

Chapitre 5 : Chapitre 5. Performances des différentes modulations en présence du bruit

5.1. Introduction

En électronique, le bruit est un signal parasite caractéristique l'amplitude et la fréquence fluctuent aléatoirement et qu'on retrouve dans l'ensemble des circuits électroniques.

Le signal qui contient les informations que nous cherchons à transmettre est détérioré par des parasites, parfois d'origine externe au système de transmission (exemple bruit galactique dans une réception spatiale, ou parasites d'origine industriels) ou internes au système de transmission.

5.2. Types de bruit

5.2.1. Le bruit thermique

Le bruit thermique est le résultat de l'agitation des électrons des conducteurs (résistances) sous l'action de la température. Il croît avec la température.

La densité de puissance de ce bruit s'exprime en Watt par Hertz, et est constante avec la fréquence : ce bruit est "blanc". Ceci est parfaitement vrai pour les domaines de fréquences habituellement utilisés en transmission.

On modélise le bruit thermique par la valeur quadratique moyenne de la tension V_{BT} de bruit thermique qui apparaît aux bornes d'une résistance, mesurée dans la bande de fréquences Δf , telle que fournie par la relation de Nyquist :

$$E\{V_{BT}^2\} = 4 k_B T R \Delta f [V^2]$$

La puissance du bruit est donnée par :

$$P = k_B T \Delta f \quad (\text{W/Hz})$$

Exemple :

Largeur du canal Bluetooth est de 1 MHz, alors la puissance du bruit en dBm vaut :

$$P_{dBm} = 10 \text{Log} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right), \text{ avec : } P = k_B T \Delta f \cong 4 \times 10^{-15} \text{ W} \quad \text{et } P_{ref} = 1 \text{ mW}$$

Donc : $P_{dBm} \cong -114 \text{ dBm}$ dans une bande 1 MHz.

La densité spectrale du bruit thermique est constante jusqu'à 1THz environ et ne dépend que de R et T.

----- Rappel -----

La densité spectrale de puissance d'un signal est la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation. La densité spectrale de puissance représente la répartition de la puissance sur l'axe des fréquences.

L'autocorrélation permet de détecter des régularités, des profils répétés dans un signal comme un signal périodique perturbé par beaucoup de bruit.

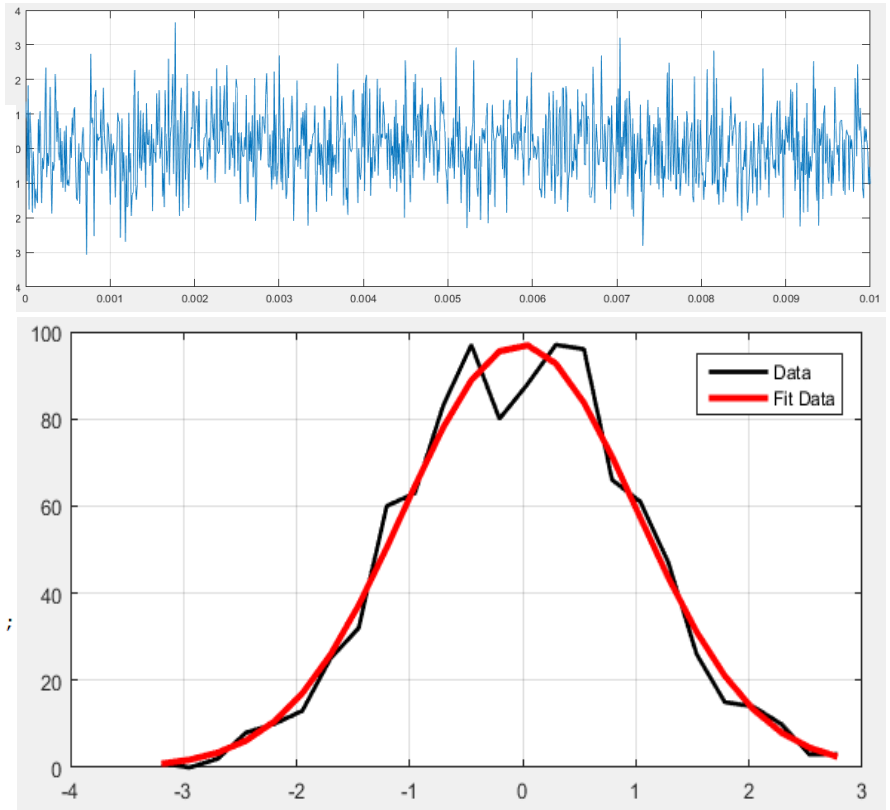
Le bruit thermique a une distribution normale (Gaussienne) dans le domaine temporel avec une moyenne nulle.

La densité de probabilité de la loi normale d'espérance μ , et d'écart type σ est donnée par :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}$$

Bruit blanc et sa distribution en Matlab :

```
clear; clc;
N=1000; ti=0; tf=10e-3;
t=linspace(ti,tf,N);
bruit=wgn(N,1,0);
maxb=max(bruit);
minb=min(bruit);
Nbin=N/40;
xbin=linspace(minb,maxb,Nbin);
plot(t,bruit);grid on;hold on;
h=hist(bruit,xbin);
% xh=1:length(h);
fit_bruit=fit(xbin,'h','gauss1');
A=fit_bruit.a1; B=fit_bruit.b1;
C=fit_bruit.c1;
y_fit_bruit=A*exp(-(xbin-B)/C).^2);
figure;
plot(xbin,h,'k-','LineWidth',2);hold on;
plot(xbin,y_fit_bruit,'r-','LineWidth',3);
grid on;
```



5.2.2. Le bruit de grenaille (shot noise)

En électronique, les principales sources de bruit de grenaille sont les jonctions PN et Schottky qu'on trouve dans les diodes, les transistors bipolaires et au niveau des grilles des transistors JFET.

Ce bruit est dû à la fluctuation du courant lors de la traversée d'une barrière de potentiel par les électrons.

$$E\{I_{Gr}^2\} = 2qI\Delta f \text{ [A}^2\text{]}$$

5.2.3. Bruit en créneaux

Le bruit en créneaux (*burst noise* ou *bruit popcorn*). Il a été découvert lors du développement de l'un des premiers amplificateurs opérationnels : le 709. Il s'agit essentiellement de créneaux de tension (ou de courant) dont l'amplitude s'étend de moins d'un microvolt à plusieurs centaines de microvolts. L'intervalle entre les créneaux est de l'ordre de la milliseconde.

Des études approfondies ont relié l'origine de ce bruit à des phénomènes de génération-recombinaison sur des défauts à la surface du cristal semiconducteur.

La plus grande partie du spectre de ce bruit se situe dans le domaine des fréquences audibles (de quelques centaines de Hz à quelques dizaines de kHz). La densité spectrale de puissance est de la forme suivante :

$$D_b = K \frac{f^\gamma}{1 + (f/f_c)^2}$$

Le coefficient γ est compris entre 0,5 et 2 la fréquence de coupure f_c et la constante K sont des caractéristiques du composant.

5.2.4. Bruit de scintillation ou Bruit flicker (Bruit en 1/f)

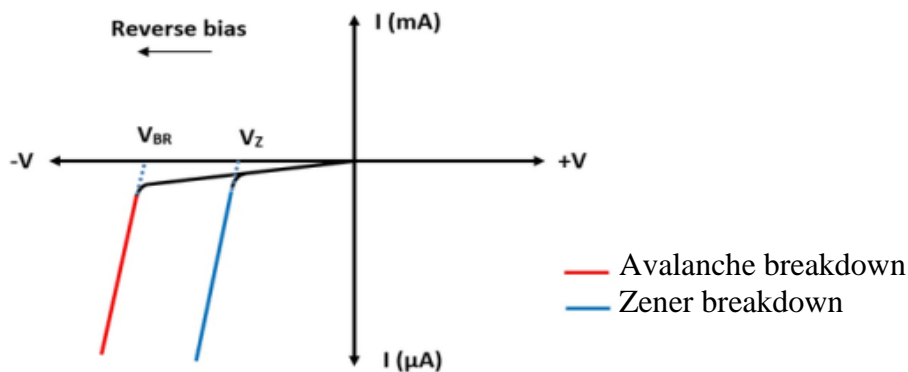
Il est toujours présent dans les composants actifs et dans certains composants passifs. La densité spectrale est de la forme :

$$D_{1/f} = K_1 \frac{I^\alpha}{f^\beta}$$

$0.5 < \alpha < 2$, $0.8 < \beta < 1.3$ et K_1 est une caractéristique du composant.

5.2.5. Bruit d'avalanche

Le bruit d'avalanche a lieu dans les semi-conducteurs : le champ électrique accélère certains électrons au point de déloger d'autres électrons de valence et de créer des porteurs de charge supplémentaires. Ce bruit devient important pour les champs électriques élevés, au voisinage de l'effet d'avalanche.



5.3. Le bruit additif blanc gaussien (AGWN) et le rapport signal sur bruit

5.3.1. AGWN

C'est un modèle élémentaire de bruit utilisé en théorie de l'information pour imiter de nombreux processus aléatoires qui se produisent dans la nature. Les adjectifs indiquent qu'il est :

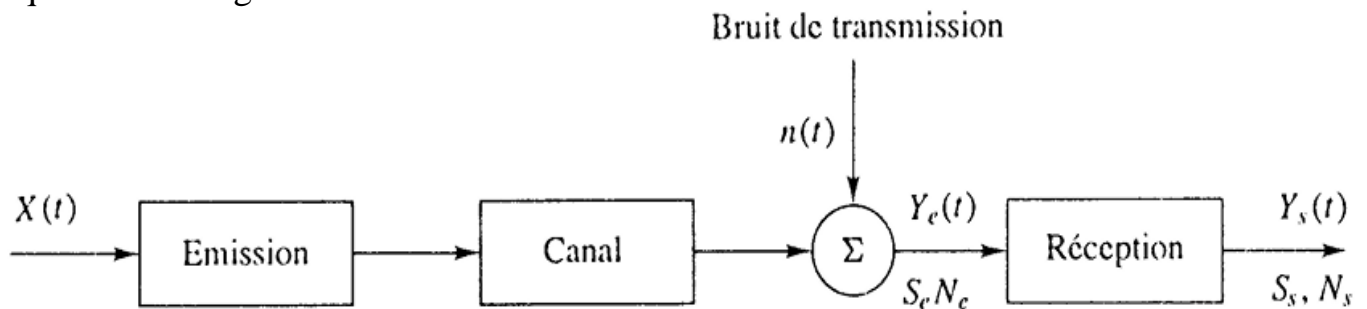
Additif : il s'ajoute au bruit intrinsèque du système d'information ;

blanc : sa puissance est uniforme sur toute la largeur de bande de fréquences du système, par opposition avec un bruit *coloré* qui privilégie une bande de fréquences par analogie avec une lumière colorée dans le spectre visible ;

gaussien : il a une distribution normale dans le domaine temporel avec une moyenne nulle.

5.3.2. Rapport signal sur bruit

Dans une liaison typique en télécommunication, le récepteur est alimenté par un signal auquel est mélangé un bruit.



Puisque le récepteur est linéaire, son signal de sortie a pour expression:

$$Y_s(t) = X_s(t) + n_s(t)$$

On fait deux hypothèses complémentaires relatives au bruit additif :

- Le bruit est gaussien, à valeur moyenne nulle, de densité spectrale $S_{nn}(\omega) = \eta/2$.
- Le bruit n'est pas corrélé avec le processus $X(t)$.

En tenant compte de ces hypothèses, on peut écrire que :

$$E[Y_s^2(t)] = E[X_s^2(t)] + E[n_s^2(t)] = S_s + N_s$$

On définit un *rapport signal sur bruit* en sortie du récepteur comme suit :

$$\left(\frac{S}{N}\right)_s = \frac{S_s}{N_s} = \frac{E[X_s^2(t)]}{E[n_s^2(t)]}$$

5.4. Rapport Signal à Bruit sur les liaisons en bande de base

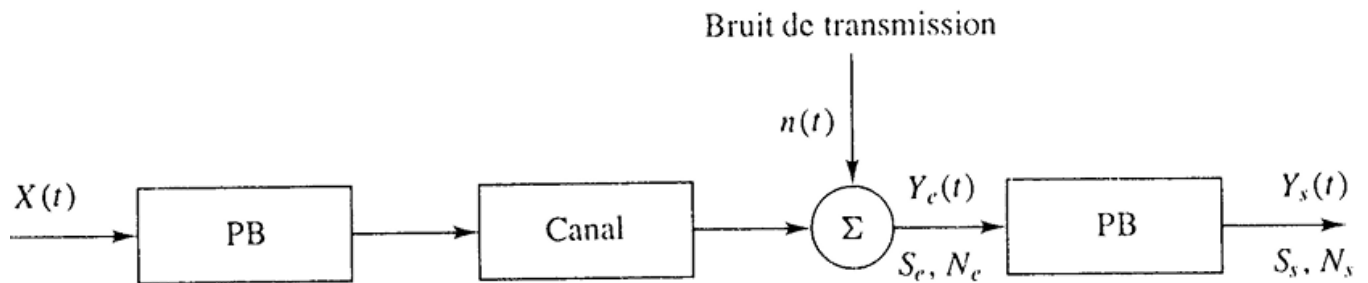
Le terme « **bande de base** » signifie que le signal est transmis sur le canal sans modulation qui translate (éventuellement en le modifiant) le spectre du signal pour le centrer sur une fréquence porteuse f_p .

Le récepteur est un filtre passe-bas de bande passante B qui assure le transit du message en réduisant à son minimum le bruit qui l'accompagne.

On suppose que le signal utile $X(t)$ est un processus aléatoire ergodique à valeur moyenne nulle, de largeur de bande limitée à W et de densité spectrale de puissance $S_{XX}(\omega)$.

----- Rappel : Processus aléatoire ergodique -----

Un processus ergodique est un processus stochastique pour lequel les statistiques peuvent être approchées par l'étude d'une seule réalisation suffisamment longue.



On suppose qu'aucune distorsion n'est introduite par le canal de transmission dans la bande utile, ce qui permet d'écrire : $X_s(t) = X(t - t_r)$ où t_r est le temps de retard introduit par la transmission. La puissance moyenne S_s du signal de sortie a pour expression :

$$\begin{aligned} S_s &= E[X_s^2(t)] = E[X^2(t - t_r)] \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-W}^W S_{XX}(\omega) d\omega = S_X = S_e \end{aligned}$$

où S_X est la puissance moyenne du signal et S_e la puissance du signal à l'entrée du récepteur.

La puissance moyenne de bruit a pour expression :

$$N_s = E[n_s^2(t)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-W}^W S_{nn}(\omega) d\omega$$

Dans le cas d'un bruit additif, $S_{nn}(\omega) = \eta/2$ et dans ce cas :

$$N_s = \frac{1}{2\pi} \int_{-W}^W \frac{\eta}{2} d\omega = \eta \frac{W}{2\pi} = \eta B$$

Si l'on fait l'hypothèse que le bruit est blanc, le calcul se simplifie et donne un résultat classique : le rapport signal sur bruit en sortie du récepteur a pour expression :

$$\left(\frac{S}{N} \right)_s = \frac{S_s}{N_s} = \frac{S_e}{\eta B}$$

Le rapport signal sur bruit est directement proportionnel à S_e .