



**HAL**  
open science

## Circuits et systèmes de communication micro-ondes

Halim Boutayeb

► **To cite this version:**

Halim Boutayeb. Circuits et systèmes de communication micro-ondes. Engineering school. octobre-decembre 2006, Ecole Polytechnique de Montreal, 2006. cel-00156394

**HAL Id: cel-00156394**

**<https://cel.hal.science/cel-00156394v1>**

Submitted on 22 Jun 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Département du génie électrique et génie informatique**

**CIRCUITS PASSIFS MICRO-ONDES  
(COURS ELE-4500)**

**CIRCUITS ET SYSTÈMES DE COMMUNICATIONS MICRO-ONDES  
(COURS ELE-4501)**

**&**

**ÉQUIPEMENTS SPATIAUX MICRO-ONDES II  
(COURS TS-4600)**

**ÉLÉMENTS DE BASE DES COMMUNICATIONS PAR  
SATELLITE**

**février, 10**

---

## TABLE DE MATIÈRES

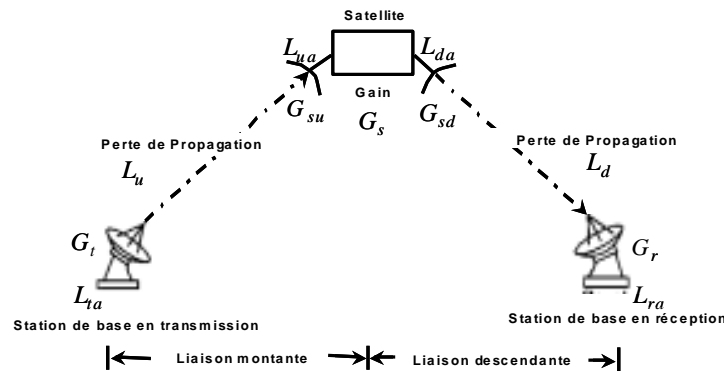
<b>1</b>	<b>PRINCIPAUX PARAMÈTRES D'UNE LIAISON.....</b>	<b>4</b>
1.1	Gain de l'antenne .....	4
1.2	Perte dans l'espace libre.....	5
1.3	Perte par absorption atmosphérique: .....	6
1.4	Température de bruit .....	7
1.5	Température de bruit de l'antenne ( $T_a$ ).....	8
1.6	Figure de bruit ( $NF$ ).....	9
1.7	Température du bruit équivalente à l'entrée d'un circuit.....	10
1.8	EIRP.....	11
<b>2</b>	<b>BILAN DE PUISSANCE D'UN LIEN PAR SATELLITE.....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>ÉLÉMENTS DE CONCEPTION D'UN RÉCEPTEUR.....</b>	<b>13</b>
3.1	Température de bruit d'un récepteur :.....	13
3.2	Figure de mérite $G/T$ .....	15
<b>4</b>	<b>QUALITÉ D'UN LIEN DE COMMUNICATION PAR SATELLITE.....</b>	<b>16</b>
4.1	Bruits dans un lien de communication par satellite.....	16
4.2	Rapport $C/N_o$ d'un lien satellite :.....	17
4.3	Facteurs de perturbation de la qualité d'un lien satellite .....	24

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. CONFIGURATION D'UN LIEN DE COMMUNICATION PAR SATELLITE.....	4
FIGURE 2. ABSORPTION ATMOSPHERIQUE TYPIQUE (EN DB).....	7
FIGURE 3. FIGURE DE BRUIT D'UN AMPLIFICATEUR.....	9
FIGURE 4. TEMPÉRATURE DE BRUIT ÉQUIVALENTE À L'ENTRÉE D'UN CIRCUIT PASSIF .....	10
FIGURE 5. COURBES DE NIVEAU CONSTANT DU EIPR TYPIQUES .....	11
FIGURE 6. PARAMÈTRES D'UN LIEN DE COMMUNICATION PAR SATELLITE .....	12
FIGURE 7. CASCADE DE CIRCUITS ÉQUIVALENT D'UN RÉCEPTEUR .....	14
FIGURE 8. BRUIT D'UNE COMMUNICATION PAR SATELLITE. ....	17
FIGURE 9. BLOC DIAGRAMME SIMPLIFIÉ D'UNE LIAISON RADIOFRÉQUENCE.....	17
FIGURE 10. BLOC DIAGRAMME D'UN LIEN SATELLITE.....	19

# 1 Principaux paramètres d'une liaison

Une liaison de communication par satellite est illustrée par la figure 1.



**Figure 1.** Configuration d'un lien de communication par satellite

Les différents paramètres importants pour la conception d'une liaison sont définis ci-dessous.

## 1.1 GAIN DE L'ANTENNE

Dans le calcul d'une liaison, le gain est la caractéristique la plus importante d'une antenne. Il est défini comme étant le rapport de la puissance rayonnée par l'antenne, dans une direction, par unité d'angle solide, sur la puissance rayonnée par une antenne référence par unité d'angle solide. Ce gain est dit absolu si l'antenne référence est isotrope, c'est à dire qu'elle rayonne uniformément dans toutes les directions. Le gain absolu est souvent utilisé dans le calcul d'une liaison par satellite et il est exprimé en dBi.

Dans les coordonnées polaires, le gain dans la direction  $(\theta, \phi)$  peut être exprimé comme suit :

$$G(\theta, \phi) = \frac{w(\theta, \phi)}{P_t / 4\pi} \quad (1)$$

Avec,  $w(\theta, \phi)$  et  $P_t$  représentent respectivement la densité du flux de la puissance dans la direction  $(\theta, \phi)$  et la puissance transmise. Si la direction de rayonnement n'est pas spécifiée, le gain de l'antenne est sous-entendu relatif à la direction de maximum de rayonnement.

Le gain d'une antenne parabolique qui est généralement utilisée dans les systèmes de communication par satellite est égal à :

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

Où,  $D$  est le diamètre de l'antenne,  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $\eta$  est le rendement de l'ouverture de l'antenne (normalement, elle varie entre 50% et 70%).

En plus du gain dans la direction de maximum de rayonnement, le patron de rayonnement de l'antenne est une caractéristique très importante. Cette caractéristique est utilisée pour le calcul du bruit et des interférences à l'entrée de l'antenne.

### Exemple

Le gain d'une antenne parabolique de diamètre 100 cm, ayant un rendement d'ouverture de 60% et opérant à 1.5 GHz est égal à :

$$G = 0.6 \times \left( \frac{\pi \times 1.500 \times 10^9}{3 \times 10^8} \right)^2 = 148.0$$

## 1.2 PERTE DANS L'ESPACE LIBRE

Le calcul des pertes dans l'espace libre est une étape de base pour le calcul d'une liaison de communication par satellite. Dans ce type de systèmes de communication, on suppose que l'antenne de transmission et l'antenne de réception sont alignées face à face dans l'espace libre et sont séparées par une distance suffisamment élevée,  $d$ , exprimée en mètres. Soit  $G_t$  et  $G_r$  les gains respectifs des antennes de transmission et de réception,  $A_r$  la surface effective de l'antenne de réception,  $P_t$  la puissance transmise et  $\lambda$  la longueur d'onde. En supposant que la puissance  $P_t G_t$  est rayonnée selon une sphère de rayon  $d$ , la densité de puissance au point de réception est donnée par  $P_t G_t / (4 \pi d^2)$ . La puissance reçue  $P_r$  peut être exprimée selon l'équation de Friis:

$$P_r = P_t G_t \frac{A_r}{4\pi d^2} = P_t G_t G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (3)$$

$$\text{Où } A_r = G_r \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (4)$$

Ainsi, les pertes dans l'espace libre peuvent être exprimées comme le rapport de la puissance reçue par la puissance transmise. Si en plus, nous supposons que les antennes de transmission et de réception sont isotropes nous pouvons exprimer les pertes de transmission comme suit :

$$L_f = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} \quad (5)$$

donc, en substituant l'équation 5 dans l'équation 3 nous obtiendrons :

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L_f} = \frac{EIRP \times G_r}{L_f} \quad (6)$$

Avec *EIRP* sera défini ultérieurement.

### Exemple

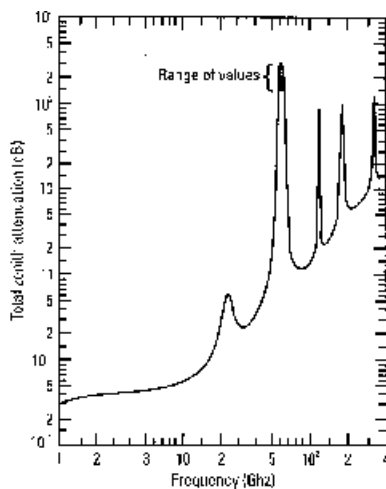
Les pertes de propagation dans l'espace libre à 1.5 GHz d'un lien entre un satellite et une station de base séparés par une distance égale à 36500 km sont égales à :

$$L_f = \left( \frac{4\pi \times 36500 \times 10^3}{\frac{3 \times 10^8}{1.5 \times 10^9}} \right)^2 = (7.3\pi \times 10^8)^2 = 187.2 \text{ dB}$$

### **1.3 PERTE PAR ABSORPTION ATMOSPHERIQUE:**

Les molécules gazeuses dans la troposphère telles que l'oxygène et la vapeur d'eau sont les principaux facteurs de l'atténuation des ondes radio sous forme d'absorption par résonance.

L'atténuation peut être provoquée par les phénomènes d'absorption et de dispersion causés par les particules de glace ou les gouttelettes d'eau. La figure 2 montre les pertes de propagation sur les ondes radio dues aux effets atmosphériques dépendamment de la fréquence.



**Figure 2.** Absorption atmosphérique typique (en dB)

#### 1.4 TEMPÉRATURE DE BRUIT

Le niveau de bruit au niveau des récepteurs, dans un système de communication par satellite, doit être extrêmement faible puisque le signal désiré est souvent assez faible. Ce niveau du bruit peut être exprimé en terme de température absolue fictive. Particulièrement, quand le bruit thermique, par unité de largeur de bande, d'un objet est équivalent au bruit thermique généré par une résistance de  $50 \Omega$  à une température absolue  $T$  alors le bruit est exprimé en terme de température absolue  $T$  et devient équivalent à l'énergie thermique moyenne rayonnée à la température absolue  $T$ . La puissance du bruit thermique par unité de largeur de bande,  $N_o$ , peut être exprimée par  $kT$  avec  $k$  désigne la constante de Boltzmann ( $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ). La température  $T$  qui correspond à ce bruit thermique est appelée température de bruit (*noise temperature*).

Il est souvent recommandé d'exprimer  $N_o$  en décibel selon l'équation suivante :



$$[N_o]_{dB} = 10 * \log(k) + 10 * \log(T) = -228.6 + 10 * \log(T) \quad dB / Hz \quad (7)$$

### Exemple

La densité de puissance du bruit généré par une résistance à une température de 27°C est calculée par l'équation 7 comme :

$$N_o = -228.6 + 10 \log(273 + 27) = -203.8 \quad dB / Hz$$

## 1.5 TEMPÉRATURE DE BRUIT DE L'ANTENNE ( $T_A$ )

Une antenne de réception capte en plus du signal utile des ondes radio nuisibles. Par surcroît, les pertes thermiques de l'antenne sont considérées comme bruit thermique. Ce bruit cause des problèmes lors de la réception des faibles signaux dans les systèmes de communications par satellite d'où la nécessité d'une antenne faible bruit.

Si l'antenne entraîne une perte thermique, la température de bruit thermique de cette dernière est égale à  $(1-\eta)T_o$ , avec  $\eta$  et  $T_o$  désignent respectivement le rendement d'ouverture de l'antenne et la température ambiante (en Kelvin).

Le bruit ( $T_s$ ), associé à l'antenne, en provenance du ciel consiste en bruit cosmique (rayonnement de haute énergie d'origine solaire, galactique ou extragalactique, produisant des phénomènes d'ionisation dans la haute atmosphère), bruit provenant des foudres et le bruit thermique provenant de l'absorption atmosphérique.

Par conséquent, le bruit de l'antenne  $T_a$  peut être exprimé comme suit :

$$T_a = T_s + (1 - \eta)T_o \quad (8)$$

$T_a$  est appelée la température équivalente du bruit de l'antenne. Il faut signaler que la majeure contribution au bruit de l'antenne  $T_a$  est due au bruit thermique issu des lobes secondaires de

l'antenne qui pointent en direction de la terre. Les concepteurs se forcent souvent de réduire le niveau des lobes secondaires afin de réduire le bruit d'ensemble.

### 1.6 FIGURE DE BRUIT (NF)

La figure de bruit est une quantité qui exprime la qualité de point de vue bruit d'un dispositif tels que : un circuit, un système ou une liaison. Elle est définie selon l'expression suivante :

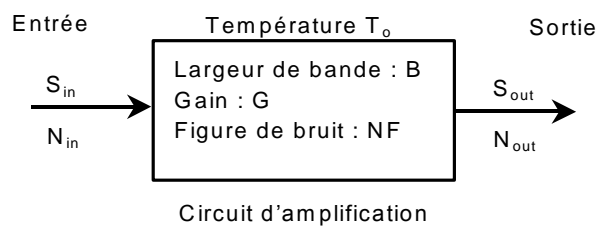
$$NF = \frac{S_{in}/N_{in}}{S_{out}/N_{out}} \tag{9}$$

Avec  $S_{in}/N_{in}$  signifie le rapport signal sur bruit au port d'entrée du dispositif. Il est exprimé comme  $S_{in}/N_{in} = S_{in}/kTB$  avec  $T$  et  $B$  définissent respectivement la température de bruit et la largeur de bande de la liaison.

De même, le rapport signal sur bruit au port de sortie peut être exprimé comme  $S_{out}/N_{out} = GS_{in}/G(kTB + kT_iB)$  avec  $G$  représente le gain du dispositif et  $kT_i$  est le bruit équivalent à l'entrée du dispositif. La figure de bruit peut donc être exprimée par :

$$NF = 1 + \frac{T_i}{T_o} \tag{10}$$

$T_o$  et  $T_i$  dénotent respectivement la température physique du milieu dans lequel se trouve le circuit en question et la température du bruit équivalente à l'entrée.



**Figure 3.** Figure de bruit d'un amplificateur

#### Exemple

Pour  $T_i = 400 K$  et  $T_o = 300 K$ , la figure de bruit  $NF$  est donnée par l'équation 10 comme suit :

$$NF = 10 \log\left(1 + \frac{400}{300}\right) = 3.7 \text{ dB}$$

Pour  $NF = 4 \text{ dB}$  et  $T_0 = 290 \text{ K}$  alors  $T_i$  est égale à :

$$T_i = 290 (10^{\frac{4}{10}} - 1) = 438.4 \text{ K}$$

### 1.7 TEMPÉRATURE DU BRUIT ÉQUIVALENTE À L'ENTRÉE D'UN CIRCUIT

N'ayant aucune relation avec la température mesurée par le thermomètre, le bruit généré depuis l'intérieur d'un circuit est converti en une valeur à son port d'entrée. Nous distinguons trois cas de circuit :

- ◆ circuit d'amplification : sachant sa figure de bruit  $NF$ , la température du bruit équivalente à l'entrée  $T_i$  est donnée par :

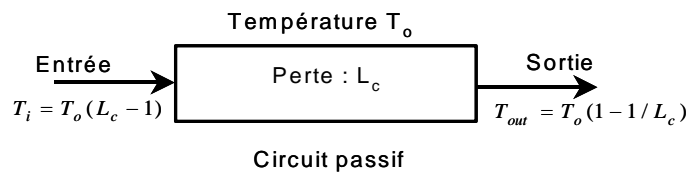
$$T_i = T_o(NF - 1) \tag{11}$$

- ◆ circuit passif : si  $L_c$  désigne les pertes d'un circuit passif, la température du bruit équivalente à l'entrée  $T_i$  est donnée par :

$$T_i = T_o(L_c - 1) \tag{12}$$

En plus, la température de bruit au port de sortie est exprimée comme

$$T_{out} = T_o(1 - 1/L_c) \tag{13}$$



**Figure 4.** Température de bruit équivalente à l'entrée d'un circuit passif

Exemple

Si un circuit passif entraîne une perte de 3 dB et que la température physique est  $T_o = 300 K$ , alors les températures du bruit équivalentes à l'entrée et à la sortie du circuit, selon respectivement les équations 10 et 11, sont égales à :

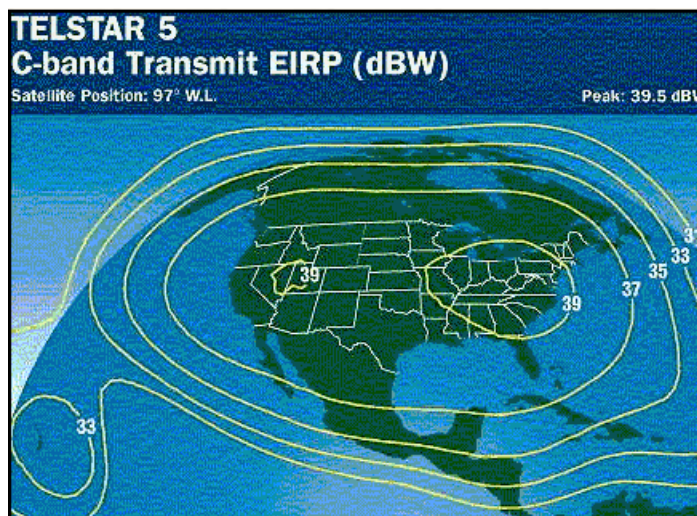
$$T_i = 300 \cdot (10^{\frac{3}{10}} - 1) = 298.6 \quad K$$

$$T_{out} = 300 \cdot (1 - \frac{1}{10^{\frac{3}{10}}}) = 149.6 \quad K$$

**1.8 EIRP**

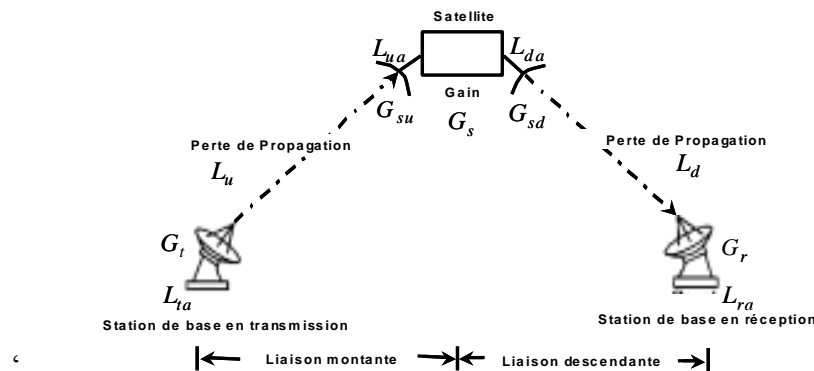
Le produit  $P_t G_t$  de la puissance transmise par le gain de l'antenne de transmission est appelé la puissance équivalente rayonnée isotropiquement et souvent noté **EIRP** (*Equivalent Isotropically Radiated Power*). Il est souvent utilisé comme indice de la capacité de transmission d'une station de base.

$$EIRP = G_t P_t \quad (\text{Watts}) \tag{14}$$



**Figure 5.** Courbes de niveau constant du EIPR typiques

## 2 Bilan de puissance d'un lien par satellite



**Figure 6.** Paramètres d'un lien de communication par satellite

Considérant le lien de communication par satellite dont la configuration est montrée par la figure 6. On se propose de déterminer la puissance d'un signal reçu au niveau de la station de base en réception sachant que le signal est issu de la station de base en transmission. La partie du lien de la station de base de transmission vers le satellite est appelée une liaison montante (*Up-link*) et celle du satellite vers la station de base de réception est appelée une liaison descendante (*Down-link*). Maintenant, on se propose de transmettre une puissance  $P_t$  (en dB) à partir de la station de base de transmission, la puissance  $P_r$  (en dB) reçue au niveau de la station de base de réception est donnée par l'équation suivante :

$$P_r = P_t + G_t - L_{ta} + G_{su} - L_u - L_{ua} + G_s + G_{sd} - L_{da} - L_d + G_r - L_{ra} \quad (15)$$

La description des symboles utilisés ci-dessus est donnée par le tableau 1.

**Tableau 1:** Description des paramètres d'un lien de communication par satellite

$G_t$	gain de l'antenne de la station de base de transmission relative à une antenne isotrope.
$L_{ta}$	perte du guide d'onde d'alimentation ( <i>feeder</i> ), perte d'une désadaptation de la polarisation de l'antenne de la station de base de transmission.
$L_{tu}$	perte de propagation de la liaison montante incluant les pertes dans l'espace libre, l'absorption atmosphérique et l'atténuation par la pluie.
$G_{su}$	gain de l'antenne de réception du satellite.
$L_{sa}$	perte du guide d'onde d'alimentation, perte d'une désadaptation de la polarisation de l'antenne de réception du satellite.
$G_s$	gain d'amplification du transpondeur du satellite.
$G_{sd}$	gain de l'antenne de transmission du satellite.
$L_{da}$	perte du guide d'onde d'alimentation, perte d'une désadaptation de la polarisation de l'antenne de transmission du satellite.
$L_{dt}$	perte de propagation de la liaison descendante incluant les pertes dans l'espace libre, l'absorption atmosphérique et l'atténuation par la pluie.
$G_r$	gain de l'antenne de la station de base de réception.
$L_{ra}$	perte du guide d'onde d'alimentation, perte d'une désadaptation de la polarisation de l'antenne de la station de base de réception.

Tous les paramètres sont exprimés en dB.

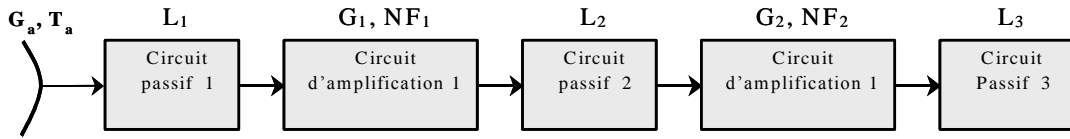
### 3 Éléments de conception d'un récepteur

#### 3.1 TEMPÉRATURE DE BRUIT D'UN RÉCEPTEUR :

En général, un récepteur est formé par une cascade de circuits passifs et de circuits d'amplification comme le montre la figure 7. Un signal est reçu par une antenne ayant un gain  $G_a$  et une température de bruit équivalente à la sortie de l'antenne dénotée par  $T_a$ . Les pertes dans un circuit passif sont dénotées par  $L_n$  avec  $n$  égal à 1, 2 et 3. Le gain et la figure de bruit

d'un circuit d'amplification sont dénotés par  $G_n$  et  $NF_n$ . La température du bruit équivalente au port d'entrée du circuit d'amplification 1 est donnée par l'expression suivante :

$$T_s = \frac{T_a}{L_1} + T_{L1} + T_{G1} + \frac{T_{L2}}{G1} + \frac{T_{G2}L_2}{G1} + \frac{T_{L3}L_2}{G_1G_2} \quad (16)$$



**Figure 7.** Cascade de circuits équivalent d'un récepteur

Où,

$T_{L1}$  est la température du bruit équivalente à la sortie du circuit passif 1.

$$T_{L1} = (1 - 1/L_1)T_o \quad (17)$$

$T_{G1}$  est la température du bruit équivalente à l'entrée du circuit d'amplification 1.

$$T_{G1} = (NF_1 - 1)T_o \quad (18)$$

$T_{L2}$  est la température du bruit équivalente à l'entrée du circuit passif 2.

$$T_{L2} = (L_2 - 1)T_o \quad (19)$$

$T_{G2}$  est la température du bruit équivalente à l'entrée du circuit d'amplification 2.

$$T_{G2} = (NF_2 - 1)T_o \quad (20)$$

$T_{L3}$  est la température du bruit équivalente à l'entrée du circuit passif 3.

$$T_{L3} = (L_3 - 1)T_o \quad (21)$$

Dans l'équation 16, la valeur  $T_{L2}$  peut être convertie à l'entrée du circuit d'amplification 1 comme  $T_{L2}/G_1$ , celle de  $T_{G2}$  comme  $T_{G2}L_2/G_1$  et la valeur de  $T_{L3}$  comme  $T_{L3}L_2/G_1G_2$ .

Si on examine l'équation 16 nous constatons que si le gain  $G_1$  est assez élevé le quatrième terme et ceux d'après dans le côté droit de l'équation peuvent être négligés en terme de bruit. Par conséquence, le bruit du premier circuit d'amplification, appelé amplificateur à faible bruit (LNA : Low Noise Amplifier), et celui du premier circuit passif dominant le bruit total du récepteur comme le montre l'équation 22.

$$T_s = \frac{T_a}{L_1} + T_{L1} + T_{G1} = \frac{T_a}{L_{feed}} + T_o(1 - 1/L_{feed}) + T_{LNA} \quad (22)$$

Où  $L_{feed}$  et  $T_{LNA}$  désignent respectivement les pertes de la ligne de transmission qui relie l'antenne au LNA et la température de bruit équivalente à l'entrée de l'amplificateur faible bruit (LNA). Il faut mentionner que la valeur de  $T_s$  dépend du point de mesure qui est généralement pris à l'entrée du LNA.

### 3.2 FIGURE DE MÉRITE G/T

Le rapport du gain de l'antenne par la température de bruit  $T$  d'un récepteur est souvent utilisé comme indice de performance de la réception au niveau de la station de base. Lorsqu'on calcul cet indice au port d'entrée du récepteur, la valeur du gain  $G_s$  de l'antenne utilisée inclut les pertes dans le guide d'onde d'alimentation et la température de bruit  $T$  est  $T_s$  donnée par l'équation 22.

$$\frac{G_s}{T_s} = \frac{G_a / L_{feed}}{T_s} = \frac{G_a}{T_a + T_o(L_{feed} - 1) + T_{LNA} L_{feed}} \quad (23)$$



## 4 Qualité d'un lien de communication par satellite

### 4.1 BRUITS DANS UN LIEN DE COMMUNICATION PAR SATELLITE

La figure 8 montre les principales sources de bruits dans un lien de communication par satellite.

**Bruit 1** : c'est le bruit faisant partie du signal à transmettre en plus du bruit thermique généré par le modulateur, le mélangeur et l'amplificateur de puissance. Ce bruit est généralement suffisamment petit en comparaison avec la puissance du signal utile et il est négligeable par rapport aux autres sources de bruit.

**Bruit 2** : c'est le bruit thermique issu de la terre et reçu par l'antenne du satellite (généralement à 300K).

**Bruit 3** : bruit thermique généré par le transpondeur du satellite. Il dépend principalement des performances de l'amplificateur à faible bruit du premier étage d'amplification du transpondeur.

**Bruit 4** : bruit reçu par l'antenne de la station de base en plus du signal issu du satellite incluant le bruit du ciel (bruit de fond galactique), le bruit thermique atmosphérique et le bruit thermique terrestre.

**Bruit 5** : bruit thermique généré par le récepteur de la station de base et qui dépend des performances de l'amplificateur à faible bruit du premier étage d'amplification du récepteur.

En plus de ces sources de bruit, un lien de communication par satellites est soumis à des interférences introduites par d'autres systèmes de communication par satellite.

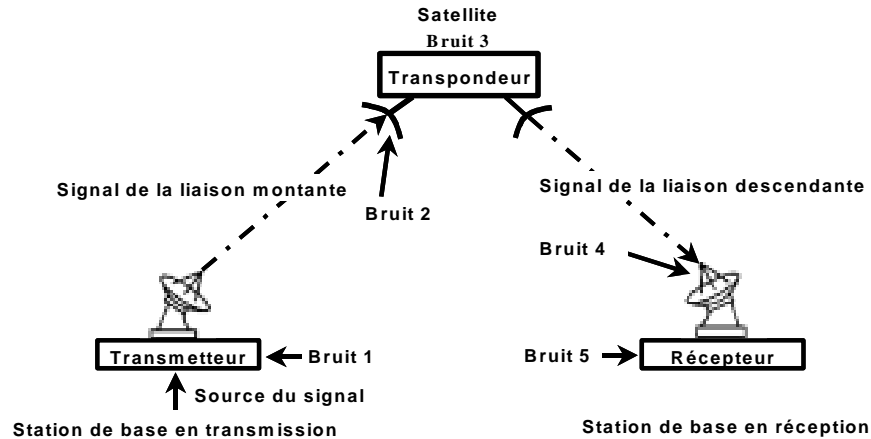


Figure 8. Bruit d’une communication par satellite.

4.2 RAPPORT C/N<sub>0</sub> D’UN LIEN SATELLITE :

En générale, l’étage radiofréquence dans un satellite ou une station de base consiste en un transmetteur et un récepteur composés d’une cascade d’antenne, une ligne de transmission, un duplexeur, un amplificateur de puissance et un amplificateur faible bruit comme le montre la figure 9.

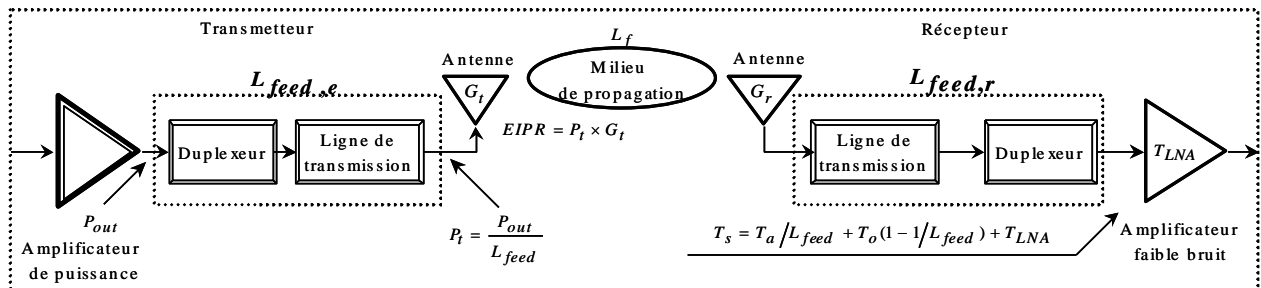


Figure 9. Bloc diagramme simplifié d’une liaison radiofréquence

Dans la figure 9  $G_r$  et  $G_t$  dénotent respectivement les gains des antennes de réception et de transmission de la liaison. Dans le cas d’une liaison montante (figure 10-a),  $G_r$  est égale au gain de l’antenne de réception du satellite  $G_{r,s}$  et  $G_t$  est égale au gain de l’antenne de transmission de la station de base  $G_{t,b}$ . D’autres parts,  $G_r$  et  $G_t$  seront égales respectivement au gain de l’antenne de réception de la station de base  $G_{r,b}$  et au gain de l’antenne de transmission du satellite  $G_{t,s}$ , dans le cas d’une liaison descendante (figure 10-b).

Le rapport de la puissance du signal  $C$  sur la puissance du bruit  $N$ , **au niveau de l'entrée de l'amplificateur faible bruit**, d'une liaison représentée par la figure 9 peut être écrit comme :

$$\begin{aligned} \frac{C}{N} &= \frac{\left( \frac{P_{out}}{L_{feed,e}} G_t \right) G_r / L_{feed,r}}{L_f} = \frac{(P_t G_t) G_r / L_{feed,r}}{L_f} \\ &= \frac{EIRP \cdot G_r / L_{feed,r}}{L_f} = \frac{EIRP}{L_f} \left( \frac{G_r / L_{feed,r}}{T_s} \right) \frac{1}{kB} \end{aligned} \quad (24)$$

Où  $B$  exprime la largeur de bande de fréquence du système en Hz.

Si on considère le rapport  $C/N_o$ , l'équation 24 peut être ré-écrite comme :

$$\begin{aligned} \frac{C}{N_o} &= \frac{\left( \frac{P_{out}}{L_{feed,e}} G_t \right) G_r / L_{feed,r}}{L_f} = \frac{(P_t G_t) G_r / L_{feed,r}}{L_f} \\ &= \frac{EIRP \cdot G_r / L_{feed,r}}{L_f} = \frac{EIRP}{L_f} \left( \frac{G_r / L_{feed,r}}{T_s} \right) \frac{1}{k} \end{aligned} \quad (25)$$

L'équation 25 peut être ré-écrite en décibel sous la forme de

$$\begin{aligned} C / N_o &= P_{out} - L_{feed,e} + G_t - L_f + G_r - L_{feed,r} - T_s - k \\ &= EIRP - L_f + G_r - L_{feed,r} - T_s + 228.6 \text{ dBHz} \end{aligned} \quad (26)$$

Tous les symboles ci-dessus sont exprimés en dB.

Dans l'équation 26, la puissance transmise EIRP est atténuée par la propagation dans l'espace libre  $L_f$  du lien entre le transmetteur et le récepteur. Elle est ensuite amplifiée par le gain de

l'antenne de réception  $G_r$ , et atténuée par les pertes d'alimentation  $L_{feed,r}$  et le bruit du système  $T_s$ .

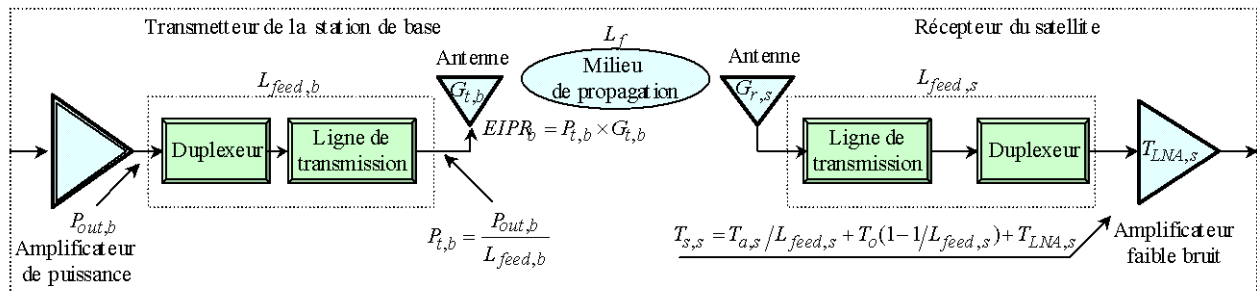
**Exemple**

Un satellite géostationnaire transmet un signal à 1500 MHz à une station mobile sur l'équateur juste en dessous. Les paramètres de la liaison sont les suivants:

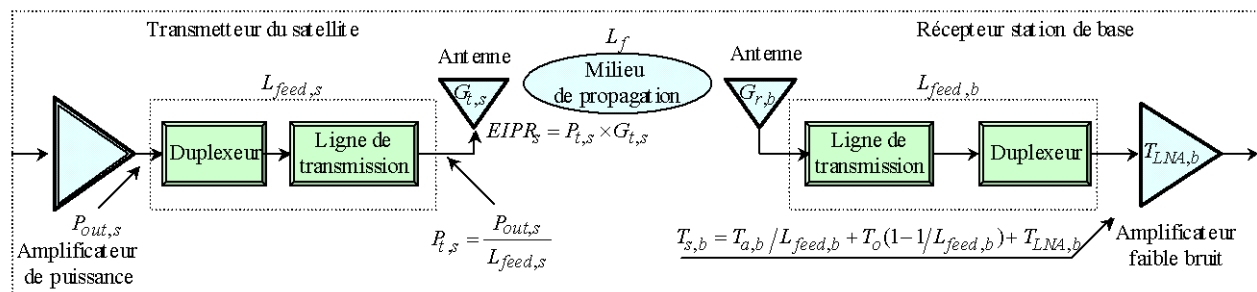
Puissance transmise par le satellite	1 Watt (0 dBW)
Gain de l'antenne du satellite (diamètre 100 cm)	21.7 dBi
Pertes de propagation dans l'espace (d=36000 km)	187.2 dB
Gain de l'antenne de la station (Diamètre 40 cm, $\eta=80\%$ )	15.0 dBi
Température de bruit du système de la station de base	24.8 dBk (300K)
Pertes d'alimentation $L_{feed,r}$	3 dB

Selon l'équation 26, le rapport  $C/N_o$  de cette liaison descendante est égal à :

$$C/N_o = 0 + 21.7 - 187.2 + 15 - 24.8 - 3 + 228.6 = 50.3 \text{ dBHz}$$



a) Liaison montante



b) Liaison descendante

**Figure 10.** Bloc diagramme d'un lien satellite

Les équations 24, 25 et 26 sont les équations de base qui caractérisent la qualité de réception d'un signal, issu d'un transmetteur quelconque vers un récepteur. Dans la suite, nous déduisons les équations qui correspondent respectivement à une liaison satellite montante, où le transmetteur est la station de base et le récepteur est le satellite, et à une liaison descendante, où le transmetteur est le satellite et le récepteur est la station de base.

- Liaison montante (figure 10-a) :

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{N}\right)_U &= \frac{\left(\frac{P_{out,b}}{L_{feed,b}} G_{t,b}\right) G_{r,s} / L_{feed,s}}{kT_{s,s} B} = \frac{(P_{t,b} G_{t,b}) G_{r,s} / L_{feed,s}}{kT_{s,s} B} \\ &= \frac{EIRP_b \cdot G_{r,s} / L_{feed,s}}{kT_{s,s} B} = \frac{EIRP_b}{L_f} \left(\frac{G_{r,s} / L_{feed,s}}{T_{s,s}}\right) \frac{1}{kB} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{N_0}\right)_U &= \frac{\left(\frac{P_{out,b}}{L_{feed,b}} G_{t,b}\right) G_{r,s} / L_{feed,s}}{kT_{s,s}} = \frac{(P_{t,b} G_{t,b}) G_{r,s} / L_{feed,s}}{kT_{s,s}} \\ &= \frac{EIRP_b \cdot G_{r,s} / L_{feed,s}}{kT_{s,s}} = \frac{EIRP_b}{L_f} \left(\frac{G_{r,s} / L_{feed,s}}{T_{s,s}}\right) \frac{1}{k} \end{aligned} \quad (28)$$

Si les paramètres sont exprimés en dB, l'équation 28 aura une forme plus simple dont les opérations se limitent à des additions et soustractions comme le montre l'équation 29.

$$\begin{aligned} (C/N_0)_U &= P_{out,b} - L_{feed,b} + G_{t,b} - L_f + G_{r,s} - L_{feed,s} - T_{s,s} - k \\ &= EIRP_b - L_f + G_{r,s} - T_{s,s} - L_{feed,s} - 228.6 \text{ dBHz} \end{aligned} \quad (29)$$

- Liaison descendante (figure 1-b) :

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{C}{N}\right)_D &= \frac{\left(\frac{P_{out,s}}{L_{feed,s}} G_{t,s}\right) G_{r,b} / L_{feed,b}}{L_f} = \frac{(P_{t,s} G_{t,s}) G_{r,b} / L_{feed,b}}{L_f} \\
 &= \frac{EIRP_s \cdot G_{r,b} / L_{feed,b}}{kT_{s,b} B} = \frac{EIRP_s}{L_f} \left(\frac{G_{r,b} / L_{feed,b}}{T_{s,b}}\right) \frac{1}{kB}
 \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{C}{N_0}\right)_D &= \frac{\left(\frac{P_{out,s}}{L_{feed,s}} G_{t,s}\right) G_{r,b} / L_{feed,b}}{L_f} = \frac{(P_{t,s} G_{t,s}) G_{r,b} / L_{feed,b}}{L_f} \\
 &= \frac{EIRP_s \cdot G_{r,b} / L_{feed,b}}{kT_{s,b}} = \frac{EIRP_s}{L_f} \left(\frac{G_{r,b} / L_{feed,b}}{T_{s,b}}\right) \frac{1}{k}
 \end{aligned} \tag{31}$$

Pareillement à l'équation 28, l'expression en dB des paramètres de l'équation 31, permettra de simplifier cette dernière selon l'équation 32.

$$\begin{aligned}
 (C/N_0)_D &= P_{out,s} - L_{feed,s} + G_{t,s} - L_f + G_{r,b} - L_{feed,b} - T_{s,b} - k \\
 &= EIRP_s - L_f + G_{r,b} - L_{feed,b} - T_{s,b} + 228.6 \text{ dBHz}
 \end{aligned} \tag{32}$$

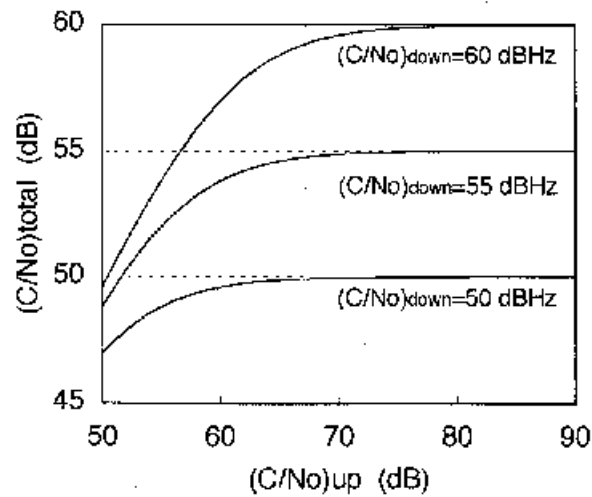
Jusqu'à maintenant nous n'avons considéré que la qualité de la liaison descendante et de la liaison montante séparément. Pour calculer le rapport  $C/N_0$  total, en plus de combiner les bruits thermiques de la liaison montante et de la liaison descendante, nous ajoutons le bruit d'interférences généré par les autres systèmes. Le rapport  $C/N_0$  total est donné par l'équation suivante :

$$(C/N_0)_T = \frac{C}{(N_0)_U + (N_0)_D + I_0} = \left[ \frac{1}{(C/N_0)_U} + \frac{1}{(C/N_0)_D} + \frac{1}{(C/I_0)} \right]^{-1} \tag{33}$$

Comme le rapport  $C/N_0$  total d'une liaison est déterminé en séparant la liaison en deux, liaison montante et liaison descendante, on calcule le rapport  $C/N_0$  de chacune et enfin on les combine.

Ici les indices T, U et D indiquent respectivement liaison totale, liaison montante et liaison descendante.  $I_o$  est la densité de puissance du bruit d'interférences.

Selon l'équation 27, si la valeur du rapport  $C/N_o$  d'une des liaisons est suffisamment faible comparée aux autres valeurs, par exemple  $(C/N_o)_D \ll (C/N_o)_U$  et  $(C/N_o)_D \ll (C/I_o)$ , la qualité totale,  $(C/N_o)_T$ , peut être approximée par  $(C/N_o)_D$ . Ceci signifie que la qualité totale du canal de communication est dominée par la liaison la plus mauvaise. La figure 11 montre un exemple de calcul du rapport  $(C/N_o)_T$  dépendamment du rapport  $(C/N_o)_U$ . On constate bien que le rapport  $(C/N_o)_T$  est dominé par la mauvaise liaison descendante et qu'il ne dépasse jamais cette valeur peu importe la valeur du rapport  $(C/N_o)_U$ .



**Figure 11.** Courbe de variation du rapport  $(C/N_o)_T$  vs  $(C/N_o)_U$  et  $(C/N_o)_D$

### Exemple

Considérons le cas d'une expérience d'une communication par satellite aéronautique utilisant le satellite ETS-V. Le rapport  $C/N_o$  de la liaison directe à partir de la station de base GES à Kashima à une station terrestre d'avion AES à Anchrage via le satellite peut être calculé selon l'équation 27. On ne considère pas ici le bruit d'interférence. Les fréquences 6 GHz et 1.5 GHz

sont utilisées pour la communication respectivement entre la station de base et le satellite et entre le satellite et l'avion.

Les paramètres de la liaison GES au satellite ( liaison montante) sont :

EIRP <sub>b</sub> du GES	60.7 dB
Pertes de propagation ( 6 GHz, d=37270 km)	199.4 dB
Gain de l'antenne du satellite	21.7 dBi
Pertes de l'alimentation $L_{feed,s}$	3.0 dB
Température de bruit équivalente à l'entrée de l'amplificateur faible bruit du satellite	300 K

$$\text{Ainsi } C = EIRP_b - L_f + G_{r,s} - L_{feed,s} = 60.7 - 199.4 + 21.7 - 3 = -120.0 \text{ dB}$$

$$\text{Et } N_o = 10 \log(k) + 10 \log(T_{s,s}) = -228.6 + 10 \log(300) = -203.8 \text{ dB / Hz}$$

$$(C / N_o)_v = -120.0 + 203.8 = 83.8 \text{ dBHz}$$

Les paramètres de la liaison du satellite au AES ( liaison descendante) sont :

EIRP du satellite	30.5 dB
Pertes de propagation ( 1.5 GHz, d=41.097 km)	199.4 dB
Gain de l'antenne du AESS	14.0 dBi
Pertes de l'alimentation $L_{feed,b}$	3.0 dB
Température de bruit équivalente à l'entrée de l'amplificateur faible bruit de la station de base	300 K



$$\text{Ainsi } C = EIRP_b - L_f + G_{r,b} - L_{fed,b} = 30.5 - 188.5 + 14.0 - 3 = -148.0 \text{ dB}$$

$$\text{Et } N_o = 10 \log(k) + 10 \log(T_{s,b}) = -228.6 + 10 \log(300) = -203.8 \text{ dB / Hz}$$

$$(C/N_o)_D = -148.0 + 203.8 = 55.8 \text{ dBHz}$$

Par conséquent, le rapport  $(C/N_o)_T$  est égal à :

$$(C/N_o)_T = \left[ \frac{1}{(C/N_o)_U} + \frac{1}{(C/N_o)_D} \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{10^{\frac{83.8}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{55.8}{10}}} \right]^{-1} = 379587.790 = 55.7 \text{ dBHz}$$

Nous vérifions bien que le rapport  $(C/N_o)_T$  est dominé par la mauvaise liaison, à savoir la liaison descendante dans cet exemple.

### 4.3 FACTEURS DE PERTURBATION DE LA QUALITÉ D'UN LIEN SATELLITE

Quand le signal est transmis, une limite est fixée dépendamment de la qualité du signal démodulé et une déconnexion est considérée si la qualité du signal tombe au-dessous de cette limite. Le rapport  $C/N_o$  idéal qui correspond à cette limite de qualité de réception peut être utilisé en conjonction avec la quantité de dégradation fixe de la liaison et la dégradation due aux interférences pour déterminer le rapport  $C/N_o$  requis tel que :

$$[C/N_o]_R = [C/N_o]_S + [D_F] + [D_I] - [I_G] \quad (34)$$

avec

$[C/N_o]_R$  : est le rapport  $C/N_o$  requis.

$[C/N_o]_S$  : est le rapport  $C/N_o$  calculé théoriquement pour garantir une qualité de communication bien déterminée.

$[D_F]$  : dégradation fixe de la liaison.

$[D_I]$  : dégradation due aux interférences

$[I_G]$  : effets d'amélioration de la qualité de la communication par codage.

Ces symboles sont expliqués dans ce qui suit.

#### 4.3.1 Rapport $[C/N_o]_s$ :

Le rapport signal sur bruit  $C/N_o$  qu'on a étudié dans les sections précédentes est utilisé pour la mesure de la qualité de la partie analogique d'un lien de communication. Cependant, dans le cas d'un lien de communication numérique, on introduit une nouvelle notion : le taux d'erreur binaire (TEB); BER (Bite Error Rate). Le BER est défini comme le nombre de bits erronés sur le nombre total de bits reçus. Le rapport BER est fonction de la quantité  $E_b/N_o$  avec  $E_b$  est l'énergie par bit et  $N_o$  est la densité de bruit du signal. La relation entre le BER et  $E_b/N_o$  dépend de la modulation utilisée qui doit être choisie de manière attentive en fonction du type du canal de transmission.

Prenons par exemple le cas d'un signal QPSK (Quaternary Phase Shift Keying ou modulation à déplacement de phase à 4 états) transmis dans canal AWGN (Bruit Blanc Gaussien Additif, Additive White Gaussian Noise), alors le BER s'écrit :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{E_b/N_o}) \quad (35)$$

$\operatorname{erfc}$  (Complimentary error function) est une fonction mathématique disponible sous forme de tableau dans la plupart des livres de communications.

Il existe une relation entre le signal à bruit  $\frac{C}{N_o}$  spécifique à la portion analogique (passe bande)

du lien et le rapport  $\frac{E_b}{N_o}$  de la portion numérique (bande de base) :

$$\frac{C}{N_o} = \frac{E_b}{N_o} \times R_b \quad (36)$$

Avec  $R_b$  est le taux de transmission en bit/sec.

#### **4.3.2 Facteurs de dégradation fixe**

Dans les systèmes de communication numérique, on considère les limitations de la largeur de la bande, la non-linéarité du chemin de transmission et les imperfections des modulateurs et des démodulateurs comme étant des sources de dégradation de la qualité du signal.

La modulation d'une porteuse par un train d'impulsion représentant l'information à transmettre amène à un signal de largeur de bande infinie. Or, les supports de communication ont souvent une largeur de bande de fréquence finie. Dans la pratique on distingue plusieurs types de filtrage. Ainsi, le filtrage, la distorsion de l'amplitude et de la phase due aux caractéristiques amplitude/phase en fonction de la fréquence du lien et la conversion AM/PM génèrent une interférence inter-symboles et un bruit de phase qui entraînent une dégradation de la qualité de la liaison.

La dégradation du signal due à la fluctuation du niveau de détection et au « jitter » dans le circuit de génération de la porteuse et le circuit de recouvrement de l'horloge est associée aux imperfections des modulateurs et démodulateurs alors que celle due à la conversion AM/PM est associée à la non-linéarité du chemin de communication. La contribution de ces différentes sources implique une dégradation du rapport  $C/N_0$  d'environ 2.5 à 3.5 dB

#### **4.3.3 Facteurs de dégradation reliés aux interférences**

On distingue plusieurs composantes qui contribuent aux interférences telles que les interférences issues des autres systèmes de communications par satellites, les interférences entre canaux adjacents au niveau de la liaison montante et les interférences provoquées par les systèmes terrestres et les autres canaux de liaison descendante. La quantité de dégradation produite par la somme totale de ces termes d'interférences dans un beau temps est de l'ordre de 0.5 à 2 dB. Par ailleurs, dans les systèmes de communication qui opèrent dans une bande de fréquences affectées par la pluie, le rapport  $C/N_0$  des liaisons montante et descendante peut être détérioré

significativement à cause de l'atténuation entraînée par la pluie et le rapport  $C/N_0$  pour lequel l'interférence affecte la qualité de la communication devient petit.

#### **4.3.4 Facteurs d'amélioration de la qualité**

Un système de communication numérique comporte un étage de codage de correction d'erreur afin d'améliorer le taux d'erreur de bit ( $BER$ ). Nous citons à titre d'exemple la combinaison du « *codage convolutionnel* » et du « *décodage de Viterbie* » présente une bonne habilité de correction d'erreur.

La technique d'amélioration de la qualité de la communication varie selon le contexte tels que la modulation utilisée, le type d'information à envoyer (audio, vidéo, données numériques).