

# Chapitre 4

## Transmissions & Modulations Numériques

### Une introduction : Présentation & Exercices d'applications

#### Plan de la présentation

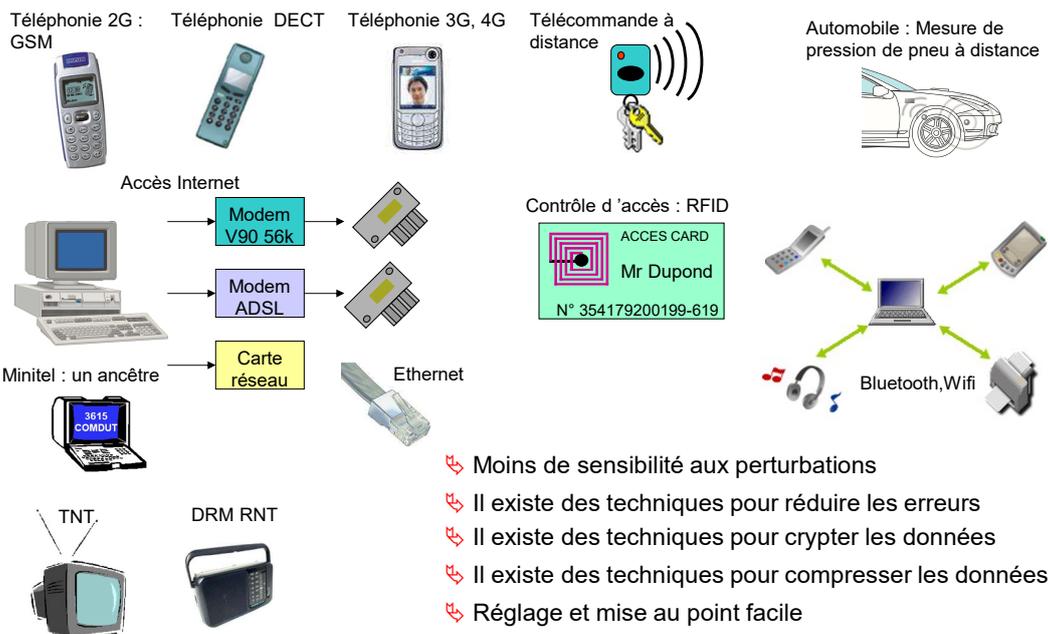
- 1 Télécommunication numérique : Intérêts & modes de transmission
- 2 Information numérique : propriétés & occupation spectrale
- 3 Fondamentaux des modulations numériques : Le diagramme IQ
- 4 Débit, bande passante, rapport Signal/Bruit & Diagramme de l'œil

Stéphane POUJOULY <http://poujouly.net>  
stephane.poujouly@universite-paris.saclay.fr

IUT CACHAN Département Geii1  
9 bd de la Div Leclerc 94230 CACHAN

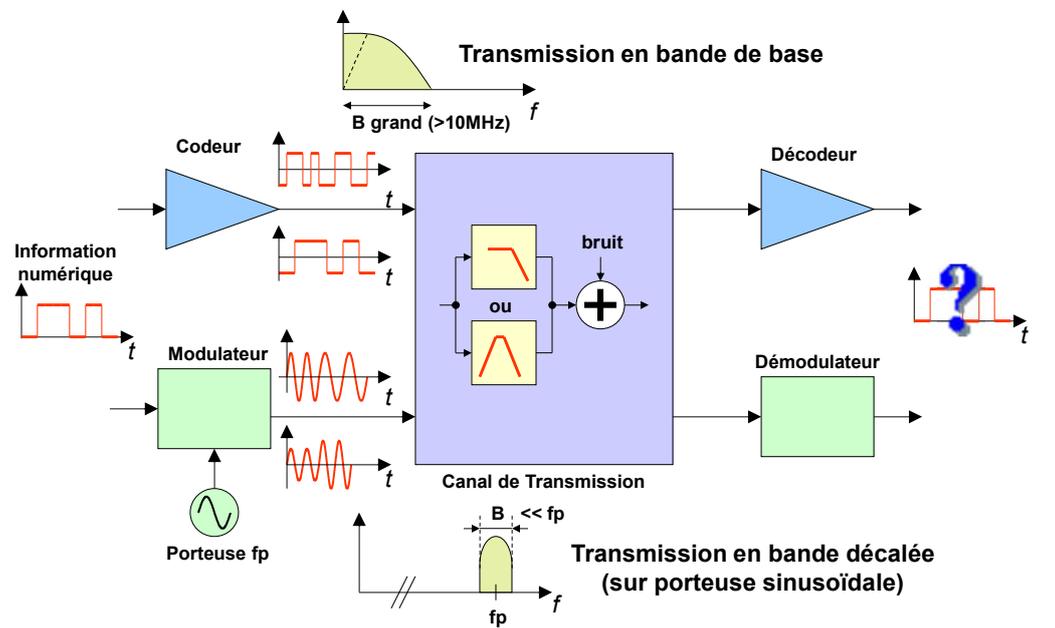
1

### 1 La place des télécoms numériques



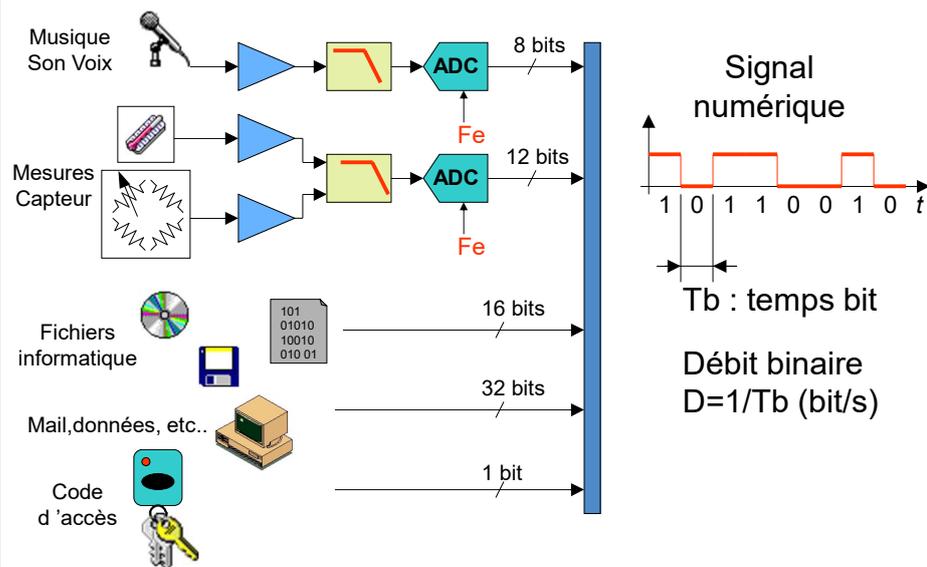
2

# 1 Les modes de transmissions



3

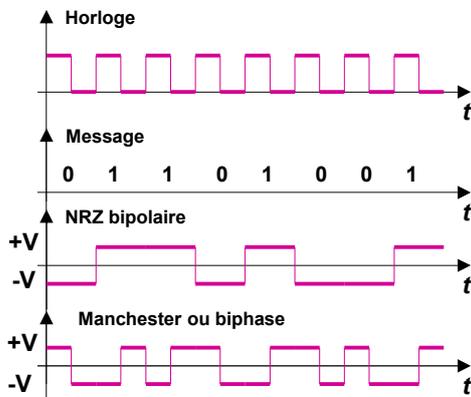
# 2 Information numérique



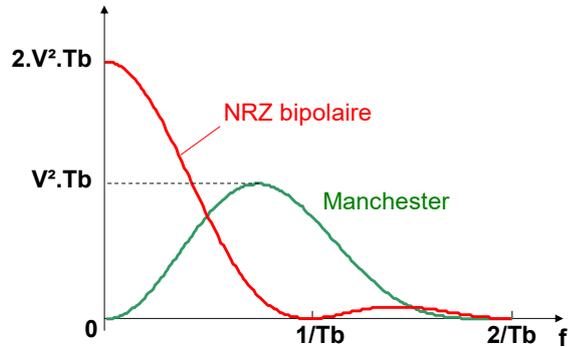
4

## 2 Densité spectrale pour des signaux numériques

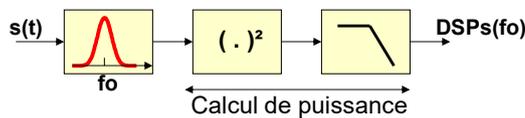
### Codage en Bande de base



### Densité Spectrale



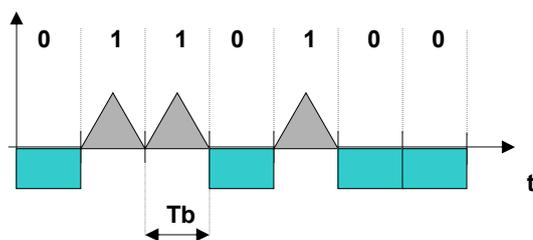
La densité spectrale de puissance d'un signal électrique traduit la répartition de la puissance de ce signal dans le domaine fréquentiel



$$P = \int_0^{\infty \text{ ou } B_{eq}} DSP(f) \cdot df$$

5

## 2 Détermination des densités spectrales



Bit	Symbole	T.Fourier
1	$s_1(t)$	$S_1(f)$
0	$s_0(t)$	$S_0(f)$

La densité spectrale d'un signal binaire de rythme  $T_b$  composé aléatoirement de symboles  $s_0$  et  $s_1$  est donné par la relation suivante appelée formule de **Bennett** :

$$D_s(f) = \frac{p_0 \cdot p_1}{T_b} \cdot |S_0(f) - S_1(f)|^2 + \frac{1}{T_b^2} \cdot |p_0 \cdot S_0(f) + p_1 \cdot S_1(f)|^2 \cdot \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \delta\left(f - \frac{n}{T_b}\right)$$

**Cas des codes de NRZ bipolaire & Manchester :**

$$s_1(t) = -s_0(t) \quad p_0 = p_1 = 1/2$$

$$D_s(f) = \frac{1}{T_b} \cdot |S_1(f)|^2$$

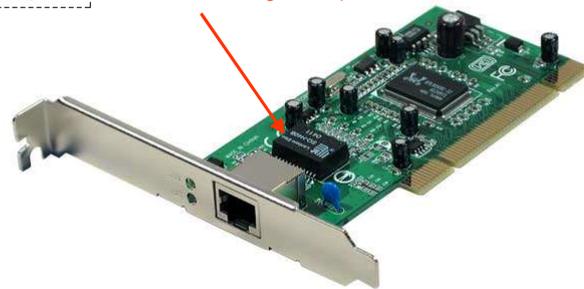
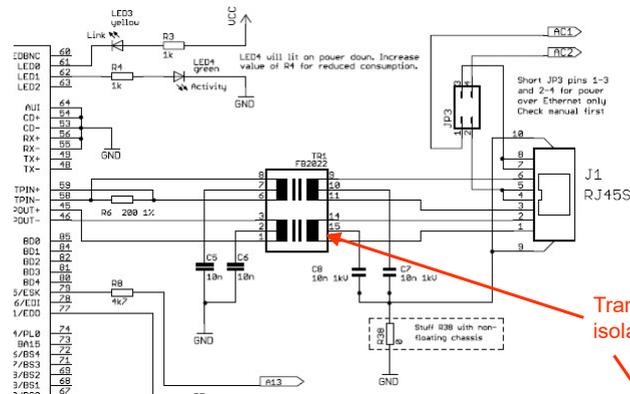
**Rappel :**

**Transformée de Fourier**

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

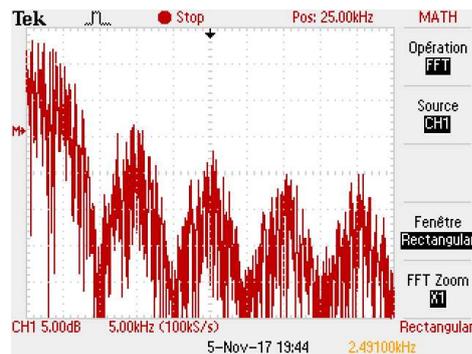
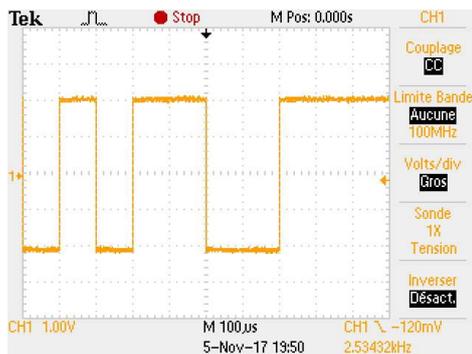
6

## 2 Occupation spectrale et implantation physique



7

## 2 Exercice : Analyse temporelle & fréquentielle d'un signal codé



On connecte un signal NRZ bipolaire sur un oscilloscope et on effectue une analyse FFT.

**Q1** : Déterminer le débit et la séquence numérique obtenue sur le relevé temporel.

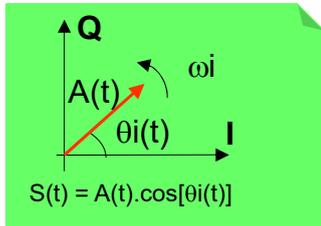
**Q2** : Justifier simplement la forme du spectre obtenu (Rappel : Echelle LOG en amplitude)

**Q3** : Représenter l'oscillogramme et l'analyse FFT que l'on peut obtenir dans le cas d'un code Manchester.

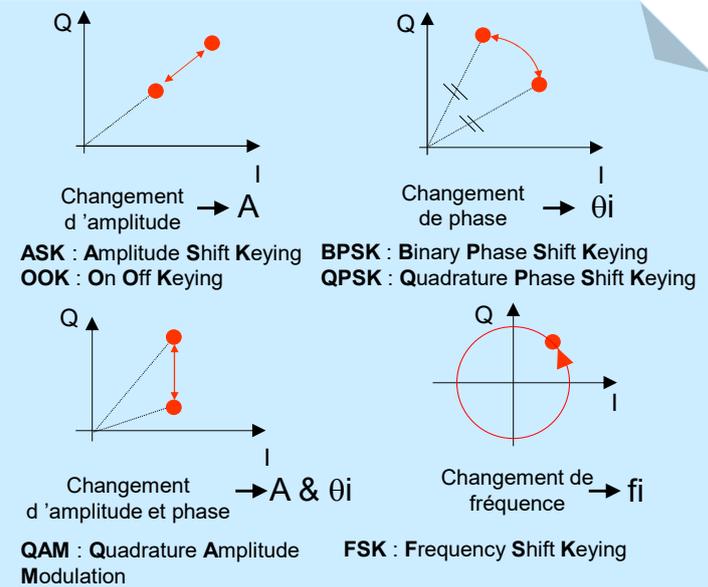
8

### 3 La base des modulations numériques : Le diagramme IQ

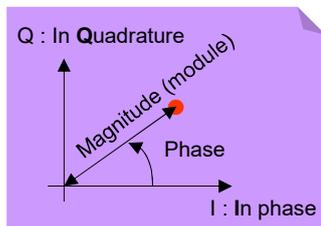
Principe des modulations



Action du signal modulant

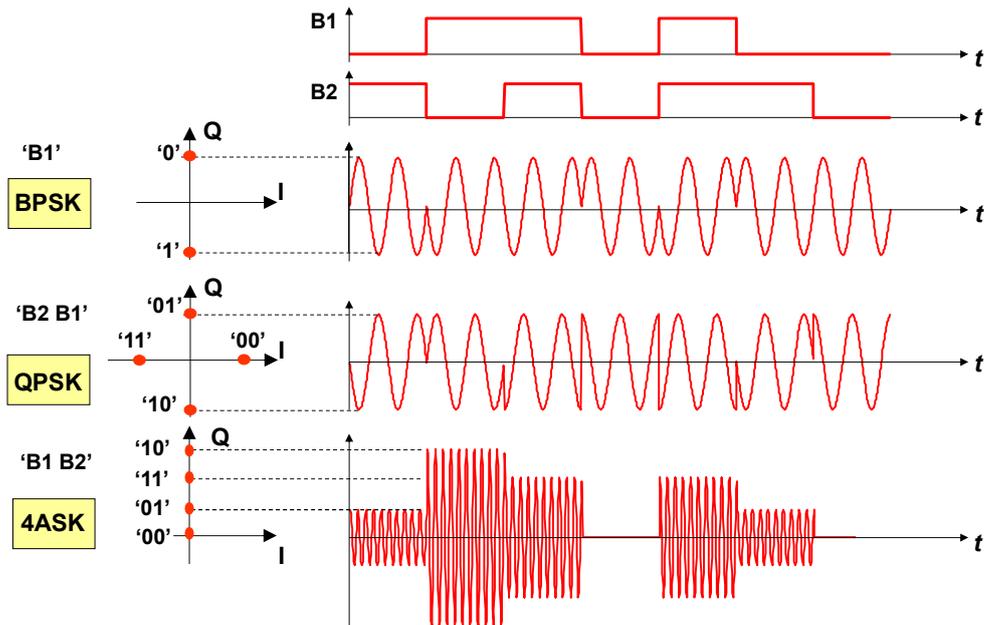


Le diagramme IQ



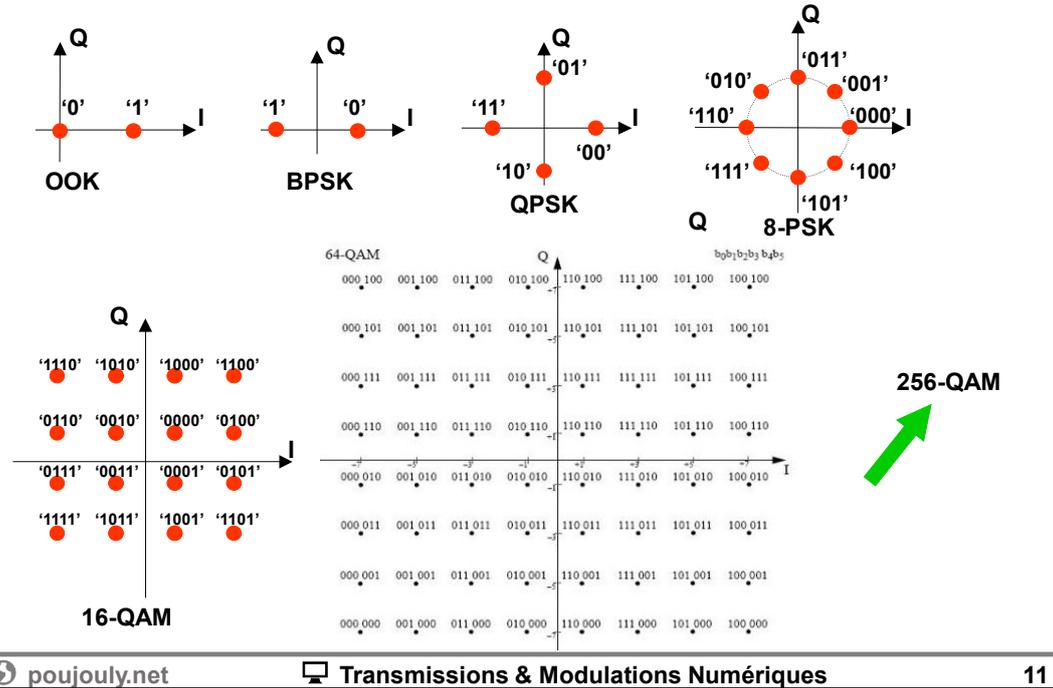
9

### 3 Diagramme IQ : illustration



10

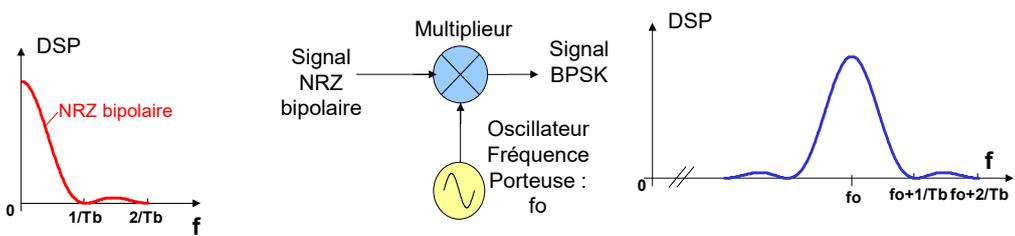
### 3 Diagramme IQ : Constellations



11

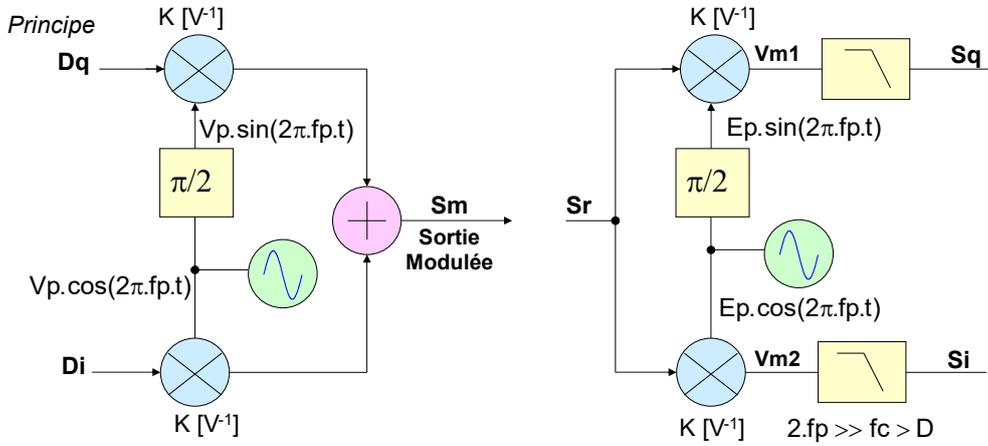
### 3 Diagramme IQ & occupation fréquentielle

Un cas simple : le signal modulé BPSK



12

### 3 Modulation / démodulation IQ



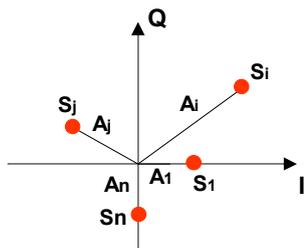
$$S_m = K \cdot V_p \cdot D_i \cdot \cos(2\pi \cdot fp \cdot t) + K \cdot V_p \cdot D_q \cdot \sin(2\pi \cdot fp \cdot t)$$

$$S_m = I \cdot \cos(2\pi \cdot fp \cdot t) + Q \cdot \sin(2\pi \cdot fp \cdot t)$$

Analyse dans le cas où  $S_r = S_m$  (transmission sans dégradation & perte)

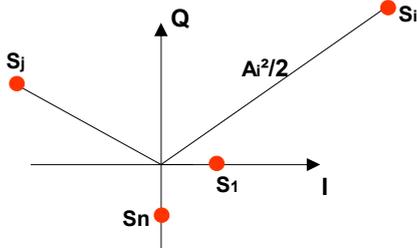
### 3 Diagramme IQ et puissance

Représentation en Amplitude (crête)



- $S_i$  Symbole n°i
- $A_i$  Amplitude du Symbole n°i
- $Pr(S_i)$  Probabilité d'apparition du Symbole n°i

Représentation en Puissance (normalisée)



$$S_{\text{modIQ}_{\text{eff}}}^2 = \sum_{i=1}^n Pr(S_i) \cdot \frac{A_i^2}{2}$$

$$\sum_{i=1}^n Pr(S_i) = 1$$

### 3 Exercice : Un modulateur 4ASK

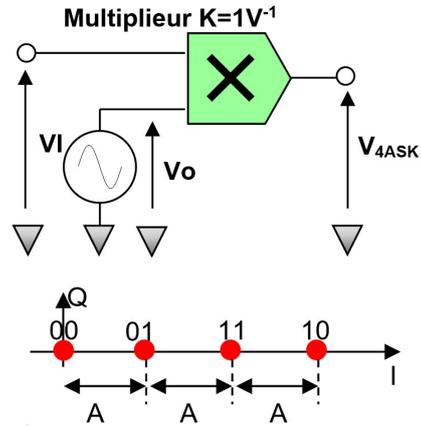
On considère une modulation 4 - ASK dont la constellation dans le diagramme IQ est représentée ci-contre et dans lequel on donne  $A=1V$ . Par ailleurs on donne les renseignements suivants concernant la modulation :

- Fréquence de modulation :  $f_0 = 500\text{kHz}$
- Temps symbole :  $T_s = 100\mu\text{s}$

Afin de générer le signal modulé  $V_{4ASK}$  on met en œuvre le modulateur représenté ci dessus et dans lequel on donne  $V_o = E_o \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t)$  avec  $E_o = 1V$ .

**Q1** : Représenter le signal  $V_I$  lorsque la séquence binaire à transmettre est la suivante : {011000110100}

**Q2** : Si l'on considère que tous les symboles sont équiprobables, quelle est l'expression de la valeur efficace du signal modulé  $V_{4ASK}$  ?



### 4 Une histoire de débit, de bande passante et de bruit

**Relation de Shannon-Hartley :**

$$C = D_{\max} = B_p \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{B} \right)$$

**C** : Capacité du canal transmission

**D<sub>max</sub>** : débit maximal possible de la transmission

**B<sub>p</sub>** : Bande passante du canal de transmission

**log<sub>2</sub>** : Fonction logarithme en base 2  $y = \log_2(x) = \frac{\log(x)}{\log(2)} = \frac{\ln(x)}{\ln(2)}$   $x = 2^y$

$\frac{S}{B}$  : Rapport signal sur bruit dans la canal de transmission

$$\frac{S}{B} = \frac{\text{Puissance du signal utile}}{\text{Puissance du bruit}} = \frac{\text{Seff}^2}{\text{Beff}^2}$$

$$\left. \frac{S}{B} \right|_{\text{dB}} = 10 \cdot \log \left( \frac{\text{Puissance du signal utile}}{\text{Puissance du bruit}} \right) = 20 \cdot \log \left( \frac{\text{Seff}}{\text{Beff}} \right)$$

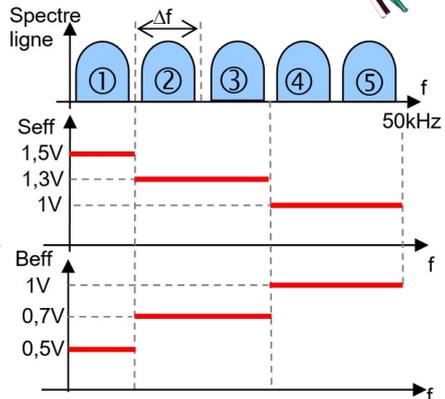
#### 4 Exercice : Application de la relation de Shannon Hartley

Pour cet exercice on considère une ligne de transmission spécialisée utilisant une paire torsadée dont la bande passante totale est de 50kHz. On souhaite transmettre des informations numériques en exploitant au mieux les caractéristiques de cette ligne.



**Q1 :** Si l'on considère que le rapport signal sur bruit moyen est de 2dB, en déduire le débit maximum possible que l'on peut espérer obtenir sur cette ligne.

En réalité le rapport signal sur bruit n'est pas constant et dépend fortement de la fréquence. La figure ci-contre représente le spectre de cette ligne ainsi que l'évolution de la valeur efficace du signal et du bruit pour cette ligne dont les profils ont été volontairement simplifié. La modulation à l'intérieur de chaque canal peut s'adapter permettant ainsi d'ajuster au mieux le débit en fonction du rapport signal sur bruit correspondant. Ainsi en changeant le motif de modulation il est possible de choisir les débits suivants pour chaque canal :



Motif de modulation	BPSK	QPSK	8PSK
Débit (kbit/s)	9,6	19,2	28,8

**Q3 :** Préciser la largeur  $\Delta F$  d'un canal. Calculer les débits maximums possibles correspondants aux 3 niveaux de rapport signal sur bruit sur la ligne de transmission en prenant un canal de largeur  $\Delta F$  comme référence.

**Q4 :** Compte tenu des motifs de modulation proposés et des débits correspondants, en déduire le débit total que l'on peut espérer obtenir sur cette ligne de transmission.

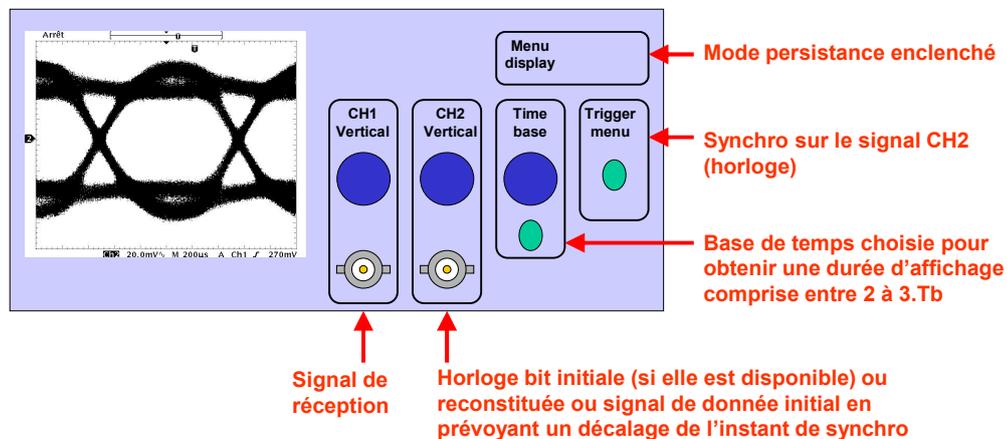
#### 4 Le diagramme de l'œil : Mise en œuvre

*Diagramme de l'œil :* Il s'agit d'une représentation compacte obtenue sur un oscilloscope permettant de juger rapidement de la qualité d'une transmission numérique.

Œil « suffisamment » ouvert : Transmission numérique correcte, Taux d'erreur bit faible

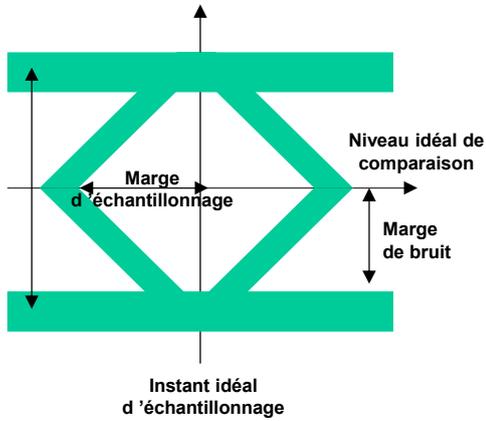
Œil fermé : Taux d'erreur bit important

*Mise en œuvre pratique sur un oscilloscope numérique (obligatoirement) :*

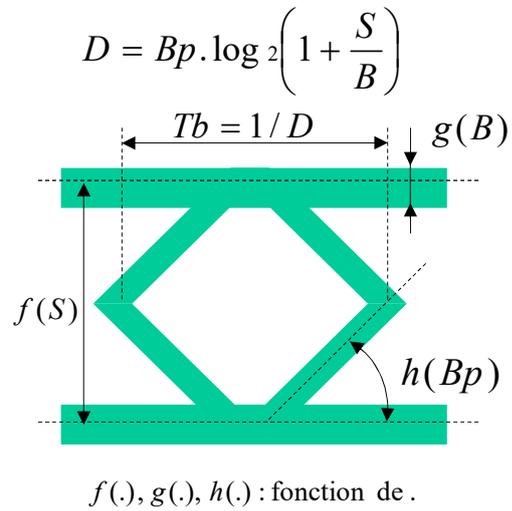


#### 4 Le diagramme de l'œil & Shannon Hartley

Représentation simplifiée

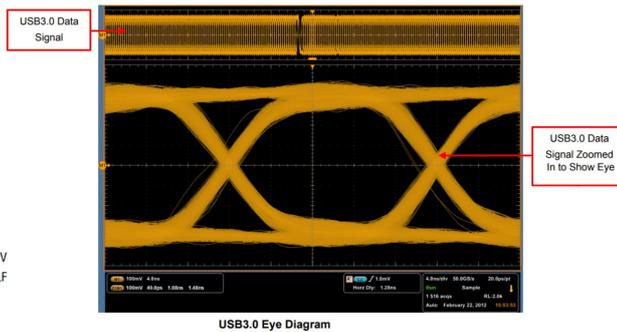
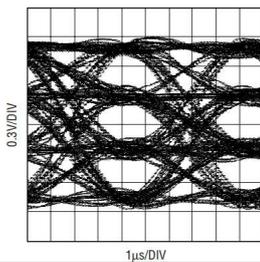
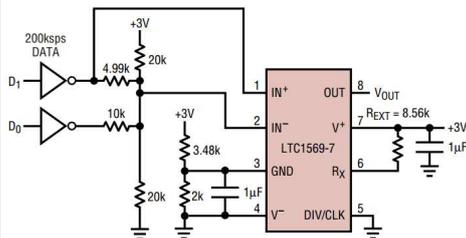


Traduction de la relation de Shannon Hartley dans le diagramme de l'œil



#### 4 Exemples de diagramme de l'œil

Pulse Shaping Circuit for Single 3V Operation, 400kbps (200ksps) 4 Level Data, 128kHz Cutoff Filter



Melexis MLX73290-A 300 to 960MHz Multi-channel Transceiver

Eye Diagram 250kbps GMSK transmit signal eye diagram at 868MHz

