

Communications Numériques

(Série de TD)

Licence 3 : Télécommunications

Faculté de Génie Electrique

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

Contenu de la matière

Introduction :

Rappels divers sur les signaux numériques et les processus aléatoires

Chapitre 1. Transmission numérique en bande de base

Eléments d'une chaîne de transmission numérique, modulation en bande de base. Codes en ligne (Conversion bits/symboles et Mise en forme), Code NRZ polaire, Code NRZ unipolaire, Code RZ unipolaire, Code Biphase/Manchester, Code HDB3 (Haute Densité Bipolaire d'ordre 3), Codes en lignes M-aires (Codes NRZ M-aires), Densité spectrale de puissance des codes en ligne, Critères de choix d'un code en ligne. Notion d'enveloppe complexe.

Chapitre 2. Récepteur optimal

Structure d'un récepteur à M signaux, représentation vectorielle des signaux et du bruit, détection optimale (détecteur MAP pour maximum a posteriori et détecteur ML pour maximum likelihood), Structure du récepteur optimal (autocorrélation ou filtrage adapté sur chacune des voies puis décision).

Chapitre 3. Transmission sans interférence entre symboles

Effet du Canal sur la forme d'onde du code en ligne, Caractéristiques de l'Interférence entre symboles, Diagramme de l'œil, Condition d'absence d'interférence entre symboles, Critère de Nyquist, filtre en cosinus surélevé, Performances en termes de probabilité d'erreur d'un système M-aire avec filtrage de Nyquist, Répartition du filtrage entre l'émission et la réception.

Chapitre 4. Performances pour une transmission en bande de base

Détection d'un signal binaire et test des hypothèses, critère du maximum de vraisemblance, rapport de vraisemblance, récepteur binaire optimal à deux corrélateurs, à un seul corrélateur et à base de filtre adapté. Probabilité d'erreur pour le cas d'un bruit blanc gaussien avec filtre passe bas et filtre adapté.

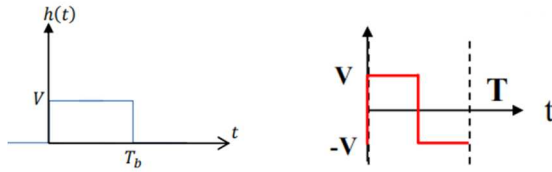
Chapitre 5. Modulations numériques à bande étroite

Principe, Modulation à déplacement d'amplitude (ASK), Modulation OOK, Modulations M-ASK symétriques, Réalisation physique et performances, Modulation à déplacement de phase (PSK), Constellations, Modulations M-PSK, Réalisation physique et performances, Modulation à deux porteuses en quadrature (QAM), Réalisation physique et performances, Modulation à déplacement de fréquence (FSK), Modulation MSK, Réalisation physique et performances d'une FSK binaire.

TD n°1 : Rappels Divers

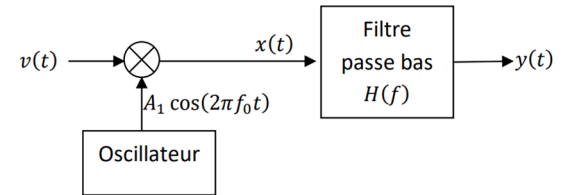
1. On considère le signal suivant $A\Pi_T(t)$

- Montrer qu'il a pour transformée de Fourier $X(f) = AT \text{sinc}(fT)$, en déduire sa Densité spectrale de puissance $S_x(f) = [X(f)]^2$ et une énergie de $E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = A^2 T$
- Sachant que $TF\{x(t - t_0)\} = e^{-2\pi j f t_0}$, déterminer les TF et DSP des signaux suivants :

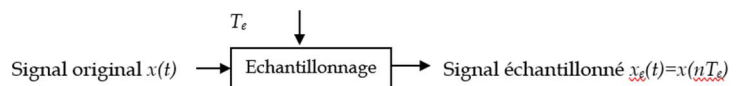
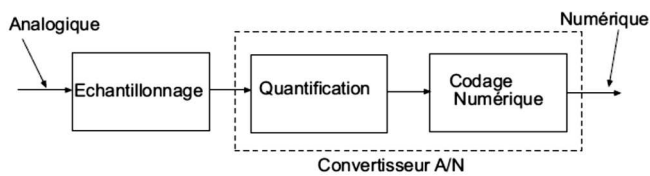


- Calculer et tracer les TF des signaux suivants :

- o $v(t) = A_0 m(t) \cos(2\pi f_0 t)$ puis celle de $x(t) = v(t)A_1 \cos(2\pi f_0 t)$ et puis celle de $y(t)$ (voir schéma ci-contre)
- o $v(t) = A_0 (1 + k m(t)) \cos(2\pi f_0 t)$ puis



2. L'échantillonnage constitue la première opération à effectuer lors d'une conversion analogique à numérique (A/N).

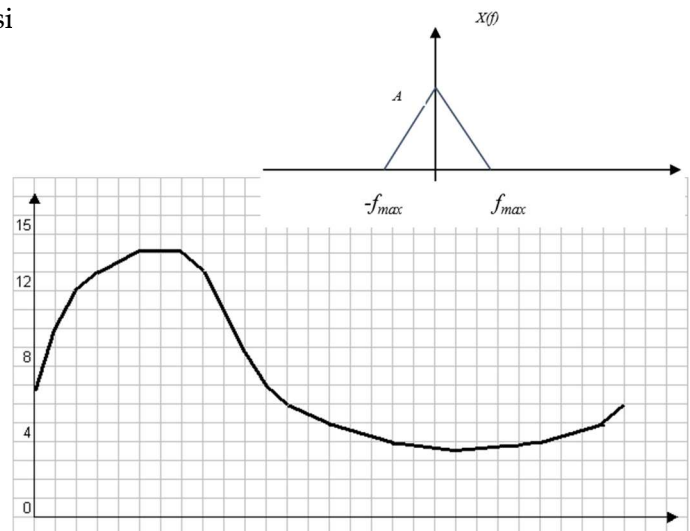
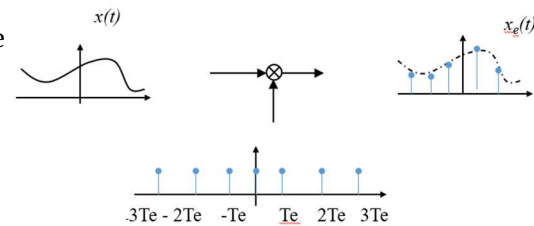


- Rappeler les 2 contraintes majeurs à respecter lors de l'échantillonnage
Dans le cas d'un échantillonnage idéal, on a :

$$x_e(t) = x(t) \cdot \sum_n \delta(t - nT_e) = \sum_n x(nT_e) \delta(t - nT_e)$$

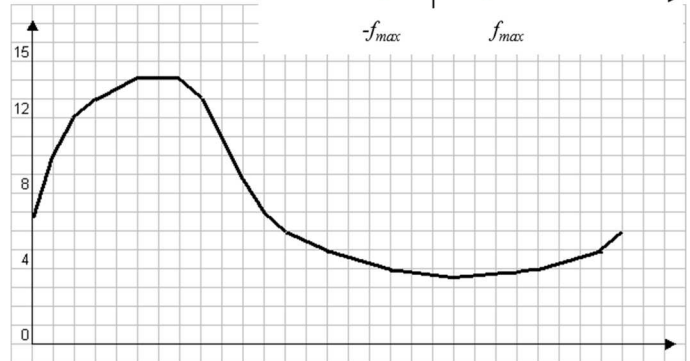
Sachant que $TF\{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT)\} = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(f - nf_0)$:

- Montrer que : $X_e(f) = f_e \sum_n X(f - nf_e)$
- On suppose le tracé donné ci-contre de $X(f)$, tracer $X_e(f)$ si
 - o $f_{max} < f_e/2$
 - o $f_{max} > f_e/2$
- En déduire le théorème de Shanon



3. Dans le cadre de l'échantillonnage de données analogiques, on peut utiliser le codage ordinaire PCM (Pulse Code Modulation) qui consiste à coder sur n bits chaque valeur mesurée de la donnée (avec approximation de quantification). Décrire les différentes étapes correspondant à la numérisation.

Soit la donnée analogique suivante que l'on désire coder sur 4 bits (les lignes verticales indiquent les instants d'échantillonnage). En déduire le fichier binaire correspondant



4. Soit X une v.a. discrète pouvant prendre les six valeurs suivantes : 1,2,3,4,5,6 avec la même probabilité $p(X=i)$ avec $i=1,2,3,\dots,6$.

- o Calculer $p(X=i)$
- o Donner l'expression de la densité de probabilité $p(x)$ et la tracer.
- o Calculer la moyenne et la variance.

On rappelle que :

- Pour une VA discrète, la moyenne et la variance sont données par

$$\mu_x = E\{x\} = \sum_i^N x_i p(x_i) \quad \text{et} \quad \sigma_x^2 = E\{(x - \mu_x)^2\} = \sum_i^N (x_i - \mu_x)^2 p(x_i) = \sum_i^N x_i^2 p(x_i) - \mu_x^2$$

- Pour une VA continue $x \in [a, b]$, la moyenne et la variance sont :

$$\mu_x = E\{x\} = \int_a^b x \cdot p(x) dx \quad \text{et} \quad \sigma_x^2 = E\{(x - \mu_x)^2\} = \int_a^b (x - \mu_x)^2 p(x) dx = \int_a^b x^2 p(x) dx - \mu_x^2$$

5. Dans une entreprise deux ateliers fabriquent les mêmes résistances. L'atelier 1 fabrique en une journée deux fois plus de résistances que l'atelier 2. Le pourcentage de résistances défectueuses est de 3% pour l'atelier 1 et de 4% pour l'atelier 2. On prélève une pièce au hasard dans l'ensemble de la production d'une journée. Déterminer

- la probabilité que cette pièce provienne de l'atelier 1;
- la probabilité que cette pièce provienne de l'atelier 1 et est défectueuse;
- la probabilité que cette pièce provienne de l'atelier 1 sachant qu'elle est défectueuse.

On rappelle que $p(A, B) = p(B/A) \cdot p(A) = p(A/B) \cdot p(B)$ Théorème de Bayes

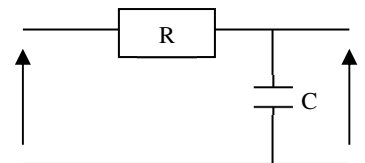
$$p(A, B) = \lim_{N \rightarrow +\infty} \left(\frac{n_{AB}}{n_A} \frac{n_A}{N} \right) = \lim_{N \rightarrow +\infty} \left(\frac{n_{AB}}{n_A} \right) \cdot \lim_{N \rightarrow +\infty} \left(\frac{n_A}{N} \right) \stackrel{\text{déf}}{=} p(B/A) \cdot p(A)$$

6. Soit le processus aléatoire $Z(t) = X \cdot \cos(2\pi f_0 t) - Y \sin(2\pi f_0 t)$, où X, Y sont des variables aléatoires gaussiennes indépendantes à moyennes nulles et de variances $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$; f_0 est une constante.

- Calculer la valeur moyenne $E\{Z(t)\}$ et la variance σ_z^2
- Calculer la fonction d'autocorrélation $R_z(t, \tau)$ et examiner si le processus est SSL.
- Si oui, calculer la DSP.

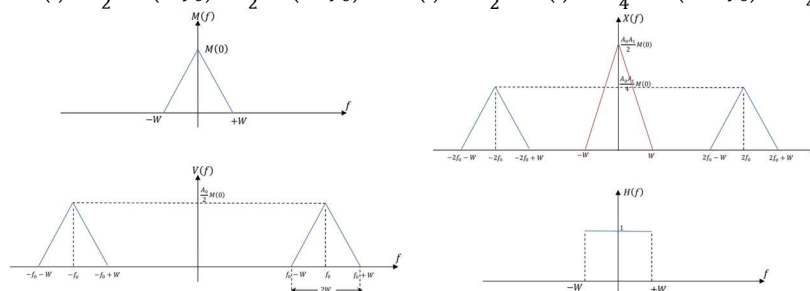
7. L'entrée $x(t)$ du circuit est un bruit blanc de fonction d'autocorrélation $R_x(\tau) = \sigma_x^2 \delta(\tau)$

- Déterminer la densité spectrale de la sortie $y(t)$, notée $S_y(f) = |H(f)|^2 S_x(f)$
- Déterminer la fonction d'autocorrélation de la sortie $y(t)$, notée $R_y(\tau)$.



Solutions

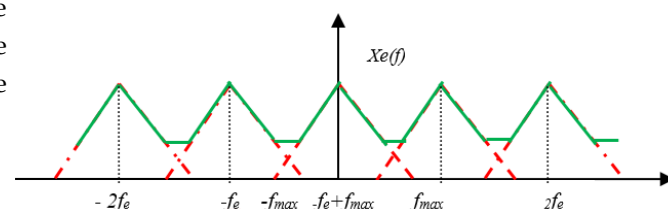
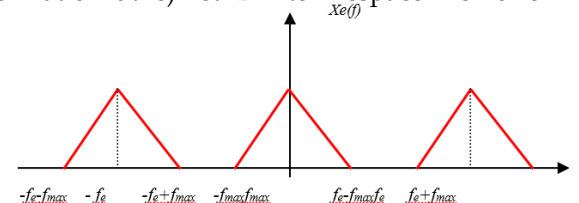
$$1. V(f) = \frac{A_0}{2} M(f - f_0) + \frac{A_0}{2} M(f + f_0) \quad Y(f) = \frac{A_0 A_1}{2} M(f) + \frac{A_0 A_1}{4} M(f - 2f_0) + \frac{A_0 A_1}{4} M(f + 2f_0)$$



2. Contraintes majeures : Ne pas détériorer le signal (conserver l'information utile) et Limiter l'espace mémoire nécessaire au stockage.

$f_e > 2 f_{\max}$: Le motif principal ($n = 0$) est égal au spectre de $x(t)$. Comme les motifs sont disjoints, on peut extraire $X(f)$ grâce à un filtre passe-bas idéal et donc reconstituer intégralement le signal $x(t)$ à partir des $x_e(t)$.

$-f_e < 2 f_{\max}$: Les motifs élémentaires de $|X_e(f)|$ se recouvrent. On parle de repliement de spectres. Il n'est pas possible de récupérer le spectre $X(f)$ par un filtrage approprié. Il n'est donc pas possible de



reconstruire le signal initial $x(t)$ à partir de la connaissance de son échantillonné $x_e(t)$.

Par conséquent, pour que la répétition périodique du spectre de $x_e(t)$ ne déforme pas le spectre $X(f)$ répété, il faut et il suffit que $f_e > 2 f_{\max}$ (**théorème de Shannon**).

3. Décrire les différentes étapes correspondant à la numérisation

- o échantillonnage (passage d'un espace de temps continu à un espace de temps discret)
- o quantification (passage d'un espace de valeurs continu à un espace de valeurs discret)
- o codage (chaque niveau quantifié de valeurs est codé sur un nombre déterminé de bits)

0111 1010 1100 1101 1110 1110 1110 1101 1011 1001 0111 0110 0110 0101 0101 0100 0100 0100 0100 0100 0100 0100
0100 0100 0100 0101 0101 0110

$$4. p(x)=1/6 \quad \mu_x = \frac{21}{6} = 3.5 \quad \sigma_x^2 = 2.9167$$

5. Notons :

- A l'événement 'la pièce provient de l'atelier 1'
- B l'événement 'la pièce provient de l'atelier 2'
- D l'événement 'la pièce est défectueuse'

Les 2/3 des pièces produites proviennent de l'atelier 1 $\rightarrow p(A) = 2/3$ $p(D/A) = 3/100$ $p(D/B) = 4/100$

$$p(x, y) = p(x/y) \cdot p(y) = p(x/y) \cdot p(y)$$

$$- p(A, D) = p(D/A).p(A) = 1/50 \text{ et } p(B, D) = p(D/B).p(B) = 1/75 \rightarrow p(D) = p(A, D) + p(B, D) = 1/30$$

$$- p(A/D) = p(A, D)/p(D) = 3/5$$

6. $\mu_z(t) = 0$ $\sigma_z^2(t) = \sigma^2 R_z(\tau) = \sigma^2 \cos(2\pi f_0 \tau)$ SSL $\rightarrow S_z(f) = \frac{\sigma^2}{2} (\delta(f - f_0) + \delta(f + f_0))$

7. $H(f) = 1/(1 + 2\pi j f RC)$, $S_v(f) = \sigma_x^2 / (1 + 4(\pi f RC)^2 R_v(\tau)) = \sigma_x^2 / 2RC e^{-|f|/RC}$, $P = R_v(0) = \sigma_x^2 / 2RC$

TD n°2 : Caractéristiques d'une transmission numérique

1. Répondre aux questions suivantes :

- Définir une source numérique et donner quelques exemples.
- Quel est le rôle d'un codeur de source ?
- En rajoutant de la redondance, le codeur de canal protège l'information des effets du canal. Expliquer
- Le codeur de source élimine la redondance alors que le codeur de canal en rajoute. Expliquer.
- Expliquer le rôle de l'unité de mise en forme et du modulateur. Pourquoi doit-on faire appel à ces unités ?
- Estimer le débit binaire d'information d'un convertisseur A/N pour la parole.

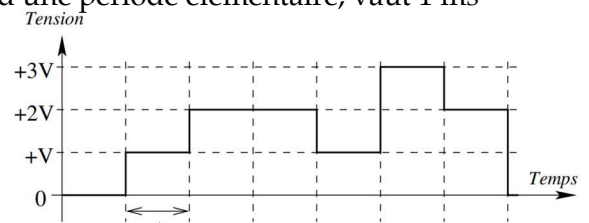
2. Les caractéristiques principales d'un canal de transmission outre le SNR et la bande de fréquence sont : la valence (V ou M), la rapidité de modulation R et le débit D.

- Quelle est la formule générale liant ces trois caractéristiques ?
- Quelle est la capacité maximale de transmission sur une voie RTC (Réseau Téléphonique Commuté) caractérisée par une bande passante de 300 - 3400 Hz et un rapport signal sur bruit de 1000 ?
- Exprimer le débit binaire Db en fonction de la période symbole T et de la valence M.

On observe le signal numérique ci-après où Δ , qui définit la durée d'une période élémentaire, vaut 1 ms

En déduire :

- La valence du signal ;
- Le nombre de bits transportés durant une période ;
- La vitesse de modulation ;
- Le débit.



3. On considère un canal de transmission numérique de débit binaire 9600 bits/s.

- Quelle rapidité de modulation est nécessaire si les signaux transmis sont binaires
- Quelle doit être la valeur minimale du rapport S/B, si la largeur de la bande passante de la liaison est de 1000 Hz, afin d'obtenir ce même débit binaire?
- Quel serait la réponse aux précédentes questions si le signal était quadrivalent au lieu de bivalent ?

4. Une image TV numérisée doit être transmise à partir d'une source qui utilise une matrice d'affichage de 450x500 pixels, chacun des pixels pouvant prendre 32 valeurs d'intensité différentes. On suppose que 30 images sont envoyées par seconde.

- Quel est le débit D de la source ?

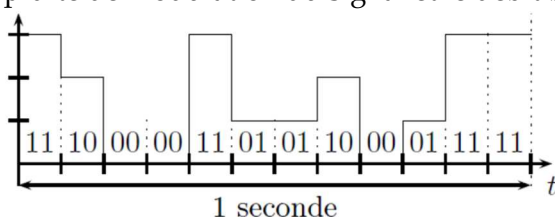
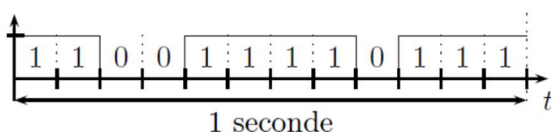
L'image TV est transmise sur une voie de largeur de bande 4,5 MHz et un rapport signal/bruit de 35 dB.

- Déterminer la capacité de la voie.

5. Quel est le temps de transfert d'un message de taille de 100 bits transmis à un débit égale 2400 bit/s sur une paire torsadée d'une longueur de 100 km avec un temps de propagation de 10 μ s/km.

6. Dans un système de transmission numérique de voix téléphonique, le débit de la voix numérisée est de 32 Kbits/s. Le débit symbole est de 16KHz, quel est la taille de l'alphabet des symboles nécessaire pour la modulation de la voix numérisée ?

7. Donnez, dans les deux cas suivants, la valence, la rapidité de modulation du signal et le débit binaire.



Solutions

1. Réponses :

- Une source numérique génère des messages appartenant à un alphabet discret et fini à des instants particuliers (temps discret). Exemples de sources numériques : Parole, vidéo, ordinateurs, Fax, etc.
 - Rôle fondamental d'un codeur de source est de trouver une représentation plus « économique » de l'information de source qui est redondante → Exploiter cette redondance pour réduire de façon significative le débit binaire généré par la source.
 - Le codage de canal protège les messages des distorsions générées par le « bruit » du canal. Le but fondamental du codeur de canal, consiste à réduire la probabilité d'erreur.
 - La redondance de source est générée par la nature de l'information source. La redondance de canal est créée par le concepteur.
 - Le vecteur de l'information est un signal analogique : un courant, une tension ou une onde électromagnétique. Le rôle du modulateur consiste à adapter la nature numérique de l'information à une représentation analogique. Le signal porteur est analogique, l'information qu'il véhicule est numérique.
 - Le processus de conversion A/N se réalise en deux étapes : échantillonnage suivi d'une quantification.
- Parole humaine → largeur de bande à 4 kHz. Pour minimiser la distorsion due à la quantification on utilise → résolution de 8 bits/échantillon, ce qui génère un débit binaire net de : $D = 2 \times 4 \text{ kch/s} \times 8 \text{ bit s/ech} = 64 \text{ kb/s}$.

2. Débit binaire D (bits/s) : nombre d'éléments binaires transmis par seconde.

- Rapidité de modulation R (bauds) : inverse de l'intervalle significatif Δ . $R = 1/\Delta$ bauds
- Si V (ou M) désigne la taille de l'alphabet de modulation, $D = R \log_2 V = R \frac{\ln V}{\ln 2}$
- Formule de Nyquist : borne la rapidité de modulation maximum $R_{\max}$ sur un support (modélisé par un filtre passe-bas) de bande passante B.
- Capacité de transmission est donnée par la relation de Shannon : $C = B \times \log_2[1 + (S/N)] = (3400 - 300) \times \log_2(1 + 1000) \approx 3100 \times 3,32 \log_{10}(1000) = 3100 \times 3,32 \times 3 = 30\,876 \text{ bit/s}$
- valence du signal → $N = 4$ (0, +V, +2V et +3V) ; Nbre de bits transportés durant une période → $B = \log_2 4 = 2 \text{ bits}$; vitesse de modulation → $R = 1/\Delta = 1/10^{-3} = 1000 \text{ bauds}$; (le signal d'horloge a donc une fréquence de 1 kHz) ; le débit → $D = R \times B = 2000 \text{ bit/s}$.

3. Signaux transmis sont binaires => rapidité de modulation = débit binaire = 9600 bits/s.

Par Shannon $C = B \log_2(1+S/N)$ donc $9600 = 1000 \log_2(1+S/N)$ et $S/N = 775$ d'où $S/B = 29 \text{ dB}$

Si la valence est 4, chaque valeur du signal sur le canal de transmission peut être utilisé pour transporter 2 bits. Donc le débit binaire est deux fois plus élevé que la rapidité de transmission. rapidité de modulation = 4800 bauds. Même SNR

4. Volume V = 33 750 000 bits ; le débit D est D = 33,75 Mbits/s.

$$C = 2W \log_2(1 + S/B)^{1/2}. C = 2W \log_2(1 + P_s/P_B)^{1/2}$$

$$P_s/P_B = \exp[(\ln(10)/10) \cdot S/B] = 3162 \rightarrow C = (9/2) \cdot (\ln(3163)/\ln(2)) = 52 \text{ Mbits/s.}$$

$$\text{Avec } S/B = 30 \text{ dB} \rightarrow C = 44,8 \text{ Mbits/s pour } S/B = 20 \text{ dB} \rightarrow C = 29,96 \text{ Mbits/s.}$$

5. - Temps de transmission ou d'émission (T_e) :

$$T_e = \text{longueur du message} / \text{vitesse de transmission} = Q / D = 100 / 2\,400 = 42 \text{ ms}$$

- Temps de propagation (T_p) : Temps nécessaire à un signal pour parcourir un support d'un point à un autre

$$T_p = 10 \times 100 = 1\,000 \mu\text{s} = 1 \text{ ms} \rightarrow \text{temps de transfert du message dans cette voie égale: } T_{tr} = 42 + 1 = 43 \text{ ms}$$

6. $R = 16 \text{ K symboles/s} \rightarrow \log_2 V = D/R \rightarrow V=4$

$N = \log_2(D/R)$, où D est le débit de la voix numérisée (32 Kbits/s) et $R=D_s$ est le débit symbole → $N = \log_2(32\,000 / 16) = \log_2(2000) \approx 11.29 \rightarrow$ taille d'alphabet de 12 symboles.

$$7. V=2 \rightarrow D = \frac{1}{T_b} = 12 \text{ bits/s}, R = D, V=4 \rightarrow D = \frac{1}{T_b} = 24 \text{ bit/s} R = \frac{D}{\log_2 V} = 12 \text{ bauds} = 12 \text{ symb/s}$$

TD n°3 : Transmission numérique en bande de base - Code en lignes

1. Répondre aux questions suivantes :

- Définir la transmission en bande de base.
- Quel est le but du codage en ligne ?
- Quel est le rôle du filtre de mise en forme ?
- Quelles sont les principales difficultés rencontrées dans la transmission directe d'une information en ligne ?
- Quelles sont les problèmes rencontrés avec les codes NRZ ?
- Quel est l'inconvénient majeur des codes unipolaires ?
- Quel est le principal intérêt des codages de Manchester, Manchester différentiel et Miller ?
- Comment se fait la transmission du signal d'horloge ?

2. On considère le message binaire suivant: **010011101010**

On souhaite transmettre ce message en bande de base avec un débit binaire $D_b = 100$ kbits/seconde. Calculer la période symbole T et tracer les signaux physiques en bande de base obtenus avec les codes suivants:

- o en NRZ unipolaire,
- o RZ unipolaire,
- o NRZ polaire,
- o RZ polaire,
- o Manchester,
- o 4-Aires, 8-Aires,
- o RZ bipolaire.

3. Soit le signal binaire suivant : **111000011100101111100001010110**

- Proposer un code de Gray pour $M = 4$ symboles
- Donner la séquence M -aire associée au signal binaire.
- Même question pour $M = 8$ symboles.
- Si $D_b = 12$ Kbit/s, que vaut le débit symbole pour les 2 cas précédents ?

4. On veut représenter un signal analogique $v(t)$ l'aide de la modulation par impulsions d'amplitudes (MIA), en utilisant un code en ligne NRZ polaire. Le signal MIA doit être transmis dans un canal dont la largeur de bande est strictement limitée 4 KHz. Pour ce faire on utilise un quantificateur uniforme 16 niveaux de quantification et un filtre de mise en forme du signal de bande $0.8 \times D_s$, où D_s est le débit des symboles.

Sachant que le code en ligne est un NRZ polaire :

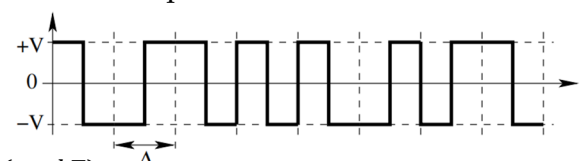
- Qu'elle est la relation entre le débit symbole D_s et le débit binaire D_b .
- Déterminer le débit binaire D_b maximal du signal MIA pour pouvoir le transmettre dans la bande du canal.
- Reprendre les deux questions mais cette fois avec un code en ligne 4 niveaux d'amplitude.

5. Codez la séquence de bits **010011101010** en utilisant :

- o le codage RZ bipolaire;
- o le codage NRZ bipolaire (AMI) ;
- o le codage HDB3 ;
- o le codage de Miller ;

On observe le signal ci-après. Sachant que le codage utilisé est le Manchester et que $\Delta = 10^{-8}$ secondes, donner :

- la séquence binaire transmise ;
- le débit offert par le support de transmission correspondant.



6. On considère le signal de transmission numérique : $a(t) = \sum_k a_k \delta(t - kT)$

Où a_k est une suite de symboles (réels ou complexes) supposée stationnaire au second ordre.

$$\mu_a = \{a_n\} \text{ et } C_a(k) = E\{(a_n - \mu_a)(a_{n-k} - \mu_a)^*\}$$

On rappelle la formule de Bennett $S_a(f) = T \text{FTD}[R_a(k)] = T \text{FTD}[C_a(k) + \mu_a^2]$ et $S_e(f) = \frac{1}{T_b} |H(f)|^2 S_a(f)$

$$S_a(f) = \sigma_a^2 + 2\sigma_a^2 \sum_{k=1}^{\infty} C_a(k) \cos(2\pi k f T_b) + \frac{\mu_a^2}{T_b} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{k}{T_b}\right)$$

- Donner une condition nécessaire pour que le spectre de $a(t)$ contienne des composantes harmoniques aux fréquences multiples de $1/T_b$? Quel intérêt cela a-t-il ?
- Donner une condition suffisante pour que le spectre de $a(t)$ soit nul autour de la fréquence 0. Quel intérêt présente cette propriété ?
- Donner les DSP des codes : NRZ unipolaire, NRZ polaire, RZ unipolaire, RZ polaire, Biphase (Manchester) et NRZ M-aires. On supposera une forme d'onde rectangulaire l'amplitude $V=1$ de durée T_b .
- Quelle est l'utilité de connaître le spectre (ou tout au moins l'étendue spectrale) d'un code numérique dans le cadre d'une transmission numérique sur un canal ?

7. On considère un message binaire dont les symboles a_k sont i.i.d. et équiprobables. Ce message est modulé linéairement à l'aide d'une forme d'onde RZ $h(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 \leq t \leq T/2 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$

où T est la période symbole.

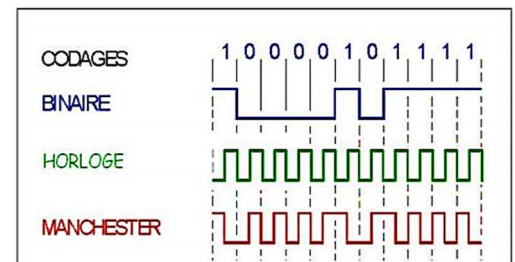
- Calculer le spectre du signal modulé dans les deux cas suivants:
 - o $a_k = \pm a = \pm 1$.
 - o $a_k = 2a$ ou 0.
- Commenter la présence éventuelle de raies spectrales.

8. On souhaite transmettre un flot d'images continu entre deux équipements. Chaque image possède 200×250 pixels. Elle est codée en RVB. Chaque couleur est codée sur 256 niveaux. La source émet un flot d'images identique à celui de la télévision soit 25 images par seconde. On fait l'hypothèse qu'il n'y a aucun protocole additionnel.

- Calculer le débit binaire D

On rajoute sur le codage RZ précédent, un codage de type Manchester.

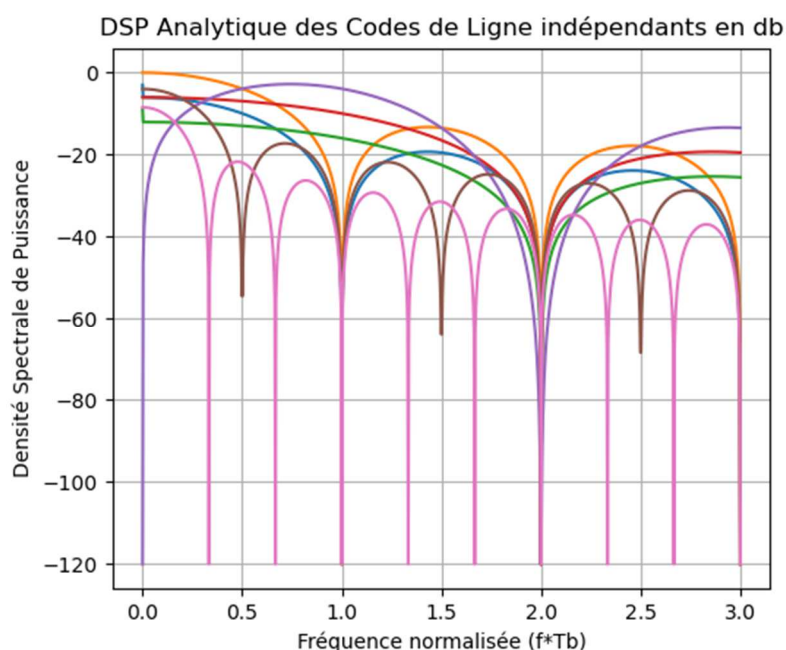
- En déduire le nouveau débit binaire D' apparent de la source.
- Quel avantage apporte le codage Manchester ?



9. Calculer l'énergie symbole E_{sym} et l'énergie bit pour E_{bit} pour :

- o Dictionnaire binaire antipolaire $a_k = \pm 1$
- o Dictionnaire 4-Aires $a_k = \{-3, -1, 1, 3\}$

10. Sont données ci-dessous les DSP des codes en lignes dépendants. Identifier les en justifiant vos réponses.

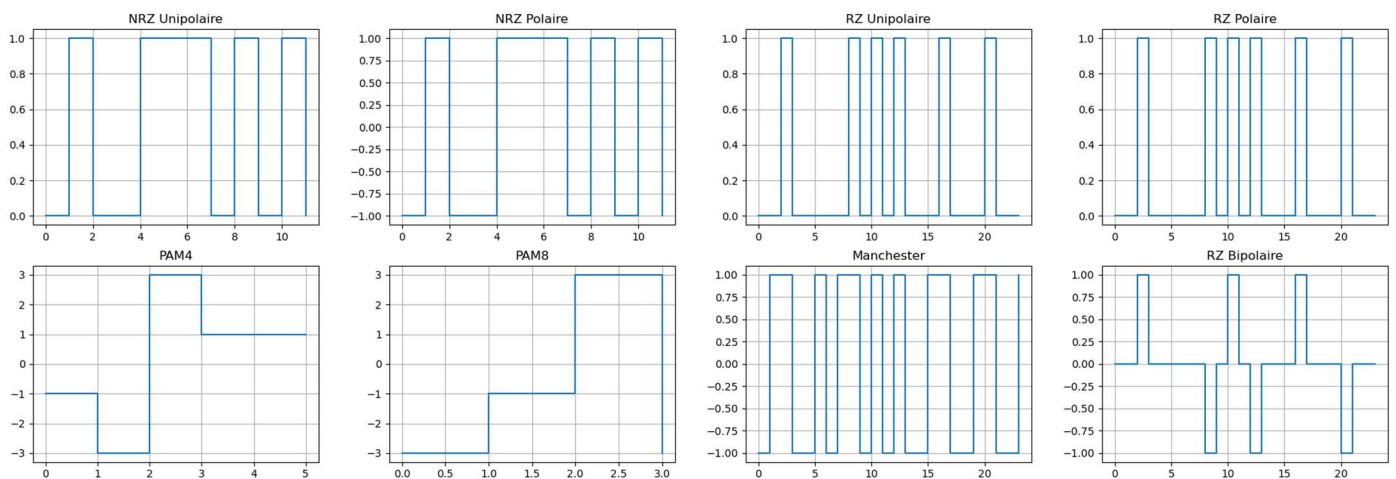


Solutions

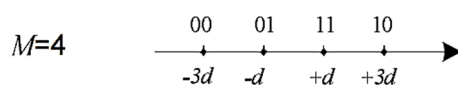
1. Réponses :

- Transmission en bande de base : Signifie que les symboles à émettre dans le canal de transmission ne subissent pas une translation de leur spectre autour d'une fréquence porteuse. Dans le cas d'une transmission par onde modulée, les symboles à émettre modulent une porteuse.
- Le codage consiste à faire correspondre une forme de signal électrique ou optique à un ou plusieurs éléments binaires de la source. Il est dit de ligne puisqu'il consiste à adapter la forme du signal à la ligne, ou plus généralement au milieu de propagation. Son but est de :
 - o Produire un signal sans composante continue qui puisse être transmis sur les lignes.
 - o Enrichir le signal en transitions pour faciliter la récupération d'horloge dans les régénérateurs. Les longues suites de 0 ou de 1 doivent donc être codées pour éviter des états durables sans transition.
 - o Concentrer ou de déplacer la puissance dans une plage spectrale adaptée au milieu de transmission.
- La mise en forme des impulsions est le processus de modification de la forme d'onde d'une impulsion transmise afin d'optimiser le signal en fonction de l'objectif visé ou du canal de communication.
- Les principales difficultés rencontrées dans la transmission directe d'une information en ligne sont dues à la limitation de la bande passante dans les basses et les hautes fréquences ainsi. Les distorsions d'amplitudes et de phase doivent pouvoir être corrigées. Par ailleurs, le signal d'horloge associé aux données doit pouvoir être correctement reconstitué, quelle que soit la séquence de données binaires transmise.
- Les problèmes habituellement rencontrés avec les codes tels que NRZ, NRZI ou Miller sont : la perte de synchronisation, ligne coupée (à cause d'une rafale de 0), sensibilité aux parasites, affaiblissement du signal car moyenne non nulle.
- La composante continue (valeur moyenne non nulle) qui ne transporte aucune information et provoque un échauffement (effet Joule) des organes d'extrémité.
- Le codage Manchester est un codage synchrone, ce qui signifie que, outre les données à transmettre, les signaux transmis intègrent également l'horloge de synchronisation nécessaire à leur décodage. Mise en œuvre simple, codage et décodage faciles, pas de composante continue (donc pas de perte de synchronisation sur les suites de symboles identiques). Le code de Miller est simple à mettre en œuvre, il a une bande passante réduite, ne présente pas de perte de synchronisation sur les suites de symboles identiques.
- La transmission du signal d'horloge peut être réalisée soit indépendamment du signal de données, soit en utilisant les transitions du signal codé.

2.



3.



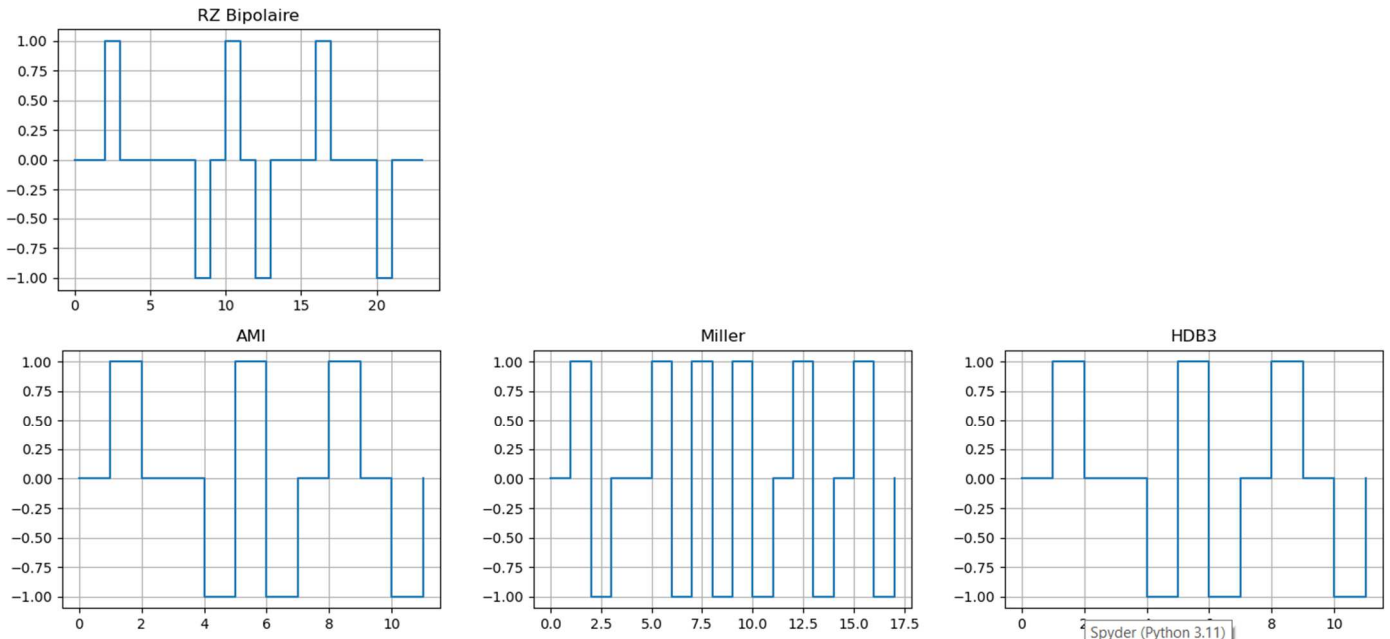
$M=8$: Binaire $\rightarrow$ 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111 Gray $\rightarrow$ 000, 001, 011, 010, 110, 111, 101, 100

Pour $M = 4$, $D_s = 12/2 = 6$ bauds ; pour $M = 8$, $D_s = 12/3 = 4$ bauds

4. $D_s = D_b$; $0.8 \times D_s \leq 4000$; $0.8 \times D_b \leq 4000$; $D_b \leq 4000/0.8 = 5\text{Kbits/s}$. Débit maximal est 5 Kbits/s.

$D_s = D_b / \log_2(4)$ $0.8 \times D_s \leq 4000$; $0.8 \times D_b / 2 \leq 4000$; $D_b \leq 8000/0.8 = 10\text{Kbits/s}$

5.



Séquence binaire transmise $\rightarrow 10111001$. Valence du signal $\rightarrow N = 2$; vitesse de modulation $\rightarrow R = 1/\Delta$
 $R = 1/10^{-8}$; débit $D = R \times \log_2 N = R = 100000000 \text{ bit/s} = 100 \text{ Mbps}$.

6. Sachant que $S_e(f) = \frac{1}{T_b} |H(f)|^2 S_a(f)$ avec $S_a(f) = \sigma_a^2 + 2\sigma_a^2 \sum_{k=1}^{\infty} C_a(k) \cos(2\pi k f T_b) + \frac{\mu_a^2}{T_b} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{k}{T_b}\right)$

- Si les symboles sont à moyennes non nulles $\rightarrow$ La raie à $1/T_b$ permet la récupération de l'horloge

- Si $\int_0^{T_b} a(t) dt = 0 \rightarrow S_a(f = 0) = 0$ si $\rightarrow$ Aucun problème d'affaiblissement de signal et pas de composant DC.

NRZ unipolaire $\rightarrow S_e(f) = \frac{V^2 T_b}{4} \text{sinc}^2(T_b f) + \frac{V^2}{4} \delta(f)$ NRZ polaire $\rightarrow S_e(f) = V^2 T_b \text{sinc}^2(f T_b)$,

RZ unipolaire $\rightarrow S_e(f) = \frac{V^2 T_b}{16} \text{sinc}^2(T_b f/2) + \frac{V^2}{16} \delta(f) + \frac{V^2}{16} \sum_{k \geq 1} \frac{V^2}{(k\pi + 1/2)^2} \delta\left(f - \frac{2k+1}{T_b}\right)$

RZ polaire $\rightarrow S_e(f) = \frac{V^2 T_b}{4} \text{sinc}^2(T_b f/2)$

Biphase (Manchester) $\rightarrow S_e(f) = V^2 T_b \sin^2\left(\frac{\pi f T_b}{2}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{f T_b}{2}\right)$ NRZ M-aires $\rightarrow S_e(f) = \frac{M^2-1}{3} V^2 T_b \text{sinc}^2(T_b f)$

- La connaissance de l'étendue spectrale d'un code numérique, c'est-à-dire la bande de fréquences concernée par ce code, permet de définir la « bande passante » nécessaire (supérieure ou égale à la précédente) qu'il faut prévoir sur le canal de transmission.

7. Formule de Bennett avec moyenne des symboles nuls : $S_e(f) = \frac{a^2 T_b}{4} \text{sinc}^2\left(\frac{f T_b}{2}\right)$

Formule de Bennett avec moyenne des symboles non nuls : $S_e(f) = \frac{a^2 T_b}{4} \text{sinc}^2\left(\frac{f T_b}{2}\right) + \frac{a^2}{4} \sum_n \text{sinc}^2\left(\frac{n}{2}\right) \delta\left(f - \frac{n}{T_b}\right)$

Dans le cas non centré, raies spectrales en 0 et les multiples impairs de $1/T_b$

8. Débit binaire : 200×250 pixels. Chaque pixel RVB et chaque couleur 256 niveaux $\Rightarrow 8$ bits par couleur soit $8 \times 3 \times 25$ images par seconde $D1 = 200 \times 250 \times 8 \times 3 \times 25 = 30000000$ bits par seconde = 30 Mbits par seconde. Donc 30 MBauds codage RZ. Pour un codage Manchester, il faut introduire une horloge qui permet le codage, cette horloge à une période telle que : 1 période = la durée d'un bit. Ces variations sont à la même fréquence que celle de l'horloge. La fréquence est doublée.

Le code Manchester à la différence d'un RZ (ou NRZ simple) est autoporteur de son horloge.

9. Polaire $\rightarrow E_{sym} = \frac{1}{M} \sum_i E_{a_i} E_h = \frac{1}{2} (1 + 1) E_h = E_h$ et $E_{bit} = \frac{E_{sym}}{\log_2 M} = \frac{1}{2 \log_2 2} \sum_i E_{a_i} E_h = \frac{E_h}{\log_2 2} = E_h = E_{sym}$

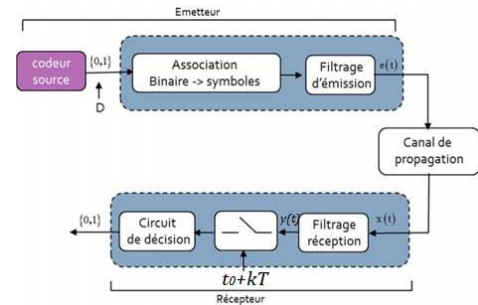
4-Aires $\rightarrow E_{sym} = \frac{1}{M} \sum_i E_{a_i} E_h \rightarrow E_{sym} = \frac{1}{4} (9 + 1 + 9 + 1) E_h = 5 E_h$ et $E_{bit} = \frac{E_{sym}}{\log_2 4} = \frac{5}{2} E_h$

10. Traité en cours

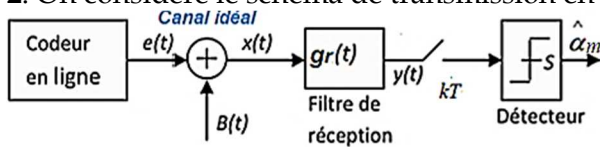
TD n°4 : Récepteur Optimal et performances de transmission sur un canal idéal

1. Répondre aux questions suivantes :

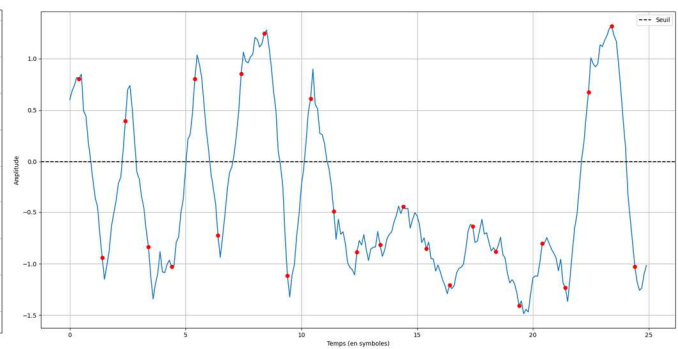
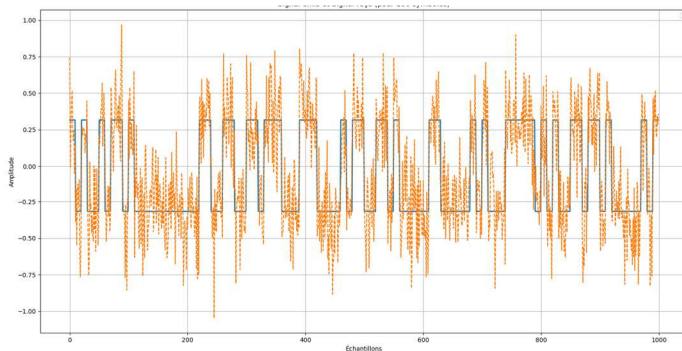
- Citer les sources de bruit interne et externe pouvant affecter une transmission.
- Expliquer les étapes de réception données dans le schéma ci-contre.
- Qu'effectue le récepteur pour récupérer les données initiales ?
- Pourquoi considère-t-on en pratique que le bruit au niveau du récepteur est Gaussien.
- Une transmission numérique est réalisée sur un canal à BBAG. En sortie de l'échantillonneur, on obtient une séquence de variables aléatoires $y(t_0 + kT)$ qui contient la séquence des messages émis par la source. Quelle est sa loi de probabilité? Donner son expression en définissant chaque paramètre.
- Le bruit est-il blanc à la sortie du filtre adapté? Exprimer sa variance.



2. On considère le schéma de transmission en bande de base ci-dessous :



- Identifier chacun des signaux sur le schéma de transmission.
- Identifier les dans les graphes suivants.



3. On transmet des bits $\{0, 1\}$ avec les signaux suivants $-V, V$ sur un intervalle de durée T_b chacun.

Le canal est AWGN avec une densité spectrale de puissance $\frac{N_0}{2}$

- Donnez l'expression des filtres adaptés pour cette transmission.
- Calculez le SNR (rapport signal-sur-bruit) en sortie du filtre adapté à $t = T_b$.
- Déterminez le seuil de décision optimal et l'expression de la probabilité d'erreur binaire P_e .

4. On considère la transmission d'un code en ligne à travers un canal AWGN. On veut déterminer l'expression du filtre adapté à la réception pour chacun des codes en ligne suivants : RZ polaire, Biphase (Manchester).

- Quel est le rôle du filtre adapté ?
- Déterminer et tracer pour chaque code le filtre adapté correspondant.
- Donner le schéma du filtre de réception avec 2 filtres puis avec 2 corrélateurs en précisant l'expression des filtres.
- Peut-on se contenter d'un seul filtre et d'un seul corrélateur ? Si oui donner le schéma

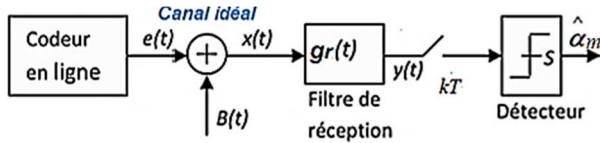
5. On considère le codage en ligne suivant :

$$\begin{cases} a_k = h_1(t) & \text{si } \alpha_k = 1 \\ a_k = h_2(t) & \text{si } \alpha_k = 0 \end{cases} \quad \text{avec } h_1(t) = V \quad t \in [0, T_b] \quad \text{et } h_2(t) = \begin{cases} V & \text{si } t \in [0, T_b/2] \\ 0 & \text{si } t \in [T_b/2, T_b] \end{cases}$$

- Tracer le code en ligne obtenu pour le code 10011010

- Donner le schéma du filtre de réception.
- Déterminer et tracer les 2 filtres de réception.
- Peut-on se contenter d'un seul filtre et d'un seul corrélateur ?

6. On considère une transmission binaire dans un canal idéal (non limité en fréquence) sans IES



- Donner l'expression de $y(t)$ en sortie du filtre de réception.
- Déterminer, en fonction de la DSP du bruit supposé blanc $B(t)$ de variance σ_B^2 et du gain du filtre de réception, l'expression de la variance du terme associé au bruit $b(t) = B(t) * g_r(t)$.
- Pour choisir le paramètre de décision S , on se base sur un critère quel est-il ?
- Déterminer la valeur optimale de ce seuil lorsque les probabilités des symboles sont équiprobables
- On suppose les valeurs suivantes de la probabilité du premier symbole : $p(a_1) = 0.5$, $p(a_1) = 0.7$, $p(a_1) = 0.2$. Déterminer la valeur optimale du seuil en considérant que l'énergie de l'onde est normalisée ($E_h = 1$) et commenter.
- Déterminer la valeur du seuil optimal ou des seuils optimaux de détection pour les codes NRZ unipolaire, RZ polaire, RZ unipolaire, Manchester, 4-PAM, 8-PAM, AMI, HDB3, RZ bipolaire, Miller.

7. La probabilité d'erreur est définie par $P_e = Q\left(\frac{(a_1 - a_0)E_h}{2\sigma_b}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{(a_1 - a_0)^2 E_h}{2N_0}}\right)$ où E_h est l'énergie de l'onde de forme en présence d'un bruit blanc additif de DSP $N_0/2$. Calculer en fonction de Q cette erreur pour :

- o Un code NRZ unipolaire
- o Un code NRZ polaire
- o Un code RZ unipolaire
- o Un code RZ polaire
- o Un code de Manchester
- o Un code 4-PAM (4-Aires)

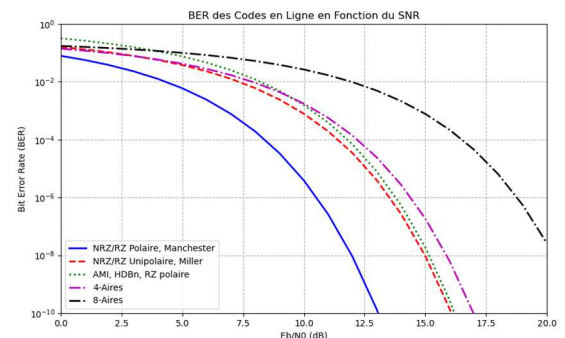
8. Un signal polaire NRZ est constitué d'amplitude $+V$ et $-V$ sur une durée T . Un bruit blanc additif de DSP $\frac{N_0}{2} = 10^{-5} \text{ W/Hz}$ s'ajoute au signal. Déterminer le débit maximal transmissible avec une probabilité d'erreur $P_e \leq 10^{-4}$

9. On considère une transmission NRZ M-aire en bande de base sur un canal bruité (densité spectrale du bruit $\sigma_B^2 = \frac{N_0}{2}$ avec un émetteur de puissance P . L'objectif est de transmettre avec un débit binaire D maximal et une probabilité d'erreur binaire $P_{eb} < 10^{-4}$

On suppose que la bande passante du canal est illimitée.

- Pour chaque valeur de $M : 2, 4, 8$ déterminer la valeur minimale de E_b/N_0 . ($M=2 \rightarrow$ NRZ polaire)
- Quelle valeur de M permet un débit maximum ?

Solutions

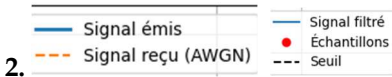


1. - Bruits externes : rayonnements divers captés par l'antenne pour les transmissions en espace libre, interférences éventuelles entre les différents utilisateurs du milieu de transmission, bruits d'origine industriels tels ceux des ligne à haute tension.

Bruit interne : origine le mouvement brownien des électrons dans les composants passifs (résistance) et les composants actifs (amplificateur, filtre, mélangeur...).

- o Filtre de réception : Adapté au filtre de mise en forme utilisé lors de l'émission. Il vise et à maximiser le rapport signal sur bruit et à minimiser les interactions entre symboles
- o Echantillonnage : Transformation du signal physique en signal discret. Il nécessite une synchronisation sur le temps d'horloge.

- Décision : A partir des valeurs échantillonnées, on retrouve les symboles émis. Elle est sensible au bruit ajouté par le canal.
 - Décodage : on transforme les symboles détectés en bits d'information.
- C'est un bon modèle pour le type de bruit provenant de nombreuses sources naturelles, comme les vibrations thermiques des atomes dans le silicium des composants RF de notre récepteur. Le théorème de la limite centrale nous dit que la somme de nombreux processus aléatoires aura tendance à avoir une distribution gaussienne, même si les processus individuels ont d'autres distributions. En d'autres termes, lorsqu'un grand nombre d'événements aléatoires se produisent et s'accumulent, le résultat semble approximativement gaussien, même si les événements individuels n'ont pas une distribution gaussienne.
- Gaussien (SLIT) $\rightarrow y(t_0)$: une v.a. Gaussienne de moyenne $a_m E_h$, de variance $\sigma_b^2 = \frac{N_0}{2} E_h$ ou $\frac{N_0}{2}$ est la variance du bruit additif Gaussien $B(t)$.
- Non, il est coloré. $\rightarrow \sigma_b^2 = \sigma_B^2 E_h = \frac{N_0}{2} E_h$ où h est la forme d'onde employée et E_h son énergie

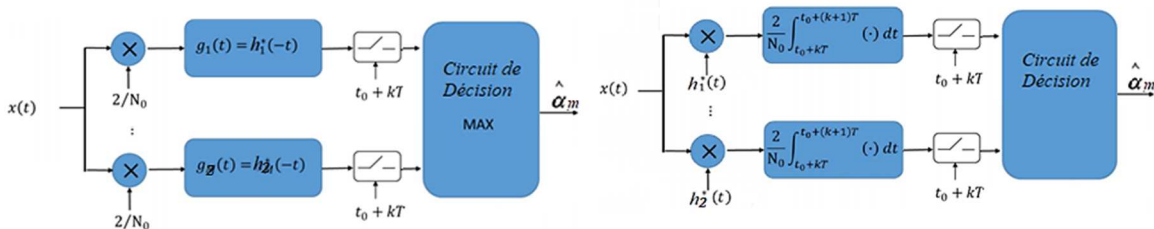


$$3. g_r(t) = h^*(T_b - t) = V\pi_{T_b}(t - \frac{T_b}{2}), E_b = V^2 T_b = E_h \quad SNR_{t_0} = \frac{1}{\sigma_B^2} \int_{-\infty}^{\infty} |h_m(t)|^2 dt = \frac{E_{h_m}}{\sigma_B^2} = \frac{2E_b}{N_0}$$

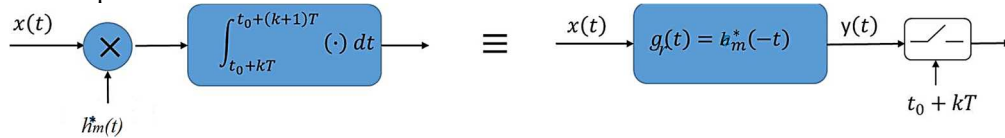
$$S_{opt} = \frac{a_0 + a_1}{2} E_h = \frac{V-V}{2} E_h = 0 \quad P_e = Q\left(\sqrt{\frac{(a_1 - a_0)^2 E_h}{2N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

4. Maximiser la puissance du signal pour minimiser les erreurs lors de la détection.

- Inverser forme d'onde (Retournement temporel) puis décalage de T pour obtenir un signal causal.



- Oui forme d'onde unique.



- Voir cours

$$5. g_{r1}(t) = h_1(T_b - t) \quad g_{r2}(t) = h_2(T_b - t)$$

- Forme d'onde différente

$$6. \text{Canal idéal } y(t) = \overbrace{g_r(t) * h_m(t)}^{r_m(t)} + \overbrace{g_r(t) * B(t)}^{b(t)} = \overbrace{a_m g_r(t) * h(t)}^{r(t)} + \overbrace{g_r(t) * B(t)}^{b(t)}$$

$$\sigma_b^2 = E\{b^2\} - \mu_b^2 = R_b(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_b(f) df = \int_{-\infty}^{\infty} S_B(f) |G(f)|^2 df = \sigma_B^2 \int_{-\infty}^{\infty} |G(f)|^2 df$$

$$\text{Filtrage adapté } \rightarrow g_r(t) = h^*(-t) \rightarrow \sigma_b^2 = \sigma_B^2 \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df = \sigma_B^2 E_h$$

- Le détecteur du maximum de vraisemblance est le critère utilisé pour choisir le paramètre de décision S . Il est basé sur la minimisation de la probabilité d'erreur P_e .

$$- S_{opt} = \frac{a_0 + a_1}{2} E_h - \frac{N_0}{2(a_1 - a_0)} \ln \frac{p_1}{p_0} \quad \text{On a dans cette exercice } E_h = 1, p(a_1) = 0.5 = p(a_0) \rightarrow S_{opt} = \frac{a_0 + a_1}{2},$$

$$p(a_1) = 0.7 > S_{opt} = \frac{a_0 + a_1}{2} - 0.436 \frac{N_0}{(a_1 - a_0)} \quad p(a_1) = 0.7 > S_{opt} = \frac{a_0 + a_1}{2} + 0.693 \frac{N_0}{(a_1 - a_0)} \quad \text{Le seuil } \rightarrow \text{symbole moins probable}$$

- Voir cours

$$7. P_e = Q\left(\frac{(a_1 - a_0)E_h}{2\sigma_b}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{(a_1 - a_0)^2 E_h}{2N_0}}\right) \quad \text{Voir cours}$$

$$8. P_e = Q\left(\sqrt{\frac{2V^2 T}{N_0}}\right) \leq 10^{-4}$$

$$9. \text{4-Aires } P_e = \frac{3}{4} Q\left(\sqrt{\frac{4E_b}{5N_0}}\right) \quad \text{8-Aires } P_e = \frac{7}{12} Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{7N_0}}\right)$$

$$M=2 \rightarrow E_b/N_0 > 8.5 \quad M=4 \rightarrow E_b/N_0 > 12.5 \quad M=8 \rightarrow E_b/N_0 > 17 \quad \text{Débit max pour } E_b/N_0 \rightarrow M=2.$$

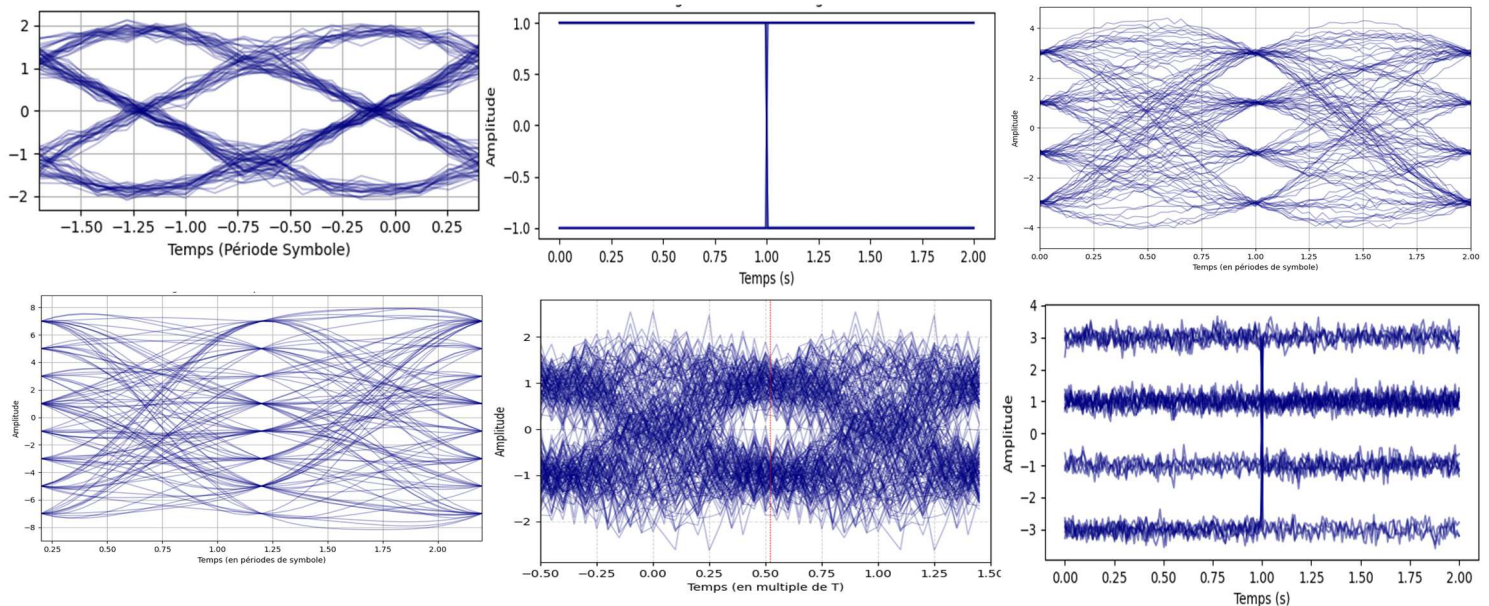
TD n°5 : Transmission sur canal limité & Interférence entre symboles

1. Répondre aux questions suivantes

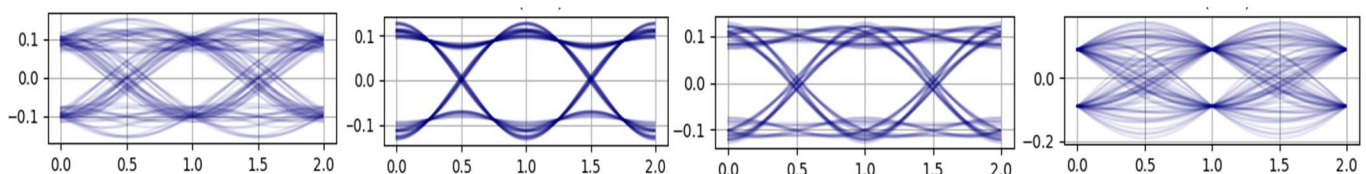
- Définir l'IES.
- Comment y remédier.
- Donner le critère de Nyquist.
- Quelle condition sur le débit symbole et la bande impose ce critère ?
- Quel est l'intérêt du filtrage de Nyquist ?
- Qu'appelle-t-on le diagramme de l'œil et quelle est son utilité ? Quelle particularité présente ce diagramme quand l'IES=0 ?
- Comment annuler l'IES aux instants d'échantillonnage ?
- Décrire en fréquence les fonctions dites en cosinus-surélevé. Qu'appelle-t-on le "roll-off" ?
- Comment le roll-off intervient-il sur le diagramme de l'œil ?
- Définir la distorsion maximale.
- Définir l'efficacité spectrale ? Donner son expression en fonction de la taille de l'alphabet de modulation et du roll-off.

2. Déterminez, à partir des diagrammes de l'œil ci-dessous :

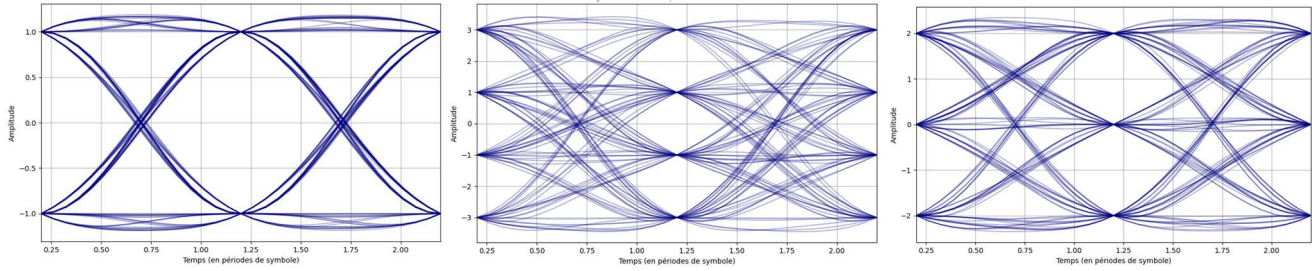
- le nombre de symboles du message ;
- le meilleur instant d'échantillonnage t_0 ;
- la meilleure valeur de seuil ;
- s'il y a des IES à t_0 ;
- s'il y a des IES ;
- s'il y a du bruit.



3. Les diagrammes de l'œil de la figure ci-dessous correspondent à des mises en forme avec un filtre en cosinus surélevé (CS) avec roll-off α de 0, 0.25, 0.75 et 1. Classez les figures par α croissants.

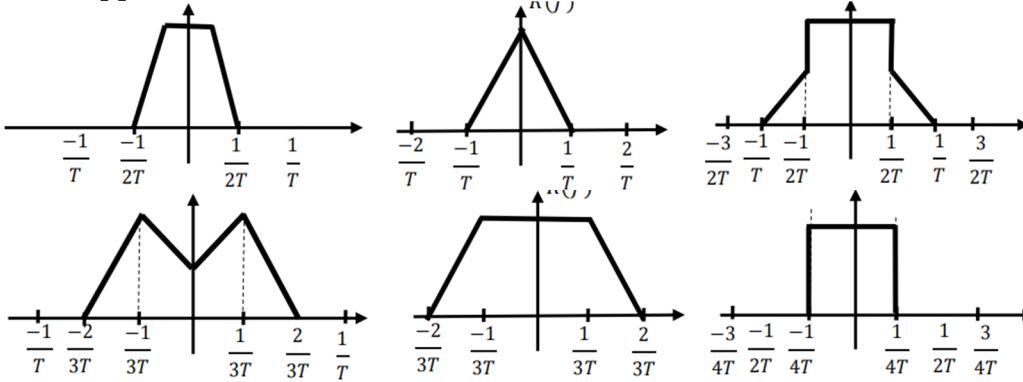


4. Pour les diagrammes de l'œil des figures ci-dessous, déterminer : la rapidité de modulation, l'ordre de la modulation, la résistance à une erreur de synchronisation.



5. Dans un système de communication, les filtres d'émission $H_e(f)$ et de réception $G_r(f)$ vérifient $H_e(f) = E(f)G_e(f)$ et $R(f) = G_r(f)H_e(f)$.

- On suppose les formes suivantes de $R(f)$ et on demande si elle vérifie le critère de Nyquist pour le pas T .



6. On considère $y(t)$ dont $Y(f) = X(f) * R(f)$ où $R(f) = C \Pi_{\frac{1}{T}}(f)$, montrer que $r(t) = C \frac{\sin(\frac{\pi t}{T})}{\pi t}$.

- Quelque propriété remarquable possède $y(t)$?
- On considère $X(f) = 2\cos\left(\frac{\pi f}{2B}\right) \Pi_{2B}(f)$, déterminer $x(t)$
- On pose $B = \alpha/2T$ où $0 < \alpha < 1$ et $C = T\pi/8B$, déterminer $y(t)$

7. On souhaite réaliser une chaîne de transmission en bande de base avec un filtre de mise en forme $h_e(t)$ et un filtre de réception $h_r(t)$ en racine de cosinus surélevé de paramètre α . Le canal utilisé a une bande passante limitée BP = 1 MHz. On souhaite transmettre avec un débit binaire de $D_b = 3.5$ Mbits/seconde.

- Que veut dire : Transmission en bande base.
- Quelle doit être la largeur de bande B du signal à transmettre ?
- Exprimer α en fonction de M, B et D_b .
- En utilisant l'inégalité $0 \leq \alpha \leq 1$, déterminer les tailles d'alphabet M et les paramètres α que l'on peut choisir.

8. On considère un canal passe-bas de bande 2400 Hz sur lequel on désire transmettre, sans IES aux instants d'échantillonnage, un débit de 3600 bits/s à partir d'une modulation de modulation utilisant une impulsion NRZ.

- Déterminer les filtres idéaux (IES nulle aux instants d'échantillonnage et minimum de probabilité d'erreur) d'émission et de réception.

9. Les données binaires à 9600 bits/s sont transmises en utilisant la modulation PAM-8 avec un système utilisant un filtre de roll-off. La réponse fréquentielle du système est de 2.4 kHz.

- Calculer la rapidité de modulation ?
- Calculer le facteur de roll-off du filtre ?

Solutions

1. Réponses :

- L'interférence entre symboles est la présence dans l'observation en sortie de l'échantillonnage (en sortie du filtre adapté) de termes associés à plus d'un seul symbole.

- On peut y remédier :

- Utiliser des filtres de Nyquist (ex. cosinus surélevé) pour éliminer l'IES aux instants d'échantillonnage.
- Implémenter un égaliseur (ex. égaliseur de ZF ou MMSE) pour compenser la distorsion du canal.
- Augmenter l'intervalle entre symboles (réduire le débit), mais cela diminue l'efficacité spectrale.

- Critère de Nyquist : si $r(t)$ désigne la réponse impulsionnelle totale de puis l'entrée du filtre d'émission jusqu'à la sortie du filtre de réception, on doit avoir : $\exists t_0$ tel que $\forall n, r(t_0 + nT) = r(t_0) \rightarrow R^{(t_0)}(f) = \begin{cases} T & |f| \leq 1/2T \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$

La condition est $B > D_s/2 = 1/2T$. Pour un cosinus surélevé $B > D_s (1 + \alpha)/2 = (1 + \alpha)/2T$

- Il supprime l'IES aux instants d'échantillonnage tout en optimisant l'utilisation de la bande passante. Cela permet une transmission à débit élevé sans interférence entre symboles.

- Le diagramme de l'œil est la superposition des trajectoires du processus aléatoire $y(t)$ en sortie du filtre de réception (associée aux trajectoires de la suite aléatoire des symboles). Cette superposition est observée sur 2 fois la durée symbole T . Utilité : Visualiser la qualité du signal (bruit, IES, synchronisation).

o L'ouverture verticale mesure les performances contre le bruit. Plus l'œil est ouvert en hauteur, plus il est facile de discriminer les deux symboles en présence de bruit et plus la probabilité d'erreur est faible.

o L'ouverture horizontale indique une résistance à un décalage des instants d'échantillonnage.

- En absence de bruit et dans la cas où l'IES est nulle aux instants d'échantillonnage, le diagramme de l'œil présente des trajectoires qui concourent en des instants espacés de T et en des ordonnées correspondant aux symboles de modulation.

- Pour annuler l'IES aux instants d'échantillonnage, on doit concevoir la chaîne de transmission (filtre d'émission + canal + filtre de réception) pour que la réponse globale satisfasse le critère de Nyquist. Par exemple le cosinus surélevé qui permet une répartition du filtrage à part égale entre l'émission et la réception.

- Le paramètre α défini dans le cosinus surélevé est appelé facteur de débordement/coefficient d'arrondi/'roll-off'. Il varie entre 0 et 1. Il contrôle la pente de transition en fréquence. Plus il est grand, plus le sera la bande en fréquence. Plus le "roll-off" est voisin de 1, plus le diagramme de l'œil s'ouvre horizontalement et donc la sensibilité aux erreurs de synchronisation diminue.

- La distorsion maximale est le maximum d'interférences destructives.

- L'efficacité spectrale : $\eta = \frac{D_b}{B}$. Elle mesure le débit binaire par unité de bande passante (en bit/s-Hz). Pour une modulation d'alphabet de taille M et un roll-off α Hz et un MIA avec une impulsion en cosinus surélevé $\rightarrow \eta = \frac{\log_2(M)}{1+\alpha}$

2.

	1	2	3	4	5	6
Nombre de symboles	2	2	4	8	2	6
Meilleur Instant t_0	-0.65	0.5	1.0	1.20	0.52	0.5
Valeur du seuil	0	0	-2, 0, 2,	-6, -4, 0, 2, 4, 6	0	-2, 0, 2,
IES	oui	non	oui	oui	oui	non
IES à t_0	non	non	non	non	non	non
Bruit	oui	non	oui	non	oui	oui

3. $\alpha = 0.25, \alpha = 1, \alpha = 0.75, \alpha = 0$

4. $M = 2 ; M = 4 ; M = 3$. $D_s = R = D_b / \log_2 M \rightarrow R = D_s = D_b, R = D_s = D_b/2, R = D_s = D_b / \log_2 3$;

- Par ordre décroissant de robustesse à une erreur de synchro : PAM2, PAM3 puis PAM 4.

L'influence du roll off : modifie l'ouverture du l'œil plus le roll-off est grand et plus l'œil est ouvert. Un œil ouvert permet un meilleur échantillonnage et on obtient donc un BER plus faible avec un roll off plus grand.

5. $R(f)$ vérifie Nyquist si la somme des périodes donne une constante : Non, Oui, Non, Non, Oui, Non.

6. $y(t) = r(t) \cdot x(t)$ $r(t)$ s'annule tous les $t = kT$ donc $y(t)$ vérifie le critère de Nyquist.

$$x(t) = \frac{1}{2\pi B} \frac{\cos(2\pi Bt)}{1 - \frac{1}{16}B^2t^2} \quad y(t) = \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t} \frac{\cos(\pi \alpha t/T)}{1 - 4\alpha^2 t^2/T^2}$$

7. Transmission en bande de base : envoyer un signal numérique directement sur le canal **sans modulation de fréquence** (pas de déplacement spectral autour d'une porteuse). Le signal occupe une bande de fréquences autour de 0 Hz. Elle est utilisée pour des canaux à bande limitée et des distances courtes (ex : câble Ethernet).

$B \leq 1\text{MHz}$. Avec des filtres *racine de cosinus surélevé* (paramètre α), la bande passante du signal est :

$$B = \frac{1+\alpha}{2T} = (1+\alpha) \frac{D_s}{2} = (1+\alpha) \frac{D_b}{2\log_2 M} \rightarrow \alpha = \frac{2B}{D_s} - 1 = \frac{2B\log_2 M}{D_b} - 1 \rightarrow \alpha = \frac{2B}{D_s} - 1 = \frac{4\log_2 M}{7} - 1 \rightarrow 0 \leq \alpha = \frac{4\log_2 M}{7} - 1 \leq 1$$

Soit $3.36 \leq M \leq 11.3 \rightarrow M=4$ ($\alpha = 0.143$) ou $M=8$ ($\alpha = 0.714$)

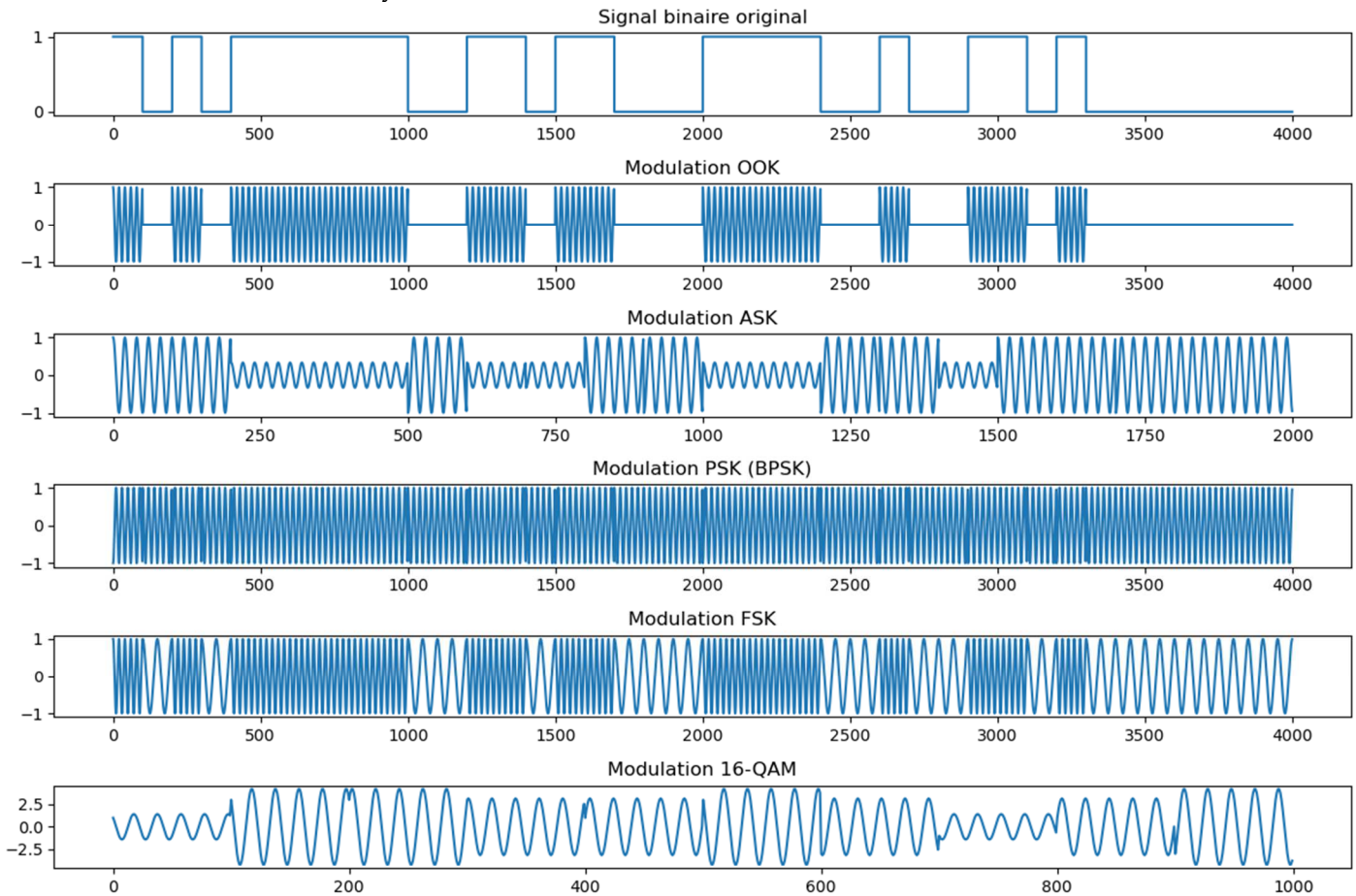
8. Pour annuler l'IES, on prend une fonction qui satisfait le critère de Nyquist, par exemple le cosinus surélevé. Comme il faut répartir entre émission et réception $\rightarrow G_r(f) = \sqrt{K}\sqrt{|R(f)|}$ $H_e(f) = \frac{1}{\sqrt{K}}\sqrt{|R(f)|}$

9. Rapidité de modulation : Modulation PAM-8 $\Rightarrow M = 8 \Rightarrow n = \log_2(8) = 3$ bits/sym $\rightarrow R_s = \frac{D}{n} = 3200$ sym/s

- Roll-off : $B = \frac{1+\alpha}{2T} = (1+\alpha) \frac{D_s}{2} \rightarrow \alpha = \frac{2B}{D_s} - 1 = 0.5$

TD n°6 : Transmission en bande étroite et modulation numérique

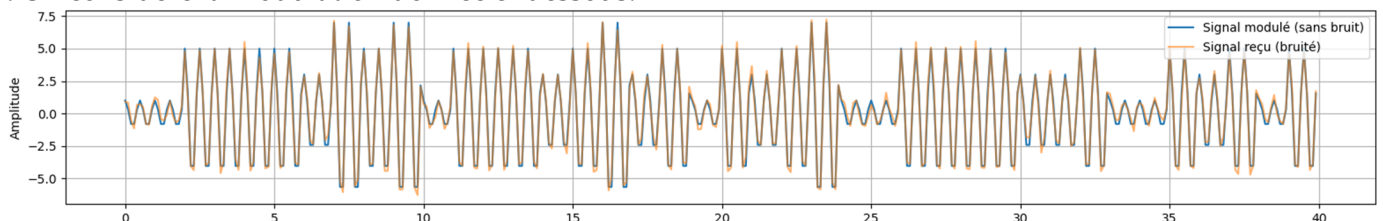
1. Les quatre modulations linéaires ci-dessous représentent la séquence binaire 10101111100110110001111001001101000000.
- Identifiez les modulations en bande de base et les modulations sur porteuse.
 - Déterminez les valeurs des symboles et les formes d'onde de ces modulations.



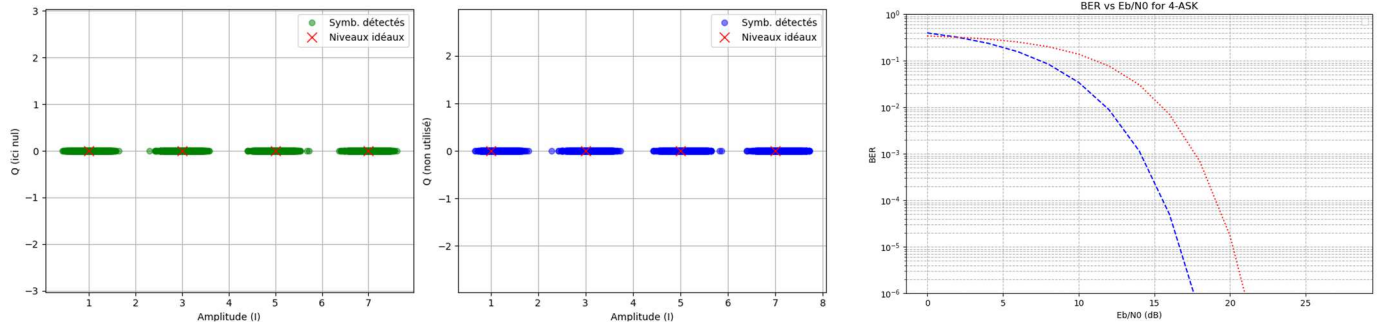
2. Soit la porteuse $p(t) = 7 \cos(10\pi f_p t + \varphi_p)$ et soit le message numérique $A(t)$ ayant comme symbole d_k où φ_0 est la phase de la porteuse à $t=0$ et nous désignons par $h(t)$ une porte de durée T égale à 1 si $t \in [0, T[$ et 0 ailleurs.

- Donner l'expression du signal modulant.
 - Donner l'expression de l'onde modulée ASK.
 - Donner les valeurs du symbole d_k dans le cas d'une modulation par tout ou rien.
 - Donner les valeurs du symbole d_k dans le cas d'une modulation "On Off Keying".
- Reprendre l'exercice en considérant que : $\varphi_p = \pi/2$
- Donner la nouvelle expression de l'onde modulée ASK.

3. On considère la modulation donnée ci-dessous.

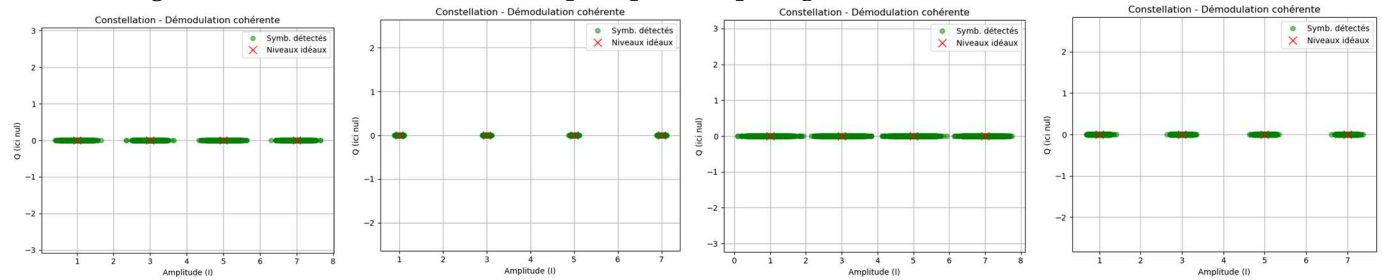


- Identifier la modulation.
- Ci-dessous les constellations des symboles émis pour 2 différentes techniques de démodulation. Identifier les et donner le schéma de démodulation. Faire de même pour le BER.



Ci-dessous les constellations obtenus pour différents SNR 12db, 15db, 20db et 30db suite à une démodulation synchrone,

- Identifier la modulation employée
- Ranger les constellations du SNR le plus petit au plus grand.



4. Une modulation d'amplitude unidimensionnelle (ASK) 8 états transite à 2400 bauds.

- Quelle est la bande passante nécessaire dans le cas d'un filtre de mise en forme idéal (fonction de transfert constante dans la bande passante du canal) et dans le cas d'un filtre de bande passante égale $1.5 \times D_s$?
- On souhaite effectuer une transmission 64 kbits/s l'aide d'une liaison équipée de modems fonctionnant selon une modulation ASK 8-aire avec des filtres de mise en forme dont la bande spectrale est $1.33 \times D_s$.
- Calculez la bande passante du canal nécessaire.

5. Soit l'onde modulée donnée par l'expression suivante

$m(t) = \sum_k \cos(\alpha_k) h(t - kT) \cos(2\pi f_p t) - \sum_k \sin(\alpha_k) h(t - kT) \sin(2\pi f_p t)$ où $h(t)$ une porte de durée T égale à 1 si $t \in [0, T[$ et 0 ailleurs.

- Que représente le signal $m(t)$.
- Montrer que le signal $m(t)$ est une onde PSK.
- Quelle est la phase qui correspond à l'intervalle de temps $[kT, (k+1)T[$
- Dans le cas où α_k prend les états de phase $0, \pi/2, \pi$ et $3\pi/2$, quel est le nom exacte de cette modulation.

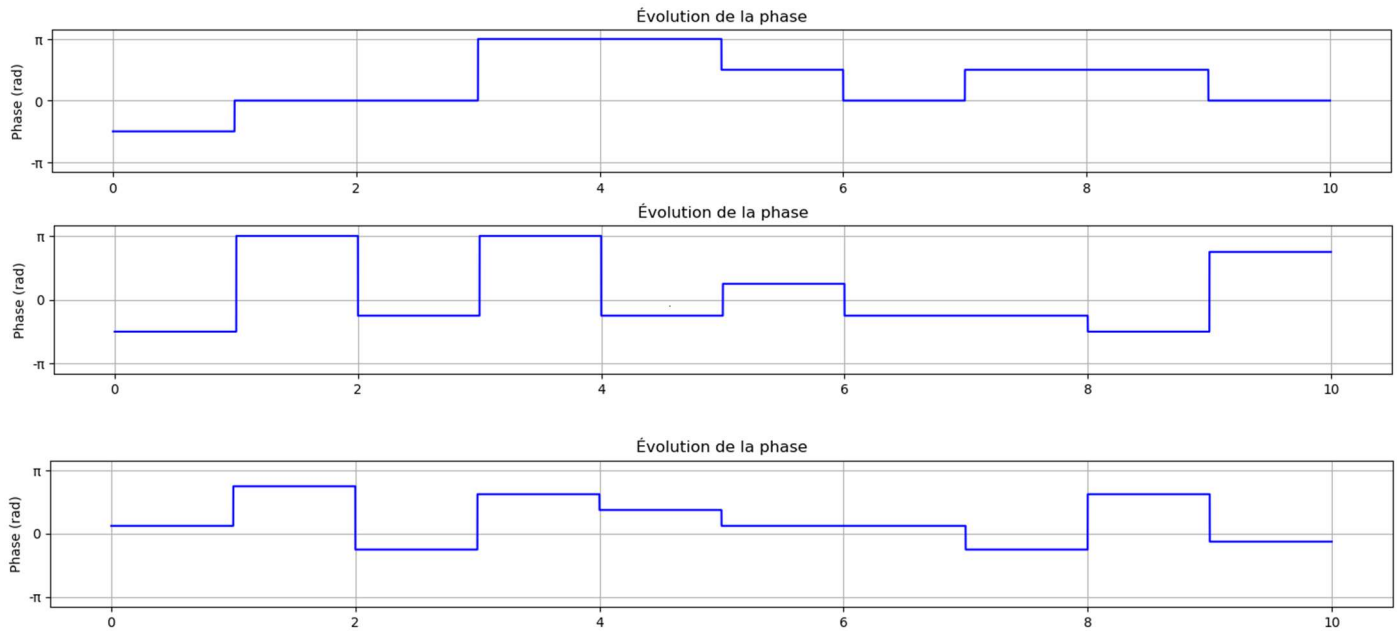
6. Un signal modulé en 4-PSK (QPSK) avec $n = 2$ et $M = 4$.

- Compléter le tableau suivant :

Codes Gray	φ_k	a_k	b_k	$a_k\sqrt{2}$	$b_k\sqrt{2}$

- Donner, en fonction des bits pairs d_{2l} et impairs d_{2l+1} , les formules donnant les symboles a_k et b_k .
- Donner l'expression du signal modulé $m(t)$.
- Tracer l'allure du diagramme de la constellation et superposer dessus les seuils de décision.
- Représenter graphiquement le chronogramme de la modulation 4-PSK pour le message binaire suivant $d_i : 10011100$.
- Proposer un schéma graphique du modulateur 4-PSK.
- Tracer l'allure du diagramme de la constellation des signaux reçus et superposer dessus les seuils de décision pour $M=8$.
- Donner le schéma de modulation et les étapes permettant de retrouver les bits émis

7. On donne les phases pour une modulations M-PSK ci-dessous :



- Identifier M
- Tracer la constellation en considérant un code gray.
- En utilisant les constellations, superposer les valeurs de symboles sur les graphes.
- Tracer a_k et b_k
- Donner le schéma de démodulation
- Expliquer comment l'on peut séparer les composante I et Q à la réception bien qu'elles occupent la même bande spectrale.
- Montrer que la distance minimale entre 2 symboles est : $d_{min} = 2\sqrt{E_s} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)$

8. Les modulations linéaires en bande transposée et sans mémoire s'expriment comme :

$$m(t) = \text{Re}\left(\sum_k d_k h(t - kT) e^{2\pi j f_p t}\right)$$

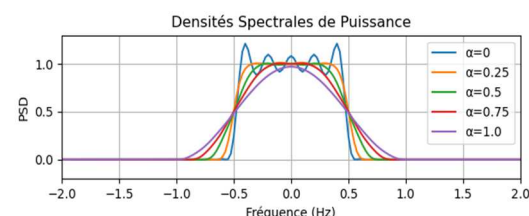
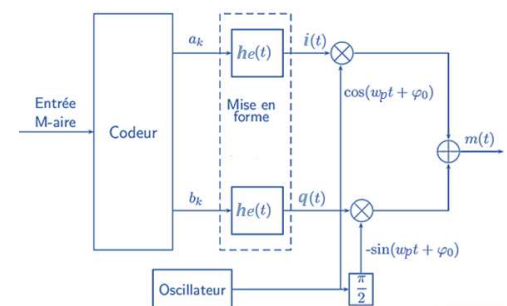
- Que représentent d_k , T et f_p
- Exprimez $m(t)$ pour chacun des formats suivants en relation avec leur dénomination : ASK (Amplitude Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitude Modulation), PSK (Phase Shift Keying)
- Représenter la constellation des signaux d'une 2-ASK, 4-ASK, 8-ASK. 4-PSK, 16-PSK et d'une 4-QAM, 16-QAM et 64-QAM.
- Reporter dessus les mots binaires correspondants par codage de Gray.
- Donner le schéma général d'une modulation et d'une démodulation en quadrature.
- Soit un débit binaire de $D_b = 9.6$ Kbits/s transmettre. Quel est le débit symbole correspondant pour chacune des modulations ci-dessus ?
- Soit un filtre $h(t)$ est tel que la bande du signal mis est de 1.5Ds. Si la bande de canal allouée est de 5 kHz, quelle modulation doit-on ignorer ?

9. On considère une transmission par modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature à 16 états (16-QAM), dont le schéma de principe de modulation est donnée ci-contre.

- Donner le schéma de démodulation.
- Expliquez en quoi consiste la démodulation dans le récepteur QAM.
- Tracer la constellation des symboles en indiquant sur chaque symbole le mot binaire qu'on peut lui associer en faisant un codage de Gray.

Les filtres d'émission $h_e(t)$ sont des racines carrées de cosinus surélevé de facteur de retombée α . Leur densité spectrale de puissance (DSP) est représentée ci-contre.

- Tracer la DSP du signal émis $m(t)$ et donnez l'expression de sa largeur.
- Le canal a une bande passante B autour de f_p
- Exprimez le débit maximal D sans interférence entre symboles permis par cette bande passante, en fonction de B et α ($\alpha = 0, 6$ et $B = 0, 4$ MHz).



- On donne la probabilité par symbole pour chacune des voies $SE_{i(t),q(t)} \approx \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q\left(\sqrt{\frac{3E_{sym}}{(M-1)N_0}}\right)$. Sachant qu'on utilise un codage de Gray, en déduire la probabilité d'erreur par élément binaire P_e .

On donne ci-dessous les graphes liant le débit binaire D et le rapport E_b/N_0 ainsi que la probabilité d'erreur binaire P_e en fonction de E_b/N_0 .

- Quel est le débit maximal permettant de respecter la contrainte $P_e < 10^{-3}$.

- En tenant compte de la limitation de la bande passante, déterminer le débit maximal ?

10. On considère un message binaire qu'on souhaite transmettre en modulation 2-FSK (BFSK) :

d_i : 1010111100110110001111001001101000000.

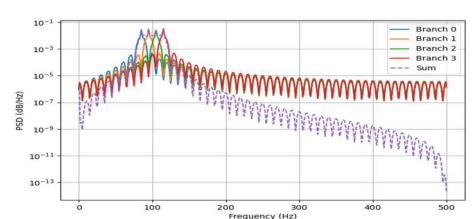
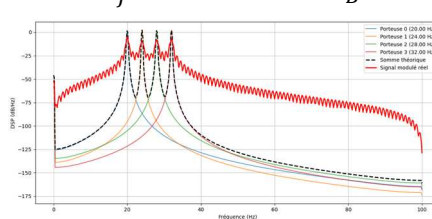
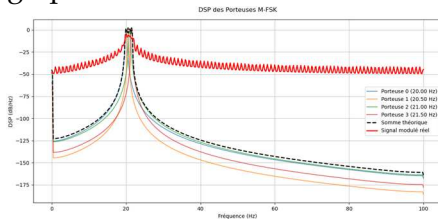
- Donner l'expression du signal modulé ;

- Tracer l'allure des signaux en bande de base (pour un codage NRZ) ;

- Tracer l'allure des signaux à la sortie du modulateur 2-FSK. (On donne : $f_1 = 2/T$ et $f_2 = 4/T$)

- Donner un schéma pratique d'un modulateur 2-FSK.

- Définir une modulation CP-FSK, MSK, GMSK comparativement à une FSK. Puis identifier les sur les graphes donnés ci-dessous en donnant δ_f en fonction de T_B .

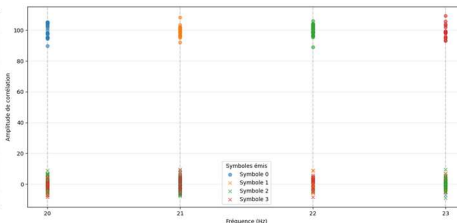
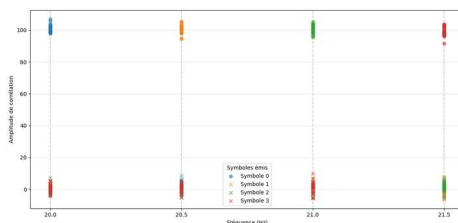


- Comparer les en termes d'efficacité spectrale, d'indice de modulation $h = \frac{f_1 - f_0}{f_B}$ et de complexité puis donner les domaines d'utilisation ($f_B = 1/T_B$)

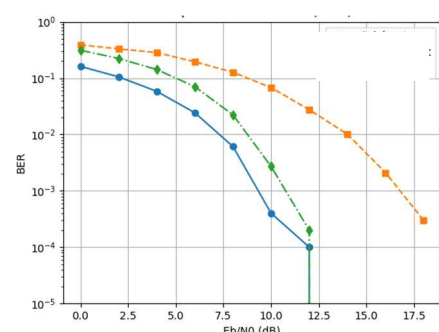
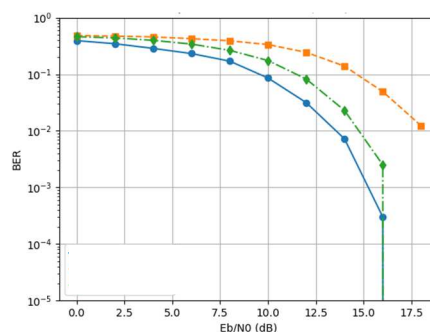
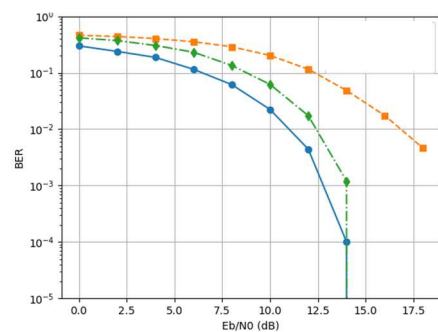
11. On s'intéresse à la démodulation FSK.

- Donner le principe de démodulation M-FSK par corrélation.

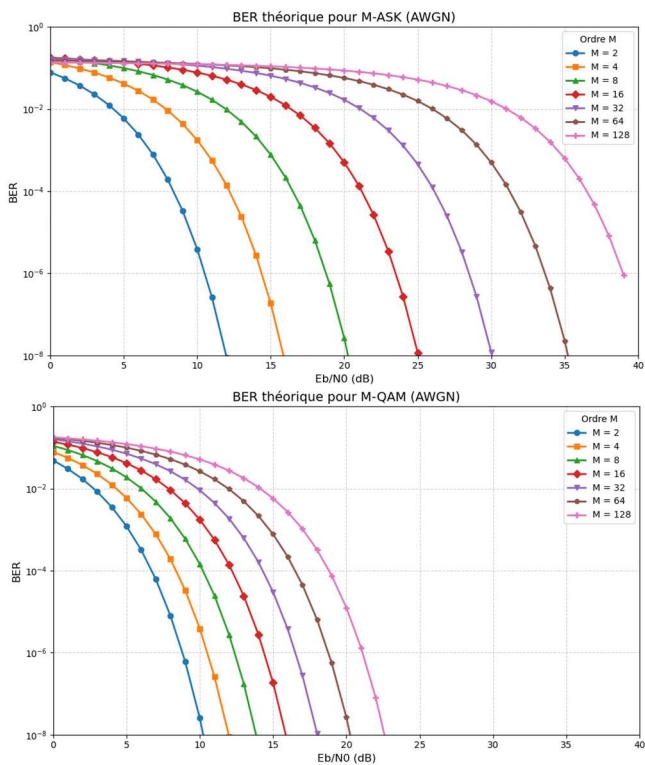
- Identifier sur les graphes suivants : M , les fréquences par symboles, les indices de modulation. Les E_b/N_0 (en db) sont: 3 db, 5 db et 10db et $T_B = 1$.



- On donne le BER obtenu pour trois techniques de démodulation M-FSK : Cohérente, non cohérente et par FFT. Identifier les en déterminant M (2, 4 et 8).

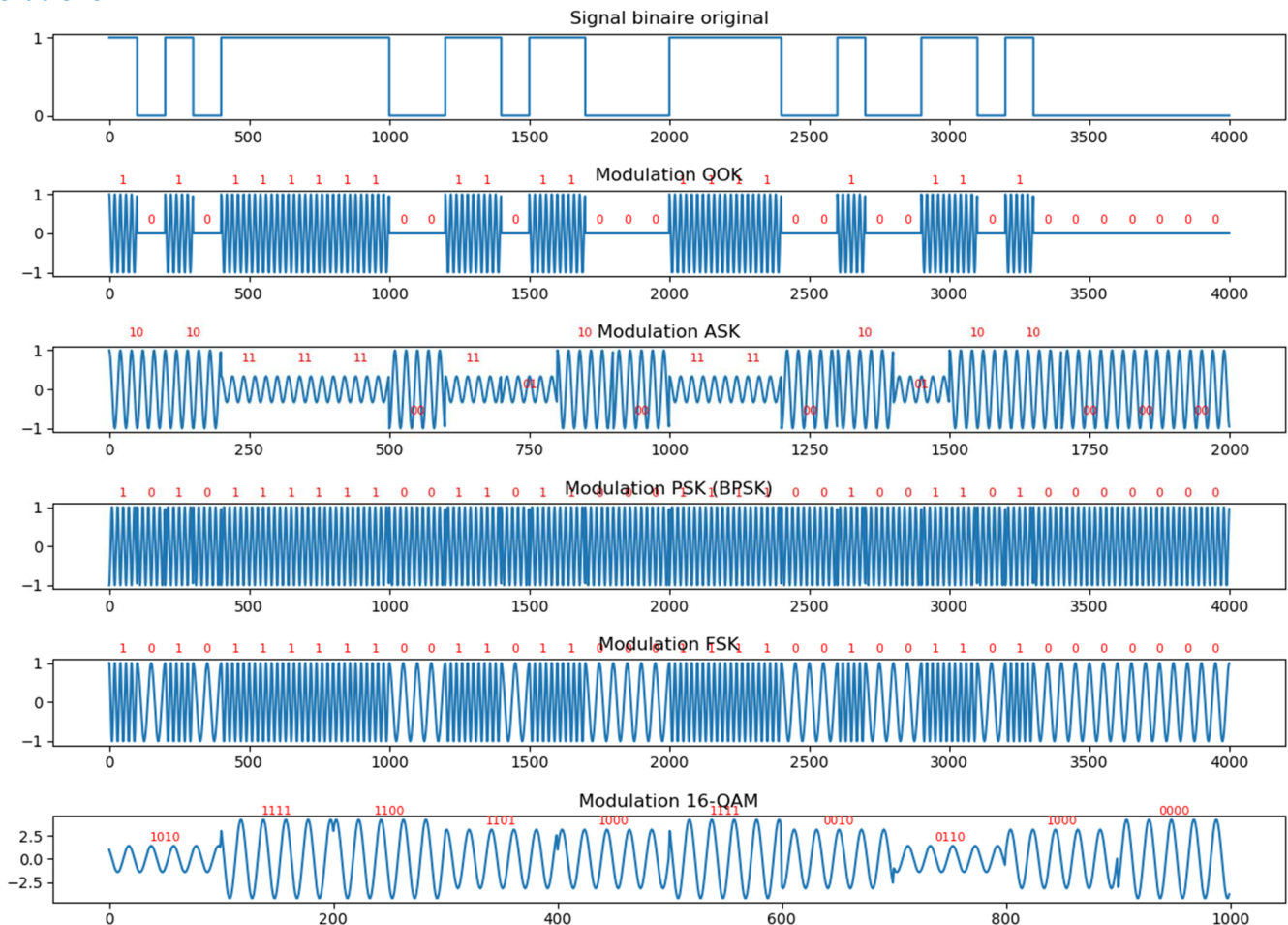


12. On veut comparer les performances des modulations numériques en bande étroite en milieu AWGN en se basant sur le taux d'erreur par bit (TEB) dit Bit error rate (BER).



- Quel est l'intérêt de calculer le BER ?
- Commenter les graphes
- Donner les domaines d'utilisation de chaque modulation.

Solutions



1.

2. $A(t) = \sum_k d_k h(t - kT) \rightarrow$ Onde modulée ASK : $m(t) = A(t) \cdot p(t) = 7 \sum_k d_k h(t - kT) \cos(10\pi f_p t + \varphi_k)$

- $d_k \in \{0,1\}$ dans le cas d'une modulation par tout ou rien $\rightarrow 0$ extinction de la porteuse et 1 au bit 1.

- $d_k \in \{0,1\}$ dans le cas d'une modulation OOK.

- $m(t) = A(t) \cdot p(t) = 7 \sum_k d_k h(t - kT) \cos(10\pi f_p t + \pi/2) = -7 \sum_k d_k h(t - kT) \sin(10\pi f_p t)$

3. 4-ASK. Cohérente (synchrone) $\rightarrow$ Bleu et non cohérente (détection d'enveloppe) $\rightarrow$ Orange. Voir Cours. 15-30-12-20.

4. 2400 Hz et $1.5 \times 2400 = 3600$ Hz $B_c = 1.33 \times D_s = 1.33 \times D_b / \log_2(8) = 1.33 \times 64000 / \log_2(8) = 28\ 373,33$ Hz

5. $m(t)$ est une combinaison de deux modulations ASK en quadrature.

$m(t) = \sum_k \cos(\alpha_k) h(t - kT) \cos(2\pi f_p t) - \sum_k \sin(\alpha_k) h(t - kT) \sin(2\pi f_p t)$

- $m(t) = \sum_k h(t - kT) [\cos(\alpha_k) \cos(2\pi f_p t) - \sin(\alpha_k) \sin(2\pi f_p t)] = \sum_k h(t - kT) \cos(2\pi f_p t + \alpha_k)$

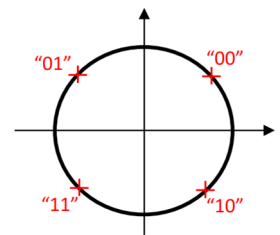
- la phase qui correspond à l'intervalle de temps $[kT, (k+1)T[$ est α_k

- 4-PSK

6. Les a_k et b_k prennent respectivement leurs valeurs dans les alphabets dans $\cos(\varphi_k)$ et $\sin(\varphi_k)$;

$\cos(\varphi_k) = \cos(\frac{\pi}{4} + k \frac{2\pi}{4})$ et $\sin(\varphi_k) = \sin(\frac{\pi}{4} + k \frac{2\pi}{4})$ avec $k=0,1,2,3$

Codes Gray	φ_k	a_k	b_k	$a_k \sqrt{2}$	$b_k \sqrt{2}$
00	$\pi/4$	$\sqrt{2}/2$	$\sqrt{2}/2$	1	1
10	$3\pi/4$	$-\sqrt{2}/2$	$\sqrt{2}/2$	-1	1
11	$5\pi/4$	$-\sqrt{2}/2$	$-\sqrt{2}/2$	-1	-1
01	$7\pi/4$	$\sqrt{2}/2$	$-\sqrt{2}/2$	1	-1



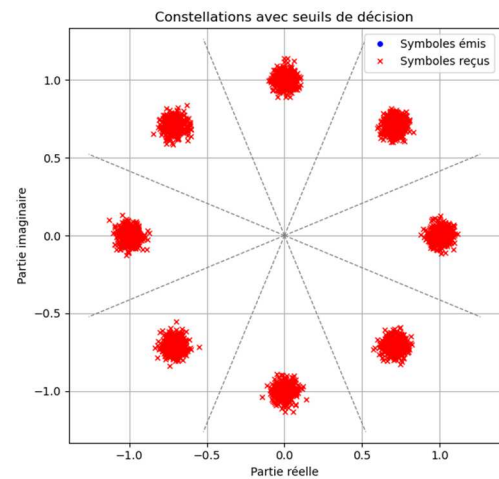
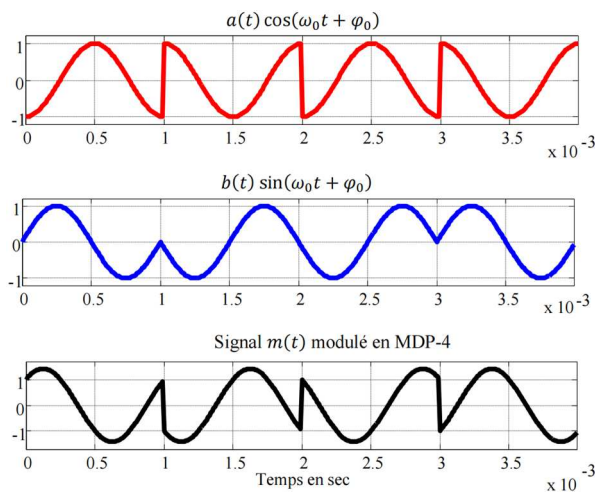
$a_k = 1 - 2d_{2l}$ et $b_k = 1 - 2d_{2l+1}$

$m(t) = a(t) \cos(\omega_p t + \varphi_p) - b(t) \sin(\omega_p t + \varphi_p)$ avec $a(t) = \sum_k a_k h(t - kT)$ et $b(t) = \sum_k b_k h(t - kT)$

$m(t) = \sum_k a_k h(t - kT) \cos(\omega_p t + \varphi_p) - \sum_k b_k h(t - kT) \sin(\omega_p t + \varphi_p)$

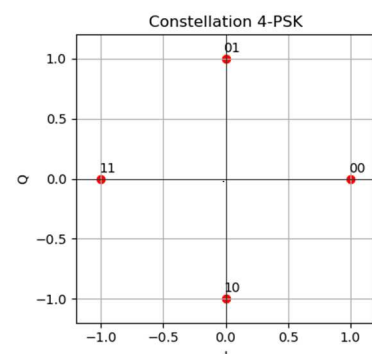
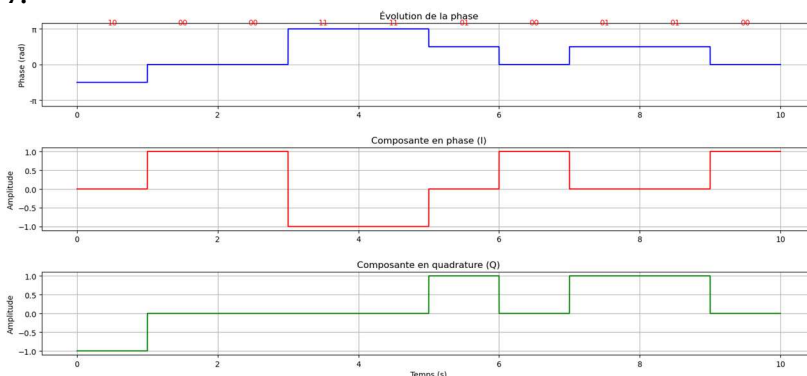
$a_k = 1 - 2d_{2l} = \{-1, 1, -1, 1\}$

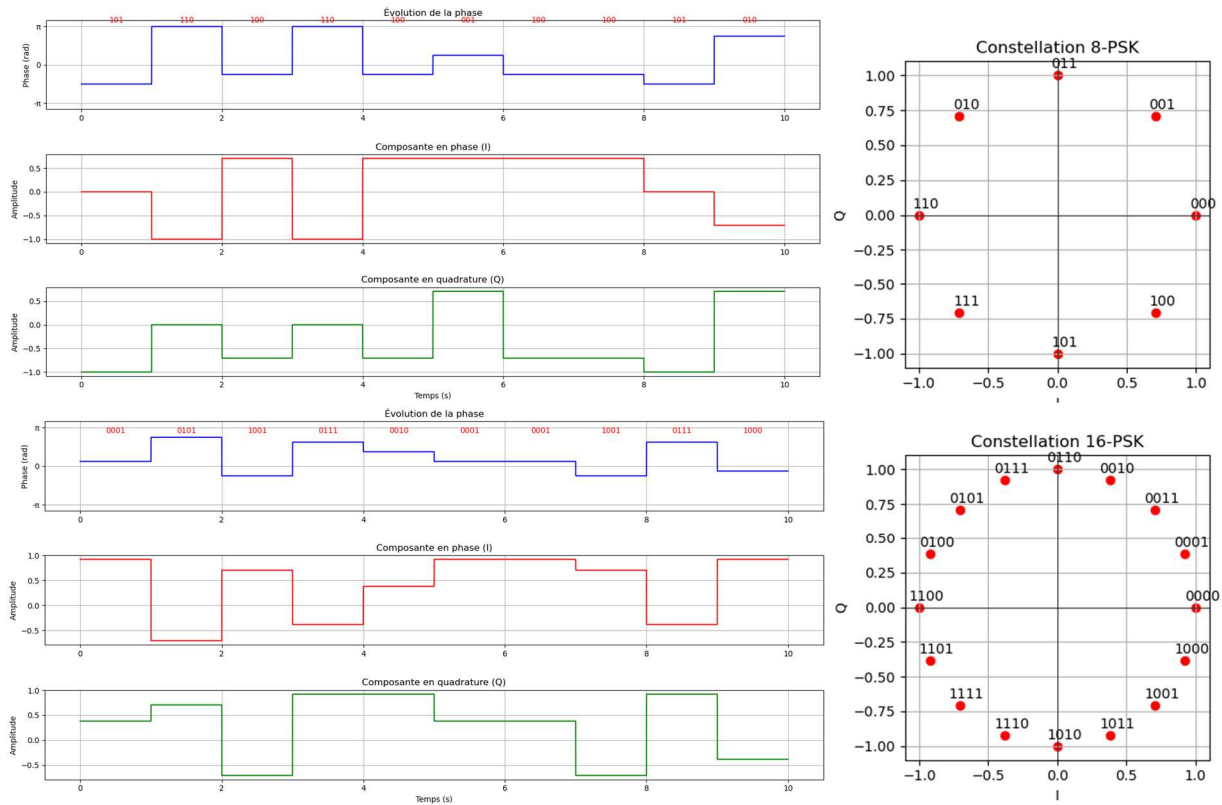
$b_k = 1 - 2d_{2l+1} = \{1, -1, -1, 1\}$



Voir Cours.

7.





Voir cours.

8. d_k est le symbole émis à l'instant kT , et f_0 est la fréquence porteuse et T le temps séparant deux symboles consécutifs.

- ASK : c'est une modulation de l'amplitude d'un cosinus donc monodimensionnelle :

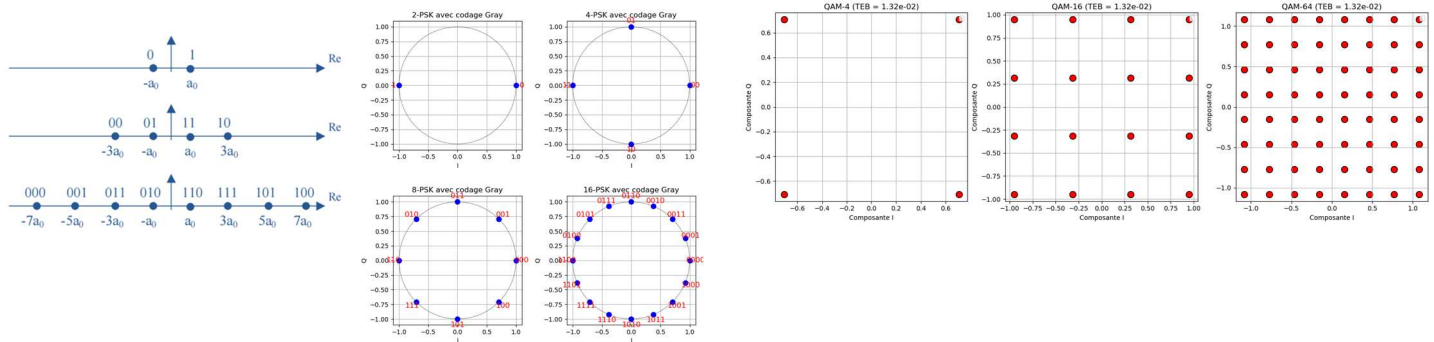
$$m(t) = \sum_k a_k h(t - kT) \cos(2\pi f_0 t)$$

- QAM : C'est une modulation en amplitude de deux porteuses en quadrature. En posant $d_k = a_k + jb_k$

$$m(t) = \sum_k a_k h(t - kT) \cos(2\pi f_0 t) - \sum_k b_k h(t - kT) \sin(2\pi f_0 t) \rightarrow m(t) = a(t) \cos(2\pi f_0 t) - b(t) \sin(2\pi f_0 t)$$

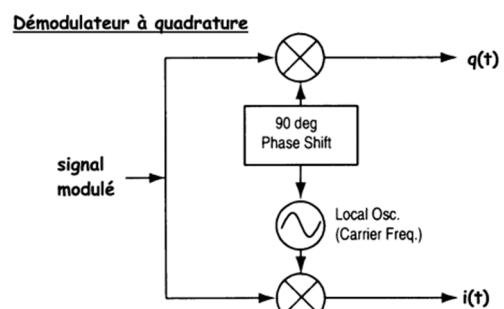
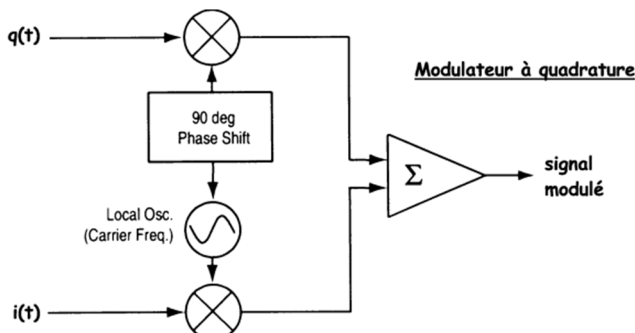
- PSK : C'est une modulation par déplacement de phase. Pour l'obtenir il faut prendre des symboles répartis symétriquement sur un cercle donc $|d_k| = A$ et $\varphi_k = \arg(d_k)$

$$m(t) = A \sum_k h(t - kT) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_k) \rightarrow \text{Enveloppe variable.}$$



2-ASK = 2-PSK

4-PSK = 4-QAM



4-ASK: $D_s = 9600/2 = 4800$ bauds ; 8-PSK: $D_s = 9600/2 = 4800$ bauds ; 16-QAM: $D_s = 9600/4 = 2400$ bauds.

4-ASK: $1.5D_s = 7200 \text{ Hz} > 5000 \text{ Hz}$; 8-PSK: $1.5D_s = 4800 \text{ Hz} < 5000 \text{ Hz}$; 16-QAM: $1.5D_s = 3600 \text{ Hz} < 5000 \text{ Hz} \rightarrow$ 4-ASK non utilisable.

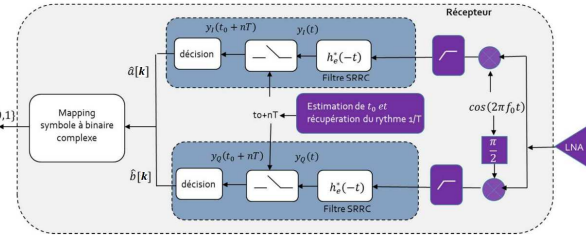
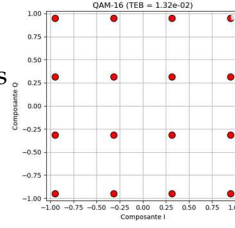
Dans la M-PSK l'ensemble des phases possibles de φ_k sont $\varphi_k = \frac{\pi}{4} + k \frac{2\pi}{4}$ avec $k=0,1,2,3$

9. La démodulation consiste à : multiplier une voix par $\cos(2\pi f_p t)$ et l'autre par $\sin(2\pi f_p t)$ puis appliquer un filtrage passe-bas sur chacune.

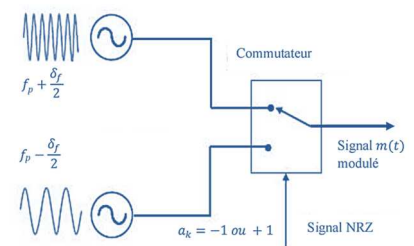
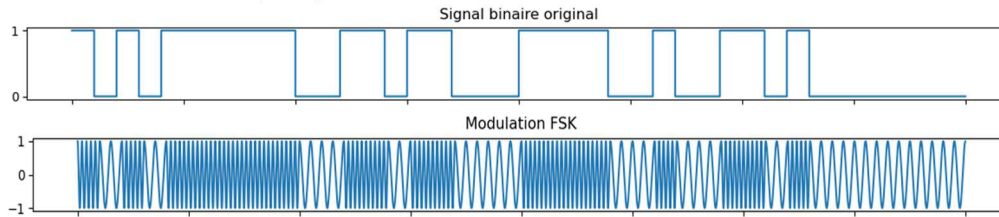
$$\frac{1+\alpha}{T} < B \text{ avec } T = 4T_b = 4/D \rightarrow D_{max} = \frac{4B}{1+\alpha} = 1 \text{ Mbit/s}$$

$$P_e \approx \frac{4}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M \cdot E_b}{(M-1) N_0}} \right)$$

$$P_e < 10^{-3} \rightarrow E_b/N_0 > 11 \rightarrow D_{max} < 0.8 \text{ Mbits/s}$$



$$10. m(t) = \cos(2\pi(f_p \pm \delta_f/2)t)$$



CP-FSK : FSK à phase continue $\delta_f \geq \frac{1}{2T_B}$

MSK : Variante à phase continue de la CP-FSK, avec un indice de modulation fixe $\delta_f = \frac{1}{2T_B}$

GMSK : MSK améliorée par un **filtrage Gaussien** avant modulation $\delta_f = \frac{1}{2T_B}$

$$\delta_f = \frac{1}{2T_B} \quad \delta_f = \frac{4}{T_B} \quad \delta_f = \frac{1}{2T_B}$$

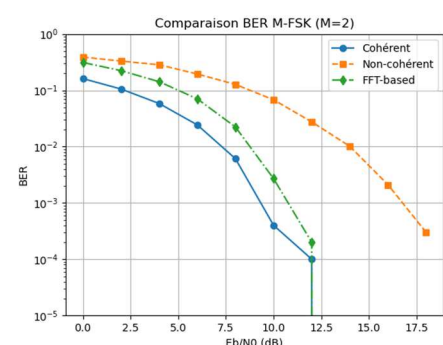
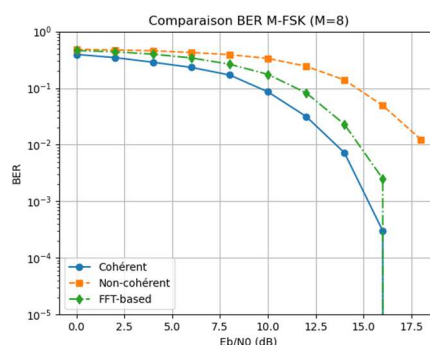
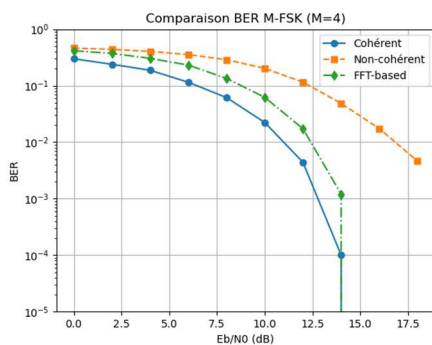
Critère	CP-FSK	MSK	GMSK
Efficacité Spectrale	Faible	Moyenne-Haute	Très Haute
Indice de Modulation h	Variable (> 0.5)	Fixe (0.5)	Fixe (0.5) + filtrage
Complexité	Simple	Modérée	Élevée (filtrage Gaussien)
Applications Typiques	IoT, RFID	Satellites, radio	GSM, Bluetooth

11. Détection Cohérente (Corrélateurs) M-FSK : Générer localement M signaux de référence (un par fréquence symbole) $\rightarrow$ Calculer la corrélation entre le signal reçu et chaque référence $\rightarrow$ Le symbole correspondant à la corrélation maximale est choisi. $h = \frac{f_1 - f_0}{f_B}$

$M=4 \rightarrow$ Symboles : {0, 1, 2, 3} $\rightarrow$ Fréquences : {20.00, 20.50, 21.00, 21.50} Hz, $h = 0.5$ $E_b/N_{0(db)} = 5$

$M=4 \rightarrow$ Symboles : {0, 1, 2, 3} $\rightarrow$ Fréquences : {20.00, 21.00, 22.0, 23.0} Hz, $h = 1$ $E_b/N_{0(db)} = 3$

$M=2 \rightarrow$ Symboles : {0, 1} $\rightarrow$ Fréquences : {20.00, 22.0} Hz, $h = 2$ $E_b/N_{0(db)} = 10$



12. BER est défini comme le rapport entre le nombre de bits d'erreur et le nombre total de bits envoyés. En analysant la valeur BER d'un système de transmission, nous pouvons évaluer la qualité des performances de ce système. En prenant en compte le rapport signal/bruit plus élevé et le meilleur canal de transmission, il est possible d'obtenir un faible BER dans un système de transmission.

Les valeurs du BER diminuent avec l'augmentation des valeurs SNR et lorsque la valeur SNR augmente, la quantité de bruit diminue et lorsque la puissance du bruit diminue, les valeurs BER diminuent également.

- Commentaires :

- Pour une valeur de SNR faible (1 dB), c'est-à-dire qu'il y a une grande quantité de bruit et les techniques de modulation BPSK, QPSK et 4-QAM fournissent le même BER qui est de -1,24 dB chacune et ces valeurs sont également les valeurs BER minimales par rapport aux autres techniques de modulation.
- Lorsque la valeur SNR est de 5 dB (moyenne), la technique de modulation 32-FSK fournit la valeur BER minimale qui est de -3,25 dB.
- Lorsque la valeur SNR est de 10 dB (élevée), c'est-à-dire qu'il y a moins de bruit, la technique de modulation 32-FSK fournit également la valeur BER minimale qui est de -10,91 dB.

Ainsi, à partir des graphes : on peut dire que dans des conditions de faible valeur SNR, les techniques de modulation BPSK, QPSK et 4-QAM sont les meilleures et que pour des conditions de valeur SNR moyenne et élevée, la 32-FSK est la meilleure pour obtenir de meilleures performances.

- PSK : Les performances de la modulation PSK sont comparativement meilleures que celles de la modulation ASK et FSK. La technique de modulation PSK comprend différents types de méthodes telles que la BPSK, la QPSK, la D-BPSK, la D-QPSK et la M-ary PSK. Dans les systèmes de communication spatiale et sans fil, la technique de modulation PSK est largement utilisée

- ASK : Lors de la transmission du signal, la bande passante requise est moindre, mais elle est également coûteuse et moins efficace en termes de consommation d'énergie. On note qu'à chaque fois que le nombre d'état est multiplié par deux, il faut augmenter de 4dB le rapport E_b/N_0 pour maintenir les mêmes performances. Ceci constitue un sérieux désavantage comparativement aux autres modulations. Le signal ASK est influencé par le bruit, l'évanouissement et les interférences, ce qui explique pourquoi les performances de l'ASK sont très médiocres. La technique de modulation ASK est utilisée dans divers systèmes de communication à faible débit de données ainsi que pour les applications de base, elle est utilisée dans la diffusion de signaux et la communication par fibre optique pour la modulation d'intensité laser.

- QAM : Cette modulation est la plus intéressante en terme d'efficacité spectrale (donc en terme de débit) puisque les signaux sont répartis dans tous l'espace et non sur un cercle. En outre, il apparaît que pour un nombre d'états supérieur à 16, le BER est considérablement dégradé et les domaines d'application sont restreints par le bruit (nécessité de travailler dans un environnement faiblement bruité). Les QAM sont souvent utilisés dans les réseaux de télévision par câble numérique, les modems câblés et les applications de systèmes sans fil point à point et sont largement utilisés dans les systèmes de communication par satellite.

- FSK : Le principal défaut de la modulation FSK réside dans l'occupation spectrale du signal modulé qui dépend de l'écart entre les fréquences utilisées. En effet, si le signal modulé sur une porteuse occupe W hertz, alors la totalité du spectre sera $W+(f_{max}-f_{min})$ hertz, où f_{max} est la fréquence porteuse maximale et f_{min} la fréquence porteuse minimale. Pour pallier à cet inconvénient, la modulation MSK (*minimum shift keying*) a été développée. Dans ce cas, l'écart minimal est défini en fonction de l'occupation spectrale du signal transmis et de sa détection optimale. Cette technique est très utilisée en téléphonie portable (GSM, DCS 1800). Elle est utilisée dans les modems de lignes téléphoniques pour transmettre 300 bits/s à deux fréquences 1070 Hz et 1270 Hz. Elle est également utilisée dans les applications sans fil et les systèmes de radiomessagerie.

Glossaire

- Additive White Gaussian Noise (AWGN) = Bruit Additif Blanc et Gaussien (BABG)
- Autocorrelation function = Fonction d'autocorrélation
- Autocovariance function = Fonction d'autocovariance
- Bandwidth = Largeur de bande
- Baseband signal = Signal en bande de base
- Binary data rate = Débit binaire
- Bit Error Rate (BER) = Taux d'Erreur Binaire (TEB)
- Digital communications = Communications Numériques
- Energy per bit = Énergie par bit
- Energy per symbol = Énergie par symbole
- Excess bandwidth = Largeur de bande en excès
- Eye diagram = Diagramme de l'oeil
- Fourier transform = Transformation de Fourier
- Hypothesis testing = Test d'hypothèses
- Inter Symbol Interference (ISI) = Interférence Entre Symboles (IES)
- Matched filter = Filtre adapté
- Maximum A Posteriori decoding (MAP) = Décodage au sens du Maximum A Posteriori (MAP)
- Maximum Likelihood decoding (ML) = Décodage à Maximum de Vraisemblance (MV)
- Modulation order = Ordre de modulation
- Modulation rate = Rapidité de modulation
- Passband signal = Signal sur fréquence porteuse
- Pulse Amplitude Modulation (PAM) = Modulation par Impulsions d'Amplitude (MIA)
- Pulse shape = Filtre de mise en forme
- Raised cosine = Cosinus surélevé
- Roll-off factor = Facteur de Roll off
- Sampling theorem = Théorème d'échantillonnage
- Signal to Noise Ratio (SNR) = Rapport Signal sur Bruit (RSB)
- Spectral efficiency = Efficacité spectrale
- Spectrum = Spectre Power Spectral Density (PSD) = Densité Spectrale de Puissance (DSP)
- Stationary process = Processus stationnaire
- Stochastic process = Processus aléatoire
- Symbol duration = Durée des symboles
- Symbol error probability = Probabilité d'erreur par symbole
- Threshold decision = Décision à seuil
- Wide-sense stationary process = Processus stationnaire au second ordre