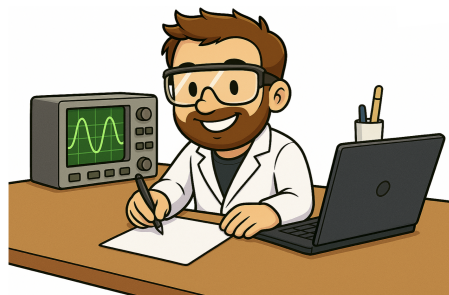


# TRANSMISSION EN BANDE DE BASE



## Compétences visées:

- Définir le codage binaire, M-aire, le débit binaire et débit de symboles (vitesse de transmission)
- Savoir représenter un signal en bande de base en fonction du temps à partir de sa règle de codage (NRZ, Manchester, et pour tout codage étudié dans un système électronique, etc.)
- Savoir exploiter la densité spectrale de puissance (DSP) d'un signal en bande de base (débit binaire, durée d'un bit, débit de symboles, encombrement spectral, efficacité spectrale)
- Identifier les caractéristiques des codages en bande de base utilisés dans des réseaux locaux et des bus de carte (par exemple : Ethernet, CAN, I2C, SPI, Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART), etc.) à partir d'une documentation technique, d'un chronogramme, d'une densité spectrale de puissance (DSP)

## Table des matières

<b>I</b>	<b>Généralités sur le codage des informations</b>	<b>3</b>
A	Conversion Numérique - Binaire . . . . .	3
B	Quelques définitions . . . . .	3
C	Les différents types de codage . . . . .	7
C-1	Codage NRZ "Non Return to Zero" . . . . .	7
C-2	Codage RZ polar . . . . .	10
C-3	Codage RZ unipolaire . . . . .	11
C-4	Codage Manchester . . . . .	12
<b>II</b>	<b>Exploitation de la DSP d'un signal numérique</b>	<b>15</b>
A	Généralité sur la DSP . . . . .	15
B	DSP d'un signal codé en NRZ . . . . .	16
C	DSP d'un signal codé en Manchester . . . . .	17
<b>III</b>	<b>Bruit et taux d'erreur binaire</b>	<b>19</b>
A	Rapport signal sur bruit - SNR . . . . .	19
A-1	Généralité sur le bruit . . . . .	19
A-2	Rapport signal sur bruit (SNR) . . . . .	19
B	Erreur de transmission . . . . .	22
B-1	Taux d'erreur binaire . . . . .	22
B-2	Interferences entre symboles et diagramme de l'oeil . . . . .	22



### 📖 Définition : Débit de transmission binaire $D$

Le débit de transmission binaire  $D$  désigne le nombre de bits transmis par unité de temps, et s'exprime donc en bits par seconde (bits/s).

### 📖 Définition : Symboles

Groupe de bits, transmit en une seule unité. On appelle valence, le nombre de bits par symboles.

#### 🧠 Exemple

Un octet est un symbole de valence 8.

### 📖 Définition : Codage M-aire

Dans un codage numérique **M-aire**, chaque symbole peut prendre **M valeurs différentes**. Si chaque symbole est codé sur  $n$  bits, alors le nombre de niveaux  $M$  est donné par :

$$M = 2^n$$

**Exemple :** - Si  $n = 2$  bits par symbole, alors  $M = 2^2 = 4$  niveaux  $\rightarrow$  codage 4-aire. - Si  $n = 3$  bits par symbole, alors  $M = 2^3 = 8$  niveaux  $\rightarrow$  codage 8-aire.

### 📖 Définition : Débit symbolique

Le **débit symbolique**  $D_s$  est le nombre de symboles transmis par seconde, exprimé en **baud**. Il est lié au débit binaire  $D$  par :

$$D = D_s \times n$$

où  $n$  est le nombre de bits par symbole.

### 🔗 Propriété : Lien entre débit binaire et bauds

Étant donné qu'un symbole est composé de  $n$  bits, alors le débit binaire équivaut à  $n$  fois le débit symbolique :

$$\text{Débit binaire} = \text{Débit symbolique} \times n$$

#### ✍ Exercice 2 Débit binaire et débit symbolique (★)

Un signal numérique transmet des données en utilisant une modulation 4-PAM (4 niveaux d'amplitude). On sait que le débit binaire du signal est de 12Mbit/s.

**Q1** Combien de bits y a-t-il par symbole dans la modulation 4-PAM?

**Q2** Calculer le débit symbolique (en bauds) du signal.

**Exercice 3** Fréquence binaire et temps par bit (★)

On transmet des bits à raison de  $R_b = 8$  Mbit/s en utilisant un codage NRZ.

**Q1** Calculer le **temps par bit**  $T_b$ .

**Définition : Bande passante**

La **bande passante** est la plage de fréquences où un système transmet un signal avec une atténuation minimale. Elle est définie par :

$$B = f_{\max} - f_{\min}$$

où  $f_{\max}$  et  $f_{\min}$  sont les fréquences maximale et minimale de la plage.

**Définition : Efficacité spectrale**

L'**efficacité spectrale**  $\eta$  mesure le nombre de bits transmis par seconde et par hertz :

$$\eta = \frac{R}{B} \quad (\text{bit/s/Hz})$$

où  $R$  est le débit binaire (bit/s) et  $B$  la bande passante (Hz).

**Exercice 4** Calcul de débit binaire et débit symbolique (★)

On considère un système de transmission utilisant une modulation 8-PAM (8 niveaux d'amplitude). Le débit binaire de ce système est de 24 Mbit/s.

**Q1** Combien de bits y a-t-il par symbole dans une modulation 8-PAM ?

**Q2** Calculez le débit symbolique (en bauds) du signal.

**Q3** Si le débit binaire est doublé, quel sera le nouveau débit symbolique ?

**Exercice 5** Codage M-aire et efficacité spectrale (★)

Un signal utilise un codage 16-QAM (16 niveaux d'amplitude) avec un débit binaire de 32 Mbit/s.

**Q1** Combien de bits y a-t-il par symbole dans ce codage ?

**Q2** Calculez le débit symbolique en bauds.

**Q3** Si l'encombrement spectral de ce signal est de 4 MHz, calculez l'efficacité spectrale en bit/s/Hz.

### Exercice 6 Comparaison de codages (★)

On considère deux systèmes de transmission :

- Système A : Codage NRZ avec un débit binaire de 10 Mbit/s.
- Système B : Codage Manchester avec un débit binaire de 10 Mbit/s.

**Q1** Si l'encombrement spectral du système A est de 5 MHz, calculez son efficacité spectrale.

**Q2** Sachant que l'encombrement spectral du système B est de 10 MHz, calculez son efficacité spectrale.

**Q3** Comparez les efficacités spectrales des deux systèmes et commentez.



**Propriété : Cas d'un codage M-aire (M=4, n=2)**

Dans un codage M-aire avec  $M = 4$  niveaux, chaque symbole est codé sur  $n = 2$  bits. Chaque symbole correspond à une valeur de tension spécifique selon le tableau ci-contre.

Symbole (2 bits)	Tension
00	-3 E
01	-1 E
10	1 E
11	3 E

**Exemple**

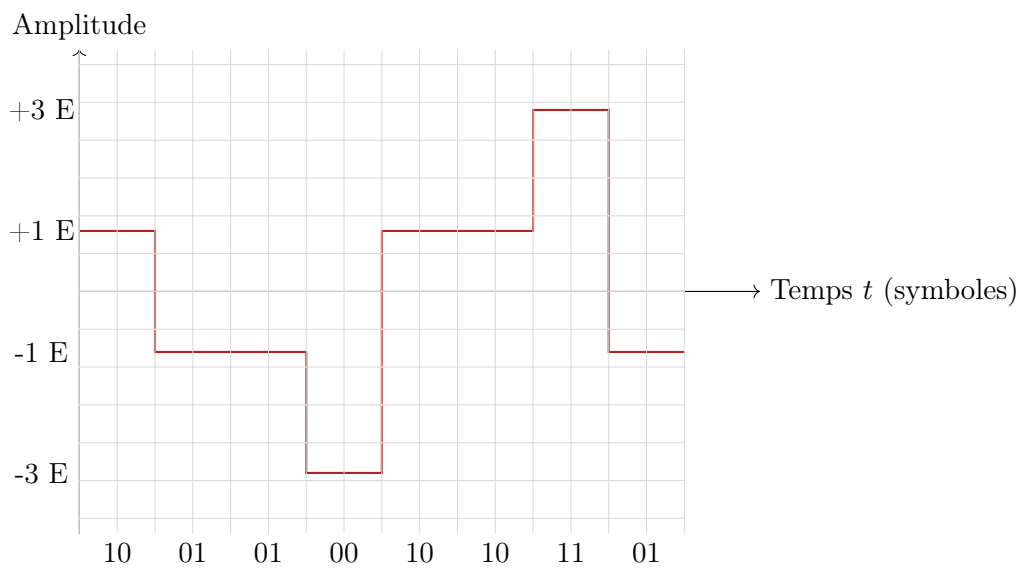


FIGURE 4 – Exemple de codage 4-aire (M=4, n=2) pour la séquence 1001010010110101

**Exercice 8** Codage NRZ M-aire (★)

On a  $n = 2$  bits par symboles.

**Q1** Calculer  $M$  le nombre de valeurs possibles qu'un symbole peut prendre.

Nous cherchons à coder le message : **00101001011010**

**Q2** Compléter le tableau suivant :

$d_k$																				
$a_k$																				

**Q3** Tracer le graphe ci-dessous.



FIGURE 5 – Codage NRZ 4-aire







**Exercice 12** Tracer NRZ binaire RZ Polar, RZ Unipolaire et Manchester (★ ★)

**Q1** Tracer le code suivant : **110110**, sachant que deux carreaux correspondent à  $T_B$  la période-bit (par conséquent un carreau correspond à la moitié d'un bit).

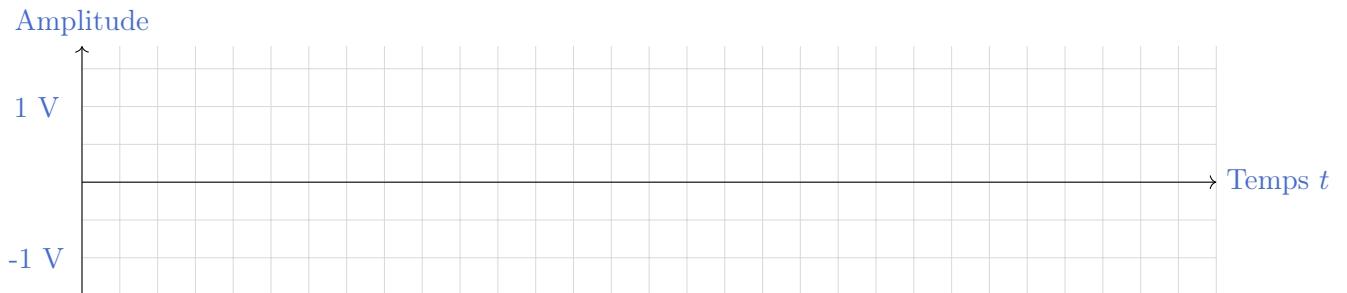


FIGURE 12 – Codage NRZ binaire

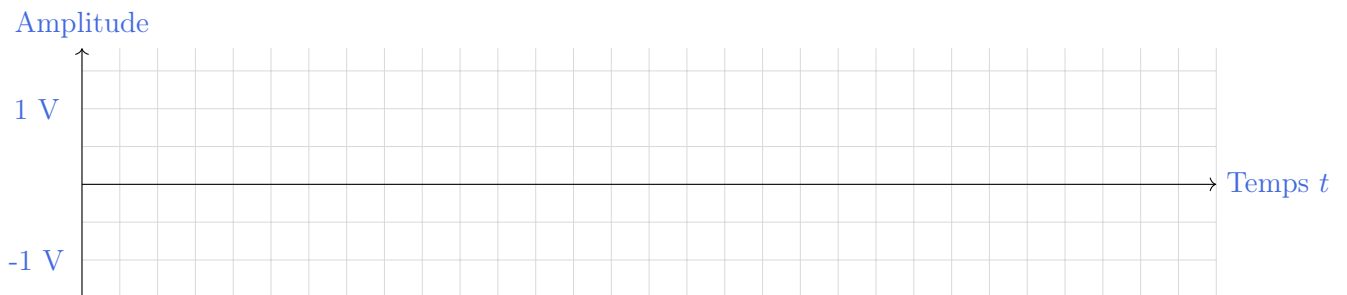


FIGURE 13 – Codage RZ Polar



FIGURE 14 – Codage RZ unipolaire

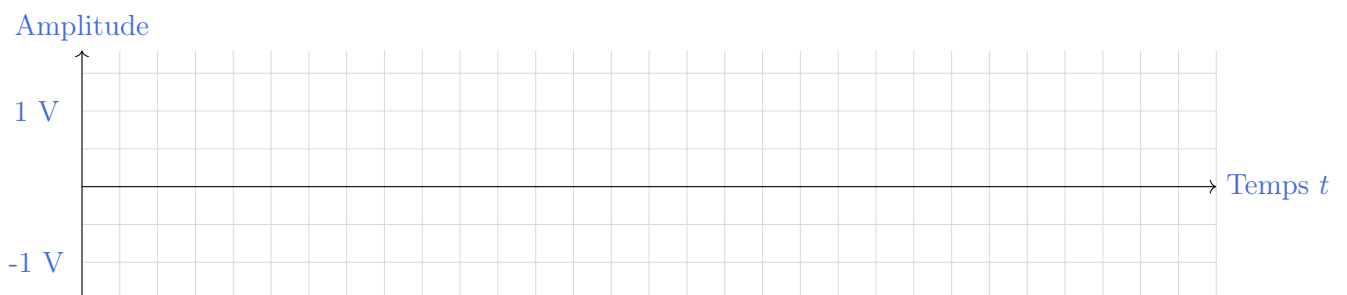


FIGURE 15 – Codage Manchester

**Q2** Faites de même pour le code : **001101**.

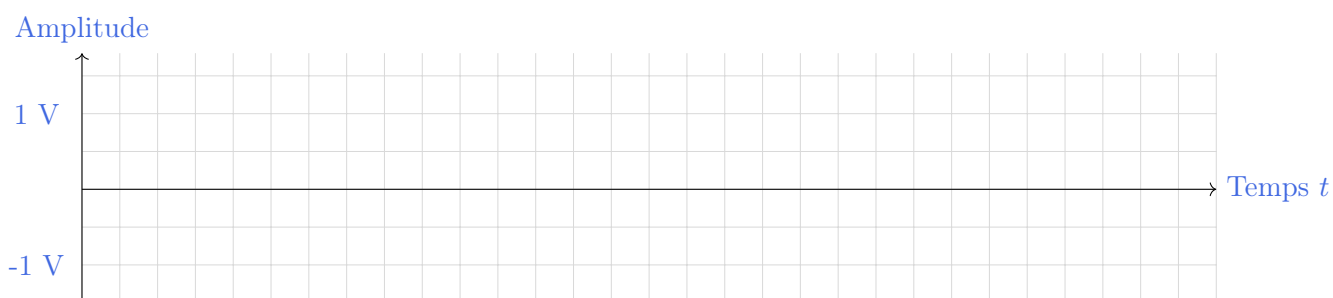


FIGURE 16 – Codage NRZ binaire

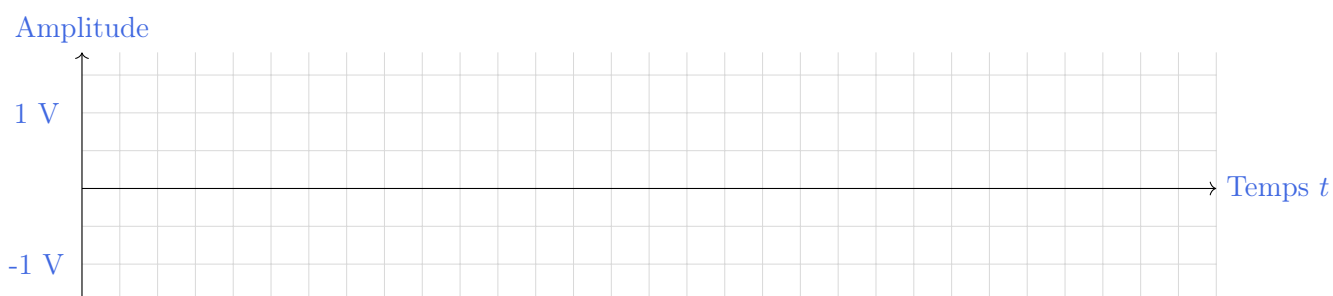


FIGURE 17 – Codage RZ Polar

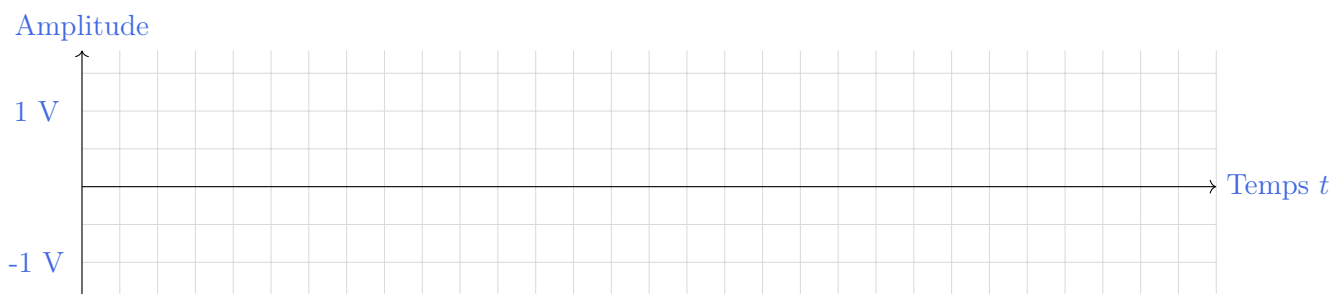


FIGURE 18 – Codage RZ unipolaire

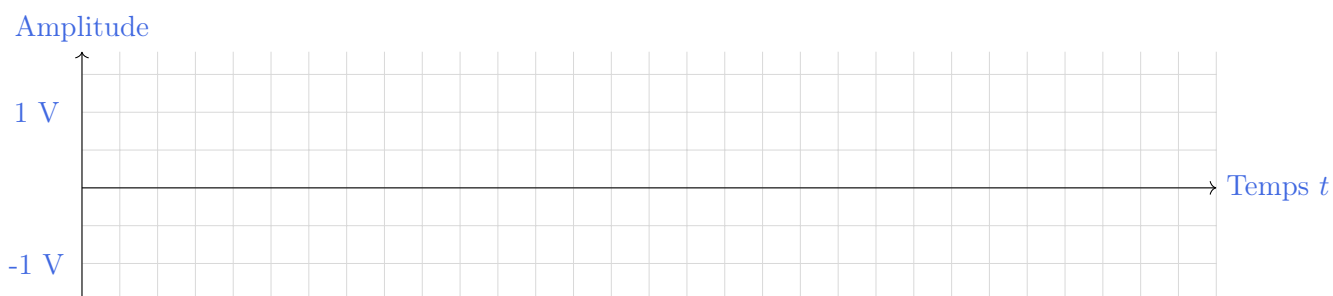


FIGURE 19 – Codage Manchester

## II Exploitation de la DSP d'un signal numérique

### A Généralité sur la DSP

#### Propriété : Densité Spectrale de Puissance (DSP)

La forme du spectre de puissance montre où se trouve **la plus grande répartition de la puissance** du signal.

On peut y distinguer un lobe principal, ainsi que des lobes secondaires. La position et la taille de ces lobes va nous permettre de trouver des informations primordiales sur le signal.

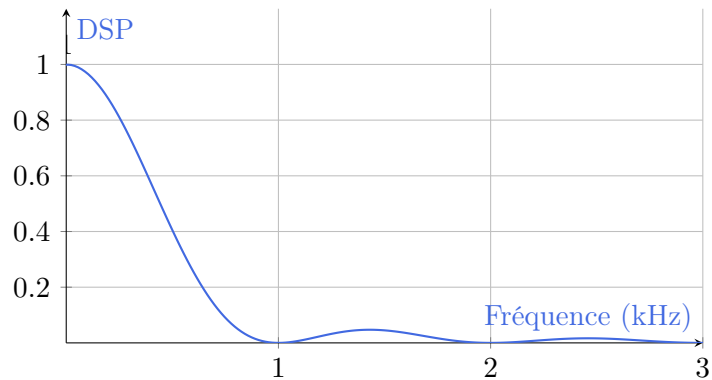


FIGURE 20 – DSP d'une NRZ

#### Définition : Encombrement spectral

L'**encombrement spectral** d'un signal désigne la largeur de bande de fréquences. Il est généralement exprimé en hertz (Hz) et correspond à l'intervalle de fréquences dans lequel la majorité de la puissance du signal est concentrée.

#### Définition : Efficacité spectrale

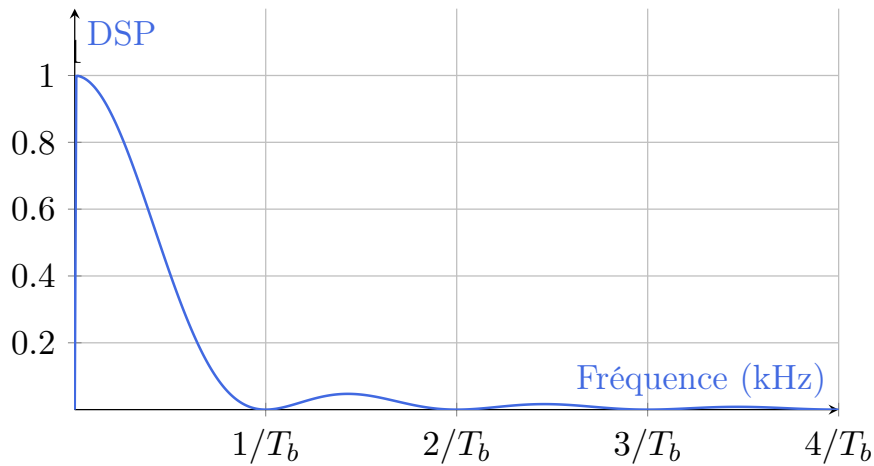
L'**efficacité spectrale** mesure le nombre de bits d'information transmis par unité de temps et par unité de bande passante. Elle s'exprime en bits par seconde et par hertz (bit/s/Hz). Mathématiquement, pour un débit binaire  $R$  (en bit/s) et une bande passante  $B$  (en Hz), l'efficacité spectrale  $\eta$  est donnée par :

$$\eta = \frac{R}{B} \quad (\text{bit/s/Hz})$$

## B DSP d'un signal codé en NRZ

### Propriété : Cas de la DSP d'un NRZ

La DSP d'un codage NRZ a la propriété de s'annuler pour chaque valeur de fréquence multiple de  $1/T_b$



### Exercice 13 DSP d'un signal NRZ (★★)

On considère un signal NRZ (Non-Return to Zero) de débit binaire  $D = 10 \text{ Mbit.s}^{-1}$ .

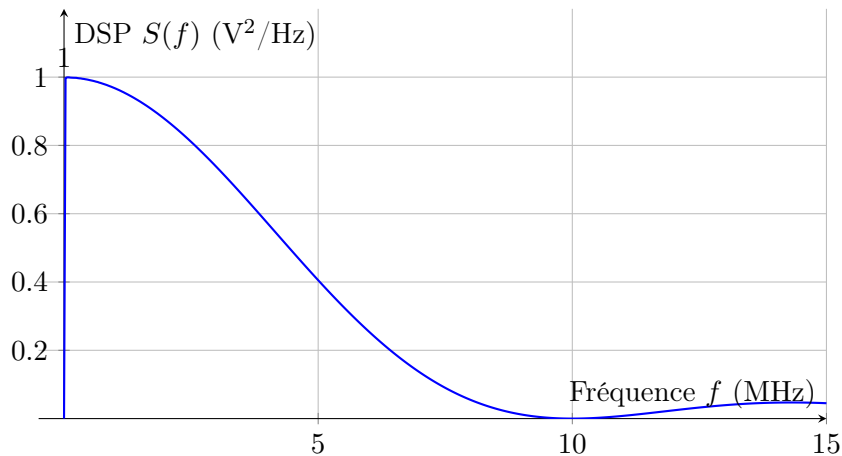


FIGURE 21 – DSP d'un signal NRZ pour un débit binaire  $D = 10 \text{ Mbit.s}^{-1}$

**Q1** Déterminez la durée d'un bit  $T_b$  en secondes.

**Q2** Calculez le débit de symboles  $D_s$  en bauds. Justifiez votre réponse.

**Q3** À partir de la DSP tracée ci-dessus, déterminez l'encombrement spectral du signal NRZ. On définira l'encombrement spectral comme la largeur de bande à  $-3 \text{ dB}$  (c'est-à-dire la fréquence pour

laquelle la DSP vaut la moitié de sa valeur maximale).

**Q4** Calculez l'efficacité spectrale  $\eta$  en bit/s/Hz. Commentez ce résultat.

**Q5** Si on souhaite doubler le débit binaire tout en gardant la même efficacité spectrale, quelle sera la nouvelle largeur de bande nécessaire ?

### C DSP d'un signal codé en Manchester

#### Propriété : Cas de la DSP d'un codage Manchester

La DSP d'un codage Manchester s'annule pour chaque fréquence multiple de  $2/T_b$ . Contrairement au NRZ, elle ne présente pas de composante continue (annulation en  $f = 0$ ) et son lobe principal est centré autour de  $f = 1/T_b$ .

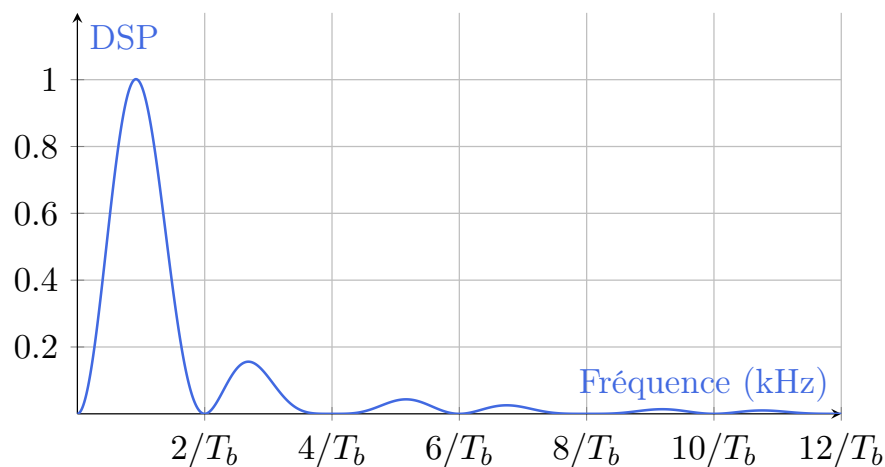


FIGURE 22 – DSP d'un codage Manchester

**Exercice 14** DSP d'un signal Manchester (★ ★)

On considère un signal codé en Manchester de débit binaire  $D = 10 \text{ Mbit.s}^{-1}$ .

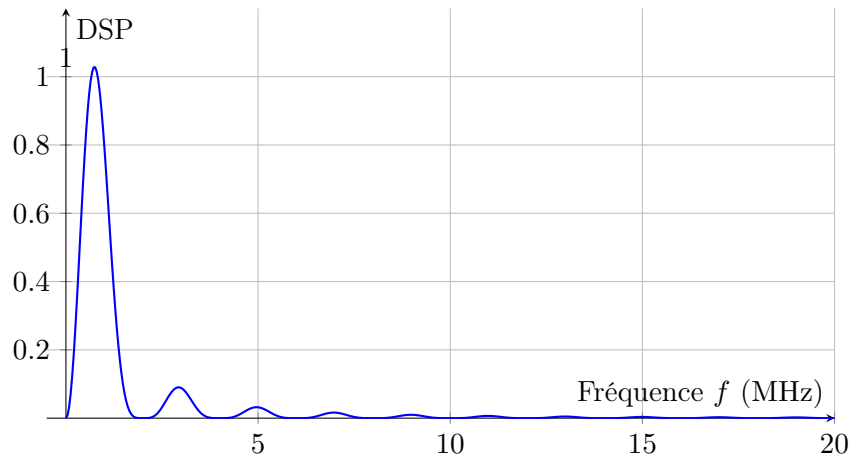


FIGURE 23 – DSP d'un signal Manchester pour un débit binaire  $D = 10 \text{ Mbit.s}^{-1}$

- Q1** Déterminez la durée d'un bit  $T_b$  en secondes.
- Q2** Calculez le débit de symboles  $D_s$  en bauds. Justifiez votre réponse en expliquant pourquoi il diffère du débit binaire.
- Q3** À partir de la DSP tracée ci-dessus, déterminez l'encombrement spectral du signal Manchester. On définira l'encombrement spectral comme la largeur de bande à  $-3 \text{ dB}$ .
- Q4** Calculez l'efficacité spectrale  $\eta$  en bit/s/Hz. Comparez-la à celle du NRZ et commentez.

### III Bruit et taux d'erreur binaire

#### A Rapport signal sur bruit - SNR

##### A-1 Généralité sur le bruit

###### 📖 Définition : Bruit

Un bruit est un signal aléatoire, non désiré, qui se superpose au signal utile et perturbe sa transmission ou son traitement.

###### 📖 Définition : Densité spectrale de puissance

La densité spectrale de puissance (DSP) d'un bruit, notée  $S(f)$ , décrit la répartition de la puissance du bruit en fonction de la fréquence. Elle s'exprime en watts par hertz (W/Hz).

###### ♥ Formule : Puissance du bruit

La puissance du bruit correspond au produit de sa DSP avec la bande passante :

$$P_{\text{bruit}} = DSF \times (f_{\text{max}} - f_{\text{min}})$$

###### 🔗 Propriété : Types de bruits

Il existe plusieurs types de bruits, classés selon leur origine ou leur caractéristique spectrale :

- Bruit blanc :  
Bruit dont la densité spectrale de puissance est constante sur toute la bande de fréquences.
- Bruit rose :  
Bruit dont la densité spectrale de puissance décroît avec la fréquence (proportionnelle à  $\frac{1}{f}$ ).

##### A-2 Rapport signal sur bruit (SNR)

###### 📖 Définition : Rapport signal sur bruit

Le rapport signal sur bruit (SNR, Signal-to-Noise Ratio) est une mesure de la qualité d'un signal. Il est défini comme le rapport entre la puissance du signal utile  $P_{\text{signal}}$  et la puissance du bruit  $P_{\text{bruit}}$  :

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{bruit}}}$$

Le SNR est souvent exprimé en décibels (dB) :

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{bruit}}} \right)$$

### Propriété : Utilité du SNR

Le SNR permet d'évaluer la qualité d'une transmission ou d'un système :

- SNR élevé (ex :  $> 30$  dB) : Le signal est peu perturbé par le bruit. La transmission est de bonne qualité.
- SNR faible (ex :  $< 10$  dB) : Le signal est noyé dans le bruit. Risque d'erreurs élevé.

### Exercice 15 Calcul de SNR (★)

Un récepteur mesure une puissance de signal de  $5 \mu\text{W}$  et une puissance de bruit de  $0.05 \mu\text{W}$

**Q1** Calculez le SNR en valeur linéaire.

**Q2** Convertissez ce SNR en dB.

**Q3** Ce récepteur est-il conforme si le cahier des charges exige un SNR minimal de 20 dB ?

### Exercice 16 Etude d'un système bruyant (★★)

Le signal en entrée d'un système, est sinusoïdal, d'amplitude  $U = 10 \text{ V}$  et de valeur moyenne  $\langle u \rangle = 5 \text{ V}$ . On considère une charge de  $R = 10 \Omega$ .

Dans ce système, un dipôle crée un bruit, dont la densité spectrale de puissance a pour représentation :

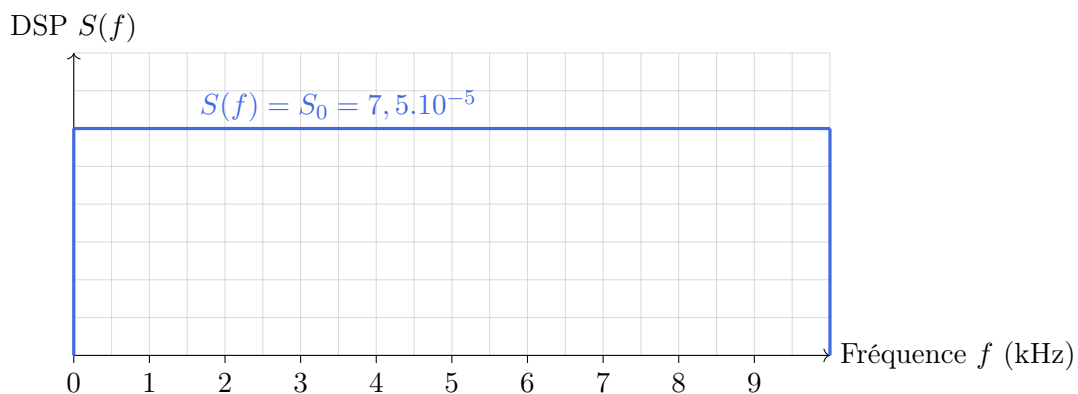


FIGURE 24 – DSP d'un bruit blanc

La bande passante du système électrique est la suivante :  $[1,0 \text{ KHz}; 2,0 \text{ KHz}]$

- Q1** Quel type de bruit est créé dans la bande passante  $[1,0 \text{ KHz}; 2,0 \text{ KHz}]$  ?
- Q2** Déterminer la valeur de la puissance du signal en entrée du système, notée  $P_{signal}$ .
- Q3** Quelle est l'unité de  $S_0$  la valeur de la DSP du signal blanc ?
- Q4** Déterminer la valeur de la puissance moyenne normalisée du bruit, notée  $P_{bruit}$
- Q5** En déduire la valeur du rapport signal sur bruit en décibel, noté  $SNR_{dB}$ .
- Q6** La bande passante du système est maintenant de  $[1,0 \text{ KHz}; 1,2 \text{ KHz}]$ . : calculer la nouvelle valeur du rapport signal sur bruit en décibel.
- Q7** Comment évolue le rapport signal sur bruit lorsque la largeur de la bande passante diminue ?

**Rappel**

La puissance d'un signal se calcul comme :

$$P = \frac{U_{eff}^2}{R}$$

## B Erreur de transmission

### B-1 Taux d'erreur binaire

#### Propriété : Signal numérique bruité

A la réception le bruit du canal, qui se superpose au signal codé, peut entraîner des erreurs d'interprétation sur l'état "0" ou "1" d'un bit.

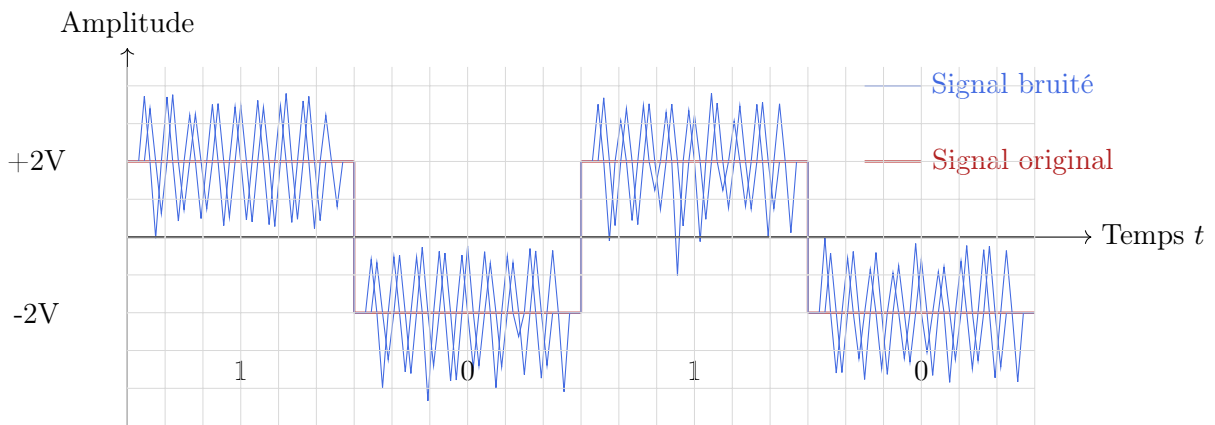


FIGURE 25 – Signal numérique bruité

Le taux d'erreur par bit (noté TEB) se calcul alors comme :

$$TEB = \frac{\text{nombre de bits faux}}{\text{nombre de bits transmis}}$$

### B-2 Interférences entre symboles et diagramme de l'oeil

#### Propriété : IES

Le canal de transmission a une bande passante limitée qui va agir comme un ltre passe-bas. Les symboles transmis seront déformés et surtout étalés. Ainsi, en plus du bruit, chaque symbole aura tendance à déborder sur le symbole voisin : c'est le phénomène d'interférences entre symboles ou IES en abrégé.

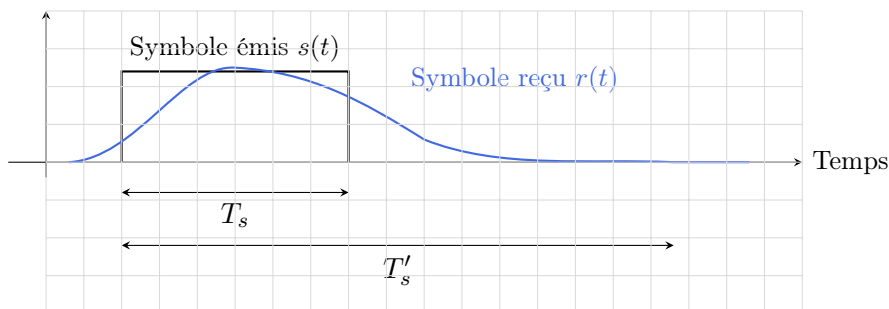


FIGURE 26 – Symbole émis et symbole reçu

**Remarque**

Le diagramme de l'œil permet d'évaluer rapidement la qualité d'un signal reçu en superposant plusieurs symboles sur une même période symbole.

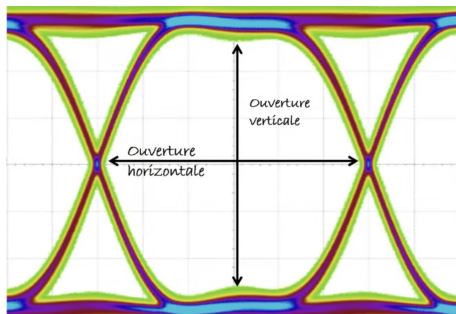


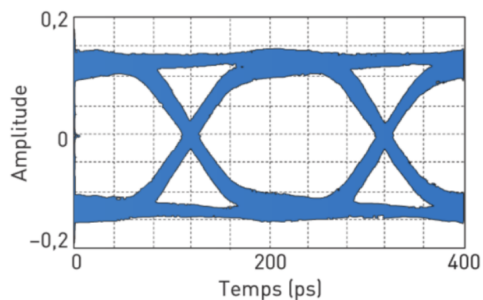
FIGURE 27 – Diagramme de l'œil - Zondag

1. Plus l'ouverture verticale est grande, moins il y a de distorsion dans le signal.
2. L'ouverture horizontale correspond à la période symbolique.

**Exercice 17** Diagramme de l'œil (★)

On souhaite comparer les performances de deux câbles reliant deux dispositifs USB3.

**Q1** Déterminer le débit de symboles de la transmission USB3 relevée sur la figure 28.



**Q2** Quel câble USB3 permettra la meilleure réception ?

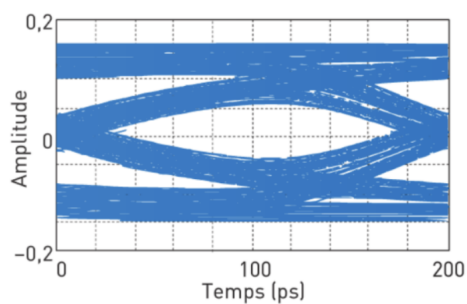


FIGURE 28 – Diagrammes de l'œil pour les câbles 1 et 2 - Nathan