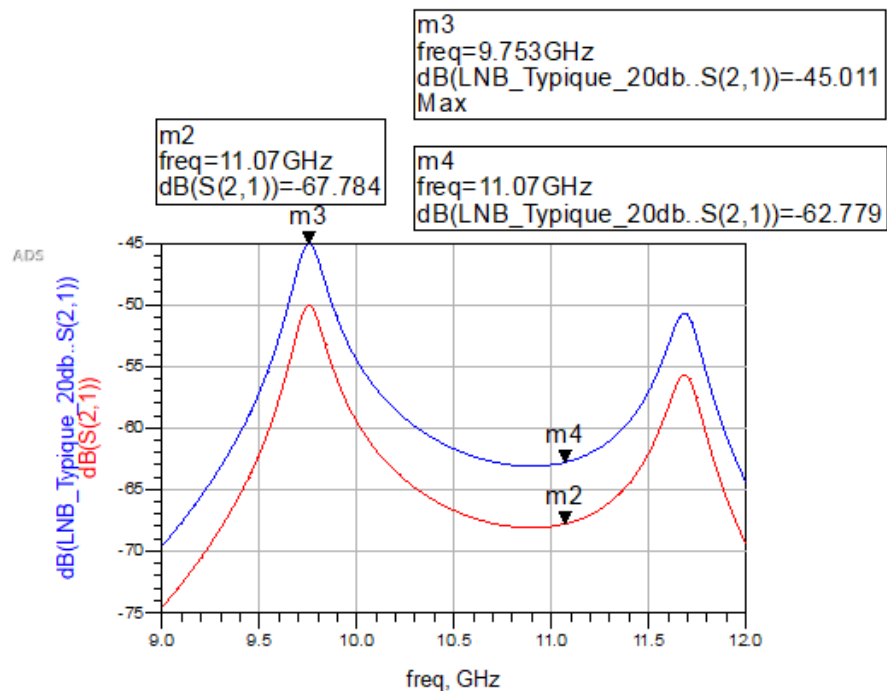


Figure 3.13 : Coefficients de gain S21 du LNB

Le paramètre S21 est le coefficient de transmission, mesurant l'amplitude du signal en sortie par rapport à l'amplitude du signal en entrée.

Cette courbe montre comment le gain de l'amplificateur varie à différentes fréquences.

elle permet de déterminer la plage de fréquences dans laquelle l'amplificateur fonctionne efficacement

Un amplificateur LNA est généralement conçu pour avoir un gain élevé dans la bande passante d'intérêt tout en minimisant le bruit ajouté au signal.

3.3.3 Simulation 2 : Simulation du niveau de bruit dans la LNB

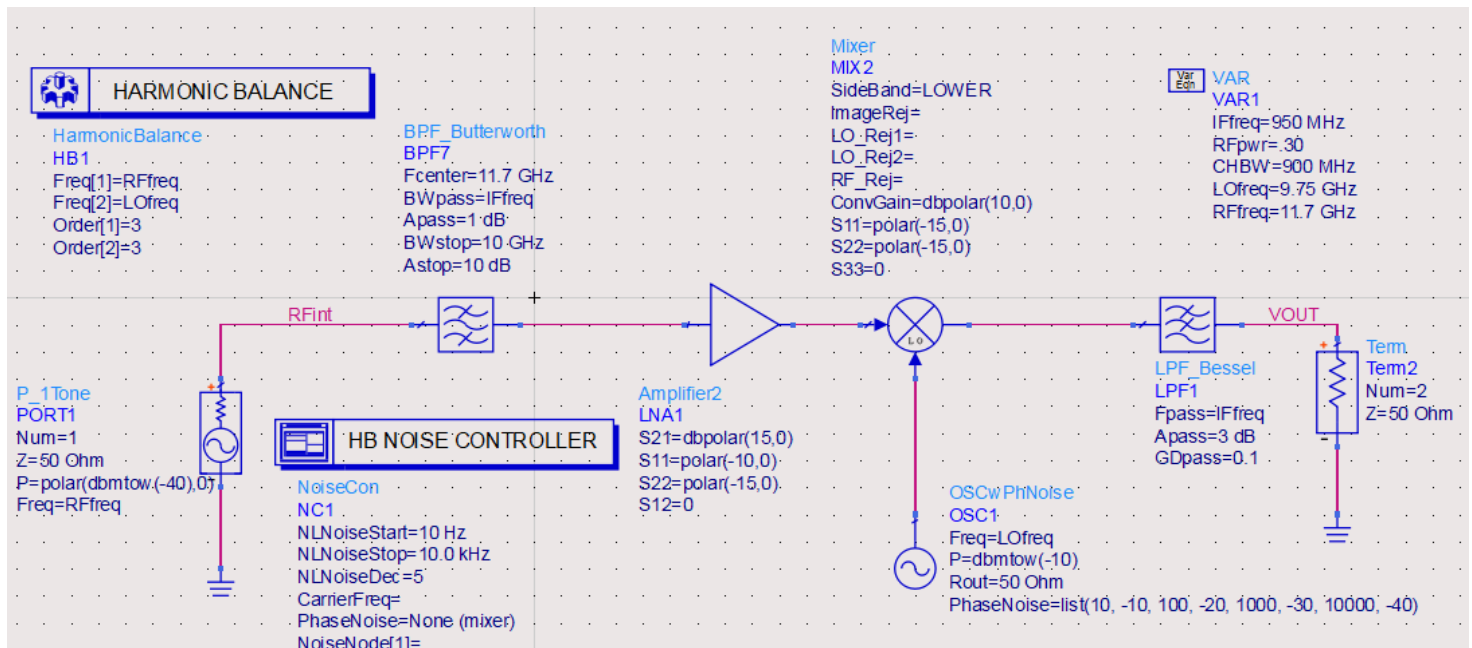


Figure 3.14 Simulation du niveau de bruit du signal

Cette stimulation consiste à évaluer le niveau de bruit à l'entrée et à la sortie du bloc LNB en prenant en considération les conditions de bruit dans le bloc LNB.

Composant à ajouter dans cette simulation



Figure 3.15 Oscillateur OSCwPhNoise

Ce composant permet de réaliser le rôle d'oscillateur avec ajout de faible bruit pour simuler les conditions réelles du bloc LNB.

NB : il a été ajouté les contrôles de simulation Harmonic Balance et HB Noise: Ce composant est utilisé avec le simulateur HB. Il permet de séparer facilement toutes les mesures de bruit du contrôleur de simulation.

3.3.4 Résultats de simulation

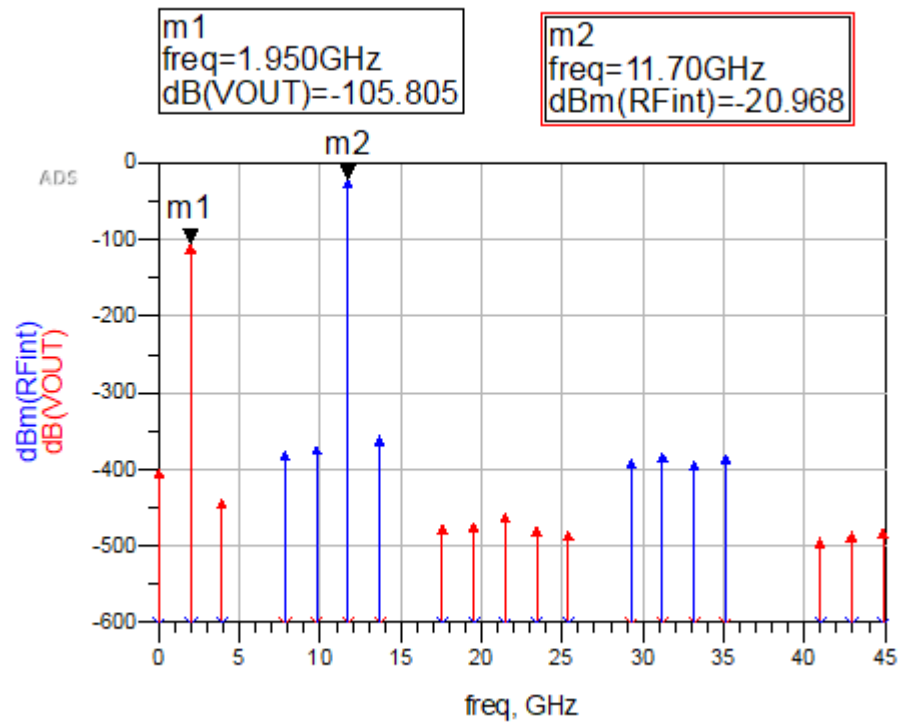


Figure 3.16 Affaiblissement du bruit par le bloc LNB

La réponse en fréquence obtenue par rapport au niveau de bruit dans le bloc LNB montre en effet, le rôle du LNB à minimiser le bruit du signal pour une transmission de qualité vers le décodeur.

le niveau de bruit RFint pour la fréquence entrante dans le bloc (coloré en bleu) dans cette figure ci-dessus, à la fréquence 11.7 GHz est de -20dBm et est plus élevé que -105.8 dBm de la fréquence voisine de 950 MHz IF attendu à la sortie du bloc LNB.

Conclusion Générales

En conclusion de cette étude approfondie sur la tête de réception LNB, plusieurs constats et perspectives émergent, démontrant la complexité et la pertinence de ce composant dans les systèmes de communication par satellite. Tout au long de notre recherche, nous avons rencontré certaines contraintes, parmi lesquelles la disponibilité limitée de documentation spécifique sur la simulation des blocs LNB sous ADS (Advanced Design System).

La rareté des ressources documentaires détaillées sur la modélisation des blocs LNB dans le cadre d'ADS a constitué un défi, nécessitant une approche méthodique et une adaptation constante. Néanmoins, notre engagement à surmonter ces obstacles nous a permis d'explorer des blocs ADS concernant la tête de réception LNB, en ajustant les configurations pour mieux refléter les conditions réelles et optimiser la précision des simulations.

En dépit de ces défis, notre travail a permis de fournir des résultats significatifs, combinant des analyses théoriques avec des simulations pratiques pour éclairer la compréhension de la tête de réception LNB. Cependant, des perspectives d'amélioration demeurent, notamment en encourageant la collaboration et le partage de connaissances au sein de la communauté scientifique travaillant sur les communications par satellite.

Pour accroître la plus-value de ce travail, il serait bénéfique d'approfondir la recherche sur la modélisation des blocs LNB, en mettant en place des bancs d'essais expérimentaux pour valider les résultats de simulation. De plus, l'exploration de nouvelles technologies et l'intégration de méthodologies innovantes pourraient enrichir notre compréhension de la tête de réception LNB, ouvrant ainsi la voie à des améliorations continues dans la fiabilité et l'efficacité des systèmes de communication par satellite. En somme, cette étude constitue un jalon significatif, appelant à une poursuite des efforts de recherche pour perfectionner et innover dans le domaine des têtes de réception LNB.

Références

Chapitre 1

- [1] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Orbite_g%C3%A9ostationnaire
- [2] : razafiniarivo naritahiana emilio, etude d'exploitation en reception de la television par satellite & <https://www.boulangier.com/c/parabole>
- [3] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Antenne_parabolique
- [4] : <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Antenne%20parabolique.fr.html>
- [5] : <https://bfsat.fr/fr/content/20-reception-multi-tete>
- [6] : <https://fr.ahkcpower.com/info/some-informations-about-lnb-47075292.html> & <https://www.vini.pf/television/materiel-tv/tete-de-reception-lnb>
- [7] : chatgpt
- [8] : <https://www.boulangier.com/c/parabole>

Chapitre 2

- [9] : <http://nif.free.fr/lnb.html>
- [10] : <http://g.guenin.chez-alice.fr/prati/Materiel.htm>
- [11] : <https://www.digikey.fr/fr/articles/low-noise-amplifiers-maximize-receiver-sensitivity>
- [12] : Message "liaison avec le LNB de l'antenne interrompt" - Forum de campingcar-bricolaisirs
- [13] : Comment choisir un récepteur TNT ou TNT HD pour TV (son-video.com)
- [14] : International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR) ISSN : 2321-0869 (O) 2454-4698 (P), Volume-3, Numéro-9, septembre 2015
- [15] : <https://www.manomano.fr/conseil/comment-installer-une-antenne-parabolique-5938>
- [16] : <https://www.kartable.fr/ressources/enseignement-scientifique/exercice/commenter-la-courbe-dabsorption-de-latmosphere-terrestre-en-fonction-de-la-longueur-donde/51400/138764> & <https://www.lelivrescolaire.fr/page/6761369> &
- [17] : <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/3-rayonnement-atmosphere/3-1-absorption-transmission-atmospherique.html>
- [18] : https://www.cel.com/blog/ce3512k2_satellite_lnb/

Chapitre 3

Agilent Technologie, Fondamentaux de l'ADS - 2009 & Advanced Design System 2011.01