



Introduction aux télécommunications

Séquence 1

Département Sciences du Numérique
2020-2021

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Définitions à connaître	3
1.2	Chaîne de communication numérique avec modulateurs bande de base : Généralités	3
1.2.1	Schéma globale (Étapes résumées)	3
1.2.2	Paramètres pris en compte	3
1.2.3	Avantages	3
1.2.4	Inconvénient	4
1.3	Éléments de la chaîne de transmission	4
1.3.1	Schéma globale	4
1.3.2	Émetteur	4
1.3.3	Récepteur	5
2	Construction d'un modulateur numérique en bande de base	6
2.1	Quelques exemples de signaux	6
2.1.1	Codage élémentaire à symboles indépendants	6
2.1.2	Codage bloc à symboles indépendants	7
2.2	Exemple de génération d'un signal	7
2.3	Modélisation générale	9
3	Notion d'efficacité spectrale	10
3.1	Densité spectrale de puissance d'un signal de télécom	10
3.2	Exemples de calcul de la DSP	10
3.2.1	<i>NRZ</i> à deux niveaux (formule d'onde du GPS)	10
3.2.2	Généralement	11
3.2.3	Cas particulier important : Mise en forme en racine de cosinus surélevé	11
3.3	Bande occupée par le signal généré	12
3.3.1	Définition 1 : bande de fréquence B concentrant $\%x$ de l'énergie du signal (valeurs typiques : 95 à 99%)	12
3.3.2	Définition 2 : bande de fréquence B au delà de laquelle l'atténuation minimale est de xdB (valeurs typiques : 20 à 30 dB)	12
3.3.3	Expression de B	12
3.4	Critères de performance	13

Table des figures

1	Chaîne de transmission	3
2	Vue d'ensemble	4
3	Synchronisation sur la fréquence porteuse, ou en fréquence	5
4	Codage par niveau : <i>NRZ</i> unipolaire	6
5	Codage par niveau : <i>NRZ</i> polaire	6
6	Codage par transition : Biphase	6
7	Codage par niveau : <i>NRZ</i> à 4 niveaux	7
8	Translations de $h(t)$	7
9	Translations de $h(t)$ avec pondérations	8
10	Codage par niveau : <i>NRZ</i> polaire	8
11	Codage par transition : Biphase	8
12	Codage par niveau : <i>NRZ</i> à 4 niveaux	8
13	Modulateur bande de base	9

1 Introduction

1.1 Définitions à connaître

- **Communication** : Action de mettre en relation, en liaison, en contact, des choses.
- **Télécommunication** : transmission, émission ou réception d'informations par fil, radio-électricité, optique, ou d'autres systèmes électromagnétiques.
- **Communications analogiques et/ou numériques** : communication qui dépend de la nature de l'information. Cette dernière peut être soit *numérique (discrète)* ou *analogique (continue)*. Cette communication peut aussi balancer entre les deux, on parle alors de moyens tels le *CAN* ou *CNA* (respectivement *convertisseur analogique numérique* et *convertisseur numérique analogique*).

1.2 Chaîne de communication numérique avec modulateurs bande de base : Généralités

1.2.1 Schéma globale (Étapes résumées)

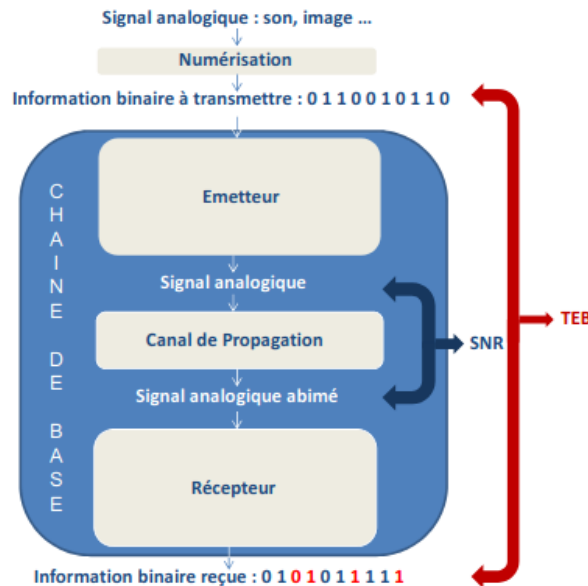


FIGURE 1 – Chaîne de transmission

1.2.2 Paramètres pris en compte

- **Débit binaire** : noté R_b , c'est le nombre de bits transmis par seconde (bps, Kbps, Mbps, Gbps...).
- **Taux d'erreur binaire** : noté TEB , c'est le nombre de bits reçus erronés divisé par le nombre de bits initialement transmis.

1.2.3 Avantages

- **Qualité de transmission améliorée** : taux d'erreur (qui est fonction de SNR) pouvant être très bas.
- **Possible utilisation de nouvelles fonctionnalités** : tel le *codage canal* (Voir 1.3.2).

1.2.4 Inconvénient

Prix à payer : la bande occupée augmente lorsqu'on numérise les signaux. D'où l'utilité du *codage source* (Voir 1.3.2).

1.3 Éléments de la chaîne de transmission

La présente partie est consacrée à la description des éléments de la chaîne du point de vue de la **couche physique**¹.

1.3.1 Schéma globale

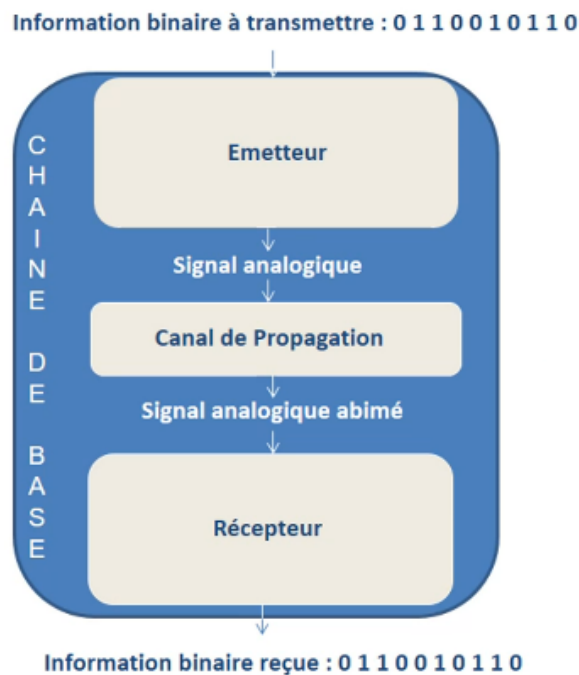


FIGURE 2 – Vue d'ensemble

1.3.2 Émetteur

Il doit prendre un signal binaire et le transformer en signal analogique susceptible de se propager sur le canal de propagation.

Parmi les éléments qu'on trouve dans l'émetteur :

- **Codage source :** ne fait pas partie de la couche physique, mais joue un rôle important dans les télécommunications. Il permet en effet de réduire l'occupation spectrale du signal à transmettre.
- **Codage canal :** fait partie de la couche physique. Son principe est d'introduire de la redondance² pour augmenter la robustesse de la chaîne de transmission au bruit introduit

1. Dans un réseau de communication, c'est elle qui est chargée de générer un signal à partir d'une information numérique à transmettre qui va être susceptible de se propager sur le canal de propagation, et ensuite de récupérer un signal abîmé et de reconstruire l'information binaire de départ à partir de ce signal abîmé.

2. Si on veut par exemple transmettre l'information binaire 0 1 1 0, on va introduire une redondance au niveau de chaque bite; autrement dit, on va transmettre une information de la sorte 000 111 111 000, à titre informatif. Elles seront récupérées par le récepteur avec des erreurs (bits différents).

par le canal de propagation, sans augmenter la puissance de transmission. Une partie de la bande de fréquence allouée à la transmission est alors utilisée pour transporter la redondance introduite et non pas de l'information utile. **Le TEB est alors réduit.** Donc, le codage canal n'est pas utilisé pour réduire la bande de fréquence du signal et ne va pas permettre d'augmenter l'efficacité spectrale.

- **Modulateur** : transforme l'information binaire en un signal.

1.3.3 Récepteur

Il reçoit un signal corrompu par le canal et doit récupérer l'information binaire contenue dans ce signal.

Parmi les éléments qu'on trouve dans le récepteur :

- **Démodulateur** : transforme le signal en une information binaire.
- **Synchronisation fréquentielle** : effectuée sur la *fréquence porteuse*¹, elle est nécessaire en transmission analogique. À un moment donné, il faut revenir à basse fréquence, ce qu'on appelle **retour en bande de base** (spectre autour de la valeur 0). Pour le parcours dans l'autre sens, c'est-à-dire pour transmettre sur porteuse, on utilise des cosinus et des sinus *porteurs*. Cependant, revenir correctement en basse fréquence nécessitera alors l'utilisation des mêmes cosinus et sinus porteurs². Le schéma suivant résume le processus :

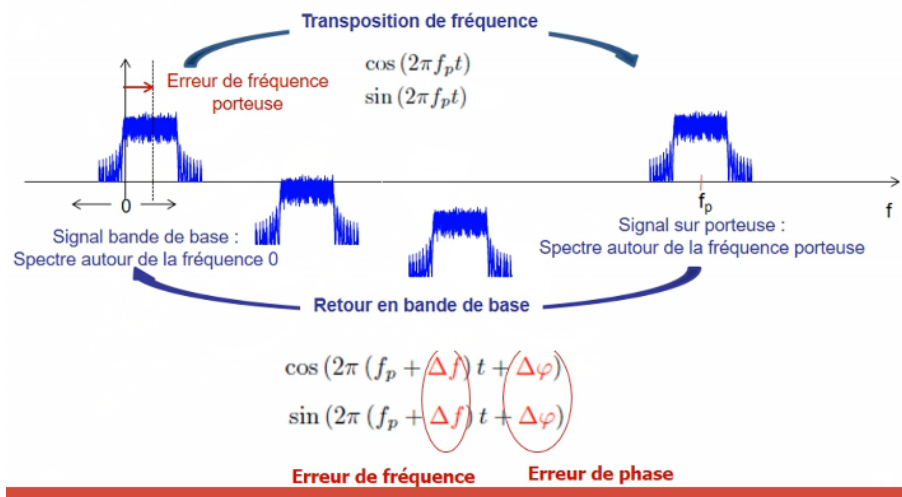


FIGURE 3 – Synchronisation sur la fréquence porteuse, ou en fréquence

- **Synchronisation temporelle** : pour décoder correctement au niveau du récepteur, il faut commencer au bon moment, et connaître la durée T_s du symbole physique qui a été associé à un élément binaire. Dans l'exemple du schéma suivant, les 0 sont codés par des niveaux bas, les 1 par des niveaux hauts. À gauche, on ne commence pas à décoder au bon moment, ce qui est une *erreur de phase sur l'horloge*, donc dans certaines périodes T_s , on voit un front au lieu d'un niveau.
- **Décodage canal** : effectué à partir de l'information erronée, elle permet de décoder celle-ci pour obtenir *le plus proche possible*³ l'information binaire initiale.

1. C'est la transmission sur fréquence porteuse.

2. Avec les mêmes fréquences et mêmes phases, ce qui est difficile à réaliser puisqu'on a des oscillateurs qui génèrent les cosinus au niveau de l'émetteur et du récepteur, qui sont à distance l'un de l'autre. On va donc commettre certaines erreurs (de fréquence et de phase) sur la porteuse, qui vont introduire des atténuations et distortions sur le signal.

3. Toujours suivant l'exemple de l'information initiale 0 1 1 0 codée en 000 111 111 000, on suppose qu'on reçoit

2 Construction d'un modulateur numérique en bande de base

Comment générer, à partir d'une information binaire qui n'a pas de réalité physique (suite binaire à transmettre), un signal capable de se propager entre l'émetteur et le récepteur ?

2.1 Quelques exemples de signaux

Voici des signaux générés à partir de la même information binaire de départ.

Principe : Un bit (ou un groupe de bits) va être remplacé à chaque fois par un élément physique.

2.1.1 Codage élémentaire à symboles indépendants

Pour le premier signal, chaque **1** à transmettre est remplacé par un niveau haut pendant T_s , et chaque **0** va être remplacé par un niveau 0 de même durée T_s .

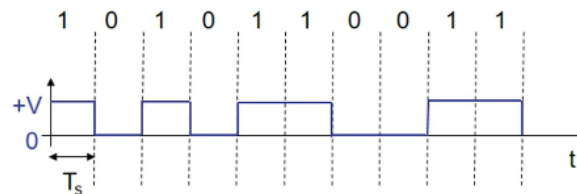


FIGURE 4 – Codage par niveau : *NRZ* unipolaire

Dans le second signal, chaque **1** est remplacé par un niveau haut, et **0** par un niveau bas pendant T_s .

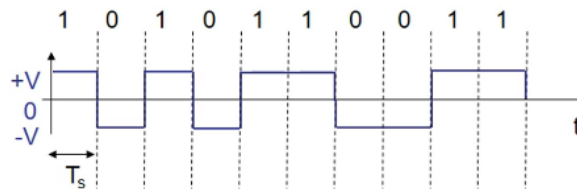


FIGURE 5 – Codage par niveau : *NRZ* polaire

Dans le troisième signal, chaque **0** est remplacé par un front montant, et chaque **1** va être remplacé par un front descendant. Là aussi, ils ont la même durée T_s .

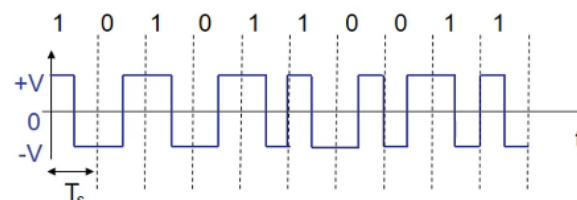


FIGURE 6 – Codage par transition : Biphase

l'information abîmée 001 100 111 111. Le décodage se fait alors avec un minimum de distance entre les groupes de 3 bits et les valeurs possibles dans le dictionnaire (ici 000 et 111). Ainsi, 001 et plus proche de 000, 100 de 000.

2.1.2 Codage bloc à symboles indépendants

Dans le dernier signal, ce sont des groupes de deux bits qui vont être remplacés par un niveau donné, donc il va y avoir **1 0** qui sera remplacé par un niveau $3V$ pendant T_s , **1 1** par un niveau V pendant T_s , et ainsi de suite. Comme l'élément physique code ici un groupe de bits, on peut noter que sa durée est la double de la précédente, puisqu'il y a deux bits qui sont codés pour chacun des éléments physiques.

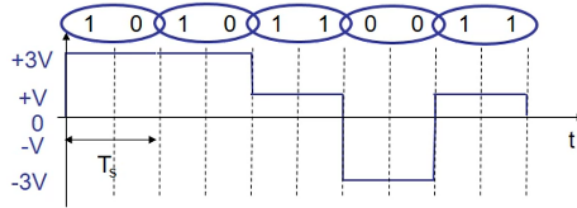
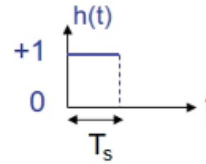


FIGURE 7 – Codage par niveau : NRZ à 4 niveaux

2.2 Exemple de génération d'un signal

Étudions le cas du *Codage par niveau : NRZ unipolaire*.

La première étape consiste à choisir un élément physique pour coder les bits. Ce dernier est appelé "*Forme d'onde*", il sera noté $h(t)$ par la suite. Il sera alors considéré comme un niveau de durée T_s .



On va prendre alors $h(t)$ et le translater tous les T_s pour coder tous les bits :

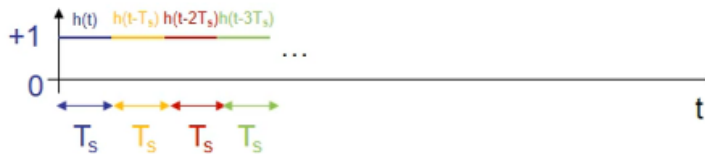


FIGURE 8 – Translations de $h(t)$

On se contente qu'ainsi, on ne code rien puisqu'on se retrouve avec un niveau 1 constant toute la durée. Pour **faire la différence** et **obtenir le signal recherché**, il va falloir *pondérer par $+V$ ou par 0* les niveaux qui ont été translatés. Ainsi, les niveaux pondérés par $+V$ donneront le codage correspondant à **1**, et les niveaux pondérés par 0 vont bien donner 0 pendant la durée T_s , codage correspondant à **0**.

Ces poids viennent pondérer la forme d'onde qui a été translatée, donc à 0, à 1, 2, etc. Ils sont appelés les **symboles**, notés a_k . Ils sont envoyés tous les T_s ¹.

1. La durée T_s est appelée *période symbole*, elle est liée au *débit symbole* R_s par : $R_s = 1/T_s$. Aussi, si on appelle R_b le *débit binaire*, R_s et R_b seront équivalents puisqu'un **symbole** va coder un **bit**

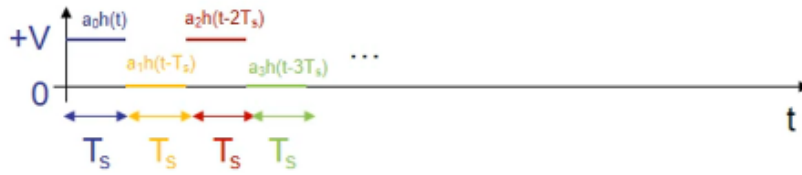


FIGURE 9 – Translations de $h(t)$ avec pondérations

Récap de la méthode : On peut finalement générer le signal en remplaçant d'abord les bits par les symboles a_k , puis, en utilisant ces symboles pour pondérer la forme d'onde choisie chaque T_s . Le **passage du débit au symbole** s'appelle le *le mapping*.

Pour les trois autres cas précédemment étudiés, on dresse ci dessous les formes d'onde et mapping associés :

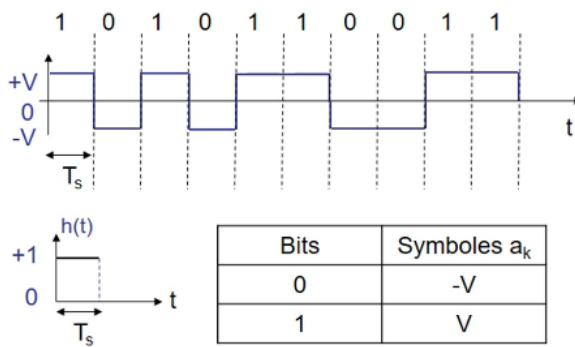


FIGURE 10 – Codage par niveau : NRZ polaire

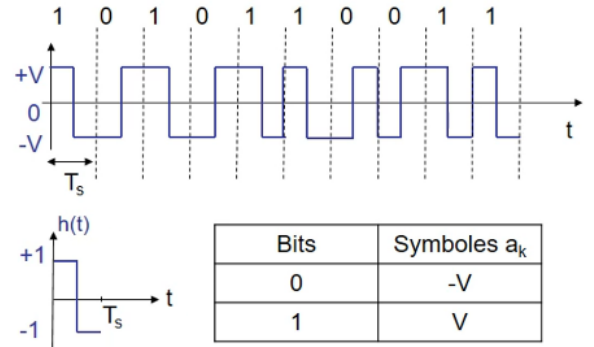


FIGURE 11 – Codage par transition : Biphas

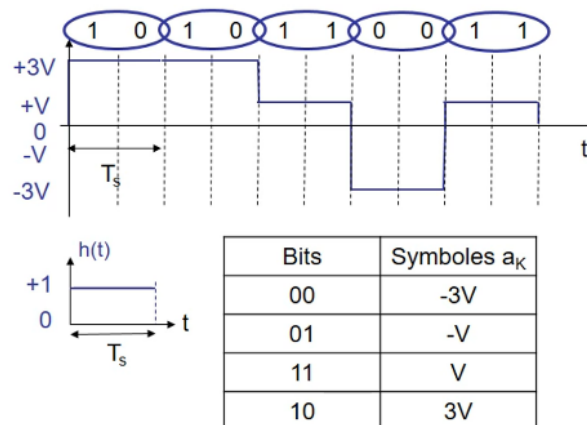


FIGURE 12 – Codage par niveau : NRZ à 4 niveaux

2.3 Modélisation générale

Quelque soit *la forme d'onde choisie* et *le mapping*, tout signal généré peut prendre la forme d'une **somme sur toutes les translations possibles** :

$$x(t) = \sum_k a_k h(t - kT_s)$$

où, pour tout k , $h(t - kT_s)$ représente la translation de h en kT_s , et la multiplication par a_k traduit la pondération.

Cette somme peut s'écrire autrement :

$$x(t) = \sum_k a_k h(t - kT_s) = \sum_k a_k \delta(t - kT_s) * h(t)$$

afin de reconnaître un **processus de filtrage**¹.

Et cela conduit à la structure suivante, utilisée pour générer un signal de communication numérique, appelée **modulateur bande de base** (nom expliqué dans la partie densité spectrale de puissance impulsionnelle) :

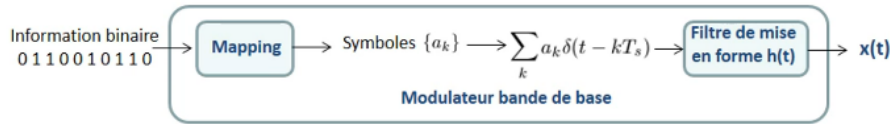


FIGURE 13 – Modulateur bande de base

Comme il est possible de générer plus de 2 symboles à partir du mapping, on retient que : **pour coder n bits dans un symbole a_k** , on va devoir **utiliser $M = 2^n$ symboles**, qui sont généralement générés avec une moyenne nulle. Le signal obtenu est alors dit *modulé en M -PAM* (*Pulse Amplitude Modulation*) et M est nommé *ordre de modulation*.

Ainsi, $a_k \in \{\pm V, \pm 3V, \dots, \pm(M-1)V\}$ et **la durée d'un symbole T_s** va être *égale à n fois la durée d'un bit T_b* : $T_s = nT_b$, et on en déduit directement la relation suivante entre **débit symbole R_s** , **débit binaire R_b** et M :

$$R_s = \frac{1}{nT_b} = \frac{R_b}{n} = \frac{R_b}{\log_2(M)}$$

Récap de la méthode (reformulation) : Pour générer un signal de communication numérique, nous faisons d'abord un **mapping** pour changer les bits en symbole, puis nous **pondérons** une somme de diracs, espacés de T_s , par les symboles, et enfin, nous **filtrons** cette somme avec un filtre dont la réponse impulsionnelle est la forme d'onde choisie^a.

a. Ce filtre est appelé **filtre de mise en forme** parcequ'il va donner la forme au signal

Remarque : Selon le mapping et la forme d'onde choisie, nous allons obtenir différents signaux capables de transmettre la même information binaire.

1. La somme des dirac pondérés est filtrée par un filtre dont la réponse impulsionnelle est $h(t)$

3 Notion d'efficacité spectrale

3.1 Densité spectrale de puissance d'un signal de télécom

La connaissance de la densité spectrale de puissance du signal à transmettre est en effet très importante, puisqu'elle permet de connaître son **occupation spectrale**, et donc **la bande de fréquences nécessaire pour pouvoir transmettre**.

Nous avons vu précédemment comment générer un signal de communication numérique.

Normalement, pour calculer la densité spectrale de puissance d'un signal, nous devons d'abord calculer sa *fonction d'autocorrélation*, puis prendre la transformée de Fourier (cours Traitement du signal).

Subtilité : Les signaux de communication numérique ne sont pas stationnaires (leur fonction d'autocorrélation va dépendre du temps).

Heureusement, la fonction d'autocorrélation du signal de corps est périodique, elle conduit alors à ce qu'on appelle **un signal cyclostationnaire**, pour lequel il va être possible de calculer la densité spectrale de puissance, en faisant tout d'abord la moyenne de la fonction d'autocorrélation sur une période, puis, en calculant sa transformée de Fourier. Le calcul est donc un peu long et va aboutir à l'expression suivante ¹ :

$$S_x(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_s} |H(f)|^2 + 2 \frac{\sigma_a^2}{T_s} |H(f)|^2 \sum_{k=1}^{\infty} \Re \left[R_a(k) e^{j2\pi f k T_s} \right] + \frac{|m_a|^2}{T_s^2} \sum_k \left| H\left(\frac{k}{T_s}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{k}{T_s}\right)$$

où : $\sigma_a^2 = E[|a_k - m_a|^2]$; $m_a = E[a_k]$; $R_a(k) = \frac{E[a_m^* a_{m-k}] - |m_a|^2}{\sigma_a^2}$

$$H(f) = TF[h(t)]$$

avec m_a la moyenne des symboles issus du mapping.

Cas particulier très fréquent : Symboles centrés et indépendants, on conservera uniquement le premier terme.

3.2 Exemples de calcul de la DSP

3.2.1 NRZ à deux niveaux (formule d'onde du GPS)

On prend au départ des symboles binaires $a_k \in \{\pm 1\}$, considérés comme des variables aléatoires discrètes, indépendantes et équiprobables. Les calculs des quantités remarquables donnent :

$$m_a = P[a_k = +1] \times (+1) + P[a_k = -1] \times (-1) = \frac{1}{2} \times (+1) + \frac{1}{2} \times (-1) = 0$$

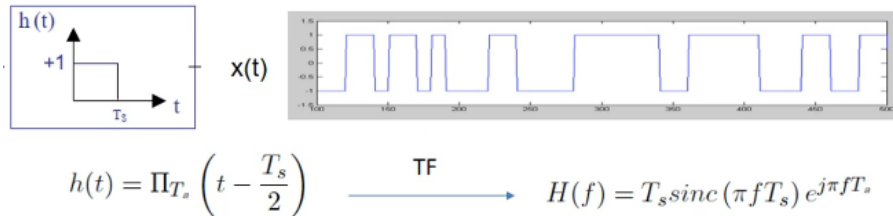
$$\sigma_a^2 = E[(a_k - m_a)^2] = P[a_k = +1] \times (+1)^2 + P[a_k = -1] \times (-1)^2 = 1$$

$$R_a(k) = \frac{E[a_m^* a_{m-k}] - |m_a|^2}{\sigma_a^2} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Symboles Indépendants}}}{=} \frac{E[a_m^*] E[a_{m-k}] - |m_a|^2}{\sigma_a^2} = \frac{|m_a|^2 - |m_a|^2}{\sigma_a^2} = 0$$

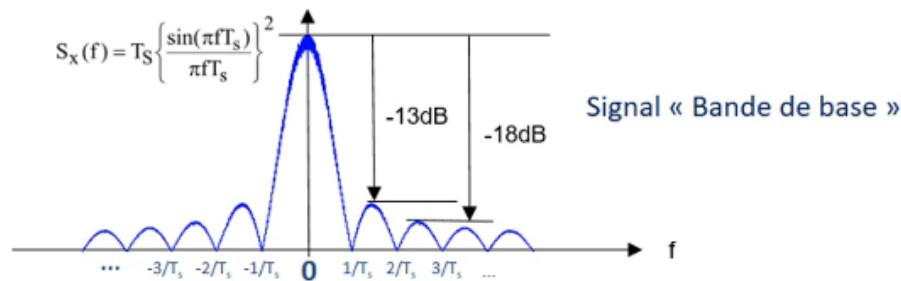
ce qui donne : $S_x(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_s} |H(f)|^2$

1. Ce qui est intéressant de voir en dehors des calculs, c'est que cette densité dépend du mapping...

Reste alors à définir le filtre de mise en forme $h(t)$ pour arriver à l'expression finale de la DSP. Le filtre permettant de générer un signal *NRZ* est un niveau ayant une durée T_s . Il peut être vu comme une fenêtre rectangulaire de durée T_s centrée autour de $\frac{T_s}{2}$, d'où sa TF :



et donc, on obtient :



qui est une allure avec un lobe central et des lobes secondaires, de plus en plus atténués. Ce signal est dit **bande de base** parce que sa DSP s'étend autour de la fréquence 0

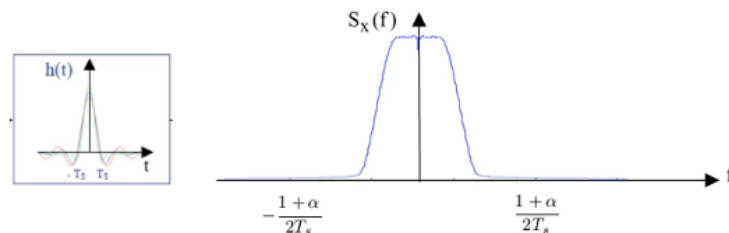
3.2.2 Généralement

Il est possible de calculer avec exactement la même méthode la DSP de tous les signaux de communication numérique pouvant s'écrire sous forme d'une somme sur les h , en adaptant le mapping et la forme d'onde.

Remarque : À chaque fois, on aura une DSP centrée autour de la fréquence 0. Les signaux correspondant sont dits *bande de base*, et le modulateur permettant de les générer va être appelé *modulateur bande de base*.

3.2.3 Cas particulier important : Mise en forme en racine de cosinus surélevé

Largement utilisé en télécom, son avantage est d'être **bien localisé en fréquence** : la DSP du signal transmit est à *bande finie*, contrairement aux signaux de type *NRZ* où, en théorie, la bande est infinie, puisque le sin cardinal au carré est censé être **infini** en fréquences.



3.3 Bande occupée par le signal généré

Lorsque le spectre du signal a une bande passante illimitée, nous allons devoir la limiter avant de transmettre. Pour cela, deux manières sont possibles :

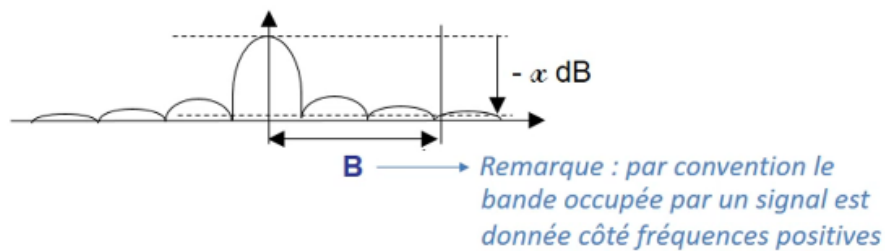
3.3.1 Définition 1 : bande de fréquence B concentrant %x de l'énergie du signal (valeurs typiques : 95 à 99%)

On veut conserver %x de l'énergie au signal, selon une loi :

$$\frac{\int_0^B S_x(f) df}{\int_0^\infty S_x(f) df} = \frac{x}{100}$$

3.3.2 Définition 2 : bande de fréquence B au delà de laquelle l'atténuation minimale est de xdB (valeurs typiques : 20 à 30 dB)

On veut obtenir une atténuation d'au moins xdB en dehors de la bande allouée.



3.3.3 Expression de B

On a toujours : $B = kR_s$ quelque soit le filtre de mise en forme utilisé, avec k un coefficient de proportionnalité qui dépend de ce filtre.

3.4 Critères de performance

Plusieurs signaux peuvent être générés pour transmettre une même information binaire. Comment ainsi choisir l'un ou l'autre ? En se basant sur deux principaux critères : **l'efficacité spectrale** qui est la bande B souhaitée pour passer le débit R_b souhaité, et **l'efficacité en puissance**.

Notons aussi que :

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2(M)}$$

avec M le nombre de symboles possibles (ordre de la modulation)
et $a_k \in \{\pm V, \pm 3V, \dots, \pm(M-1)V\}$.

La figure ci-dessous résume le positionnement des critères de performance :

