



**HAL**  
open science

# Livret de Travaux Dirigés de Télécommunications Numériques

Christophe Krzeminski

► **To cite this version:**

Christophe Krzeminski. Livret de Travaux Dirigés de Télécommunications Numériques. École d'ingénieur. Ce document est issu de l'enseignement qui a été transmis par l'école d'ingénieur Isen à lille dans le domaine des télécoms, France. 2021. hal-03280641v2

**HAL Id: hal-03280641**

**<https://hal.science/hal-03280641v2>**

Submitted on 4 Sep 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

*Livret de Travaux Dirigés  
de Télécommunications Numériques*

Rédacteur: Christophe Krzeminski

*Année Scolaire Académique 2020-2021 M1*

# Sommaire

<b>A</b>	<b>Caractéristiques des Supports de Communications Numériques</b>	<b>3</b>
A.1	Différence: débit binaire - rapidité de modulation . . . . .	5
A.2	Notion de ligne téléphonique . . . . .	5
A.3	Capacité d'une fibre optique G652.D . . . . .	6
<b>B</b>	<b>Codage dans les Systèmes de Communication</b>	<b>7</b>
B.1	Codage . . . . .	9
B.2	Interprétation des codes . . . . .	10
B.3	Notion d'entropie de source . . . . .	10
B.4	Représentation de code . . . . .	11
<b>C</b>	<b>Des communications dans des canaux bruités</b>	<b>13</b>
C.1	Détecteur Maximum à Posteriori (MAP) et canaux BBAG . . . . .	16
C.2	Canal radiomobile, notion de bande et de temps de cohérence . . . . .	17
<b>D</b>	<b>Concept de Modulation Analogique</b>	<b>19</b>
D.1	Analyse d'un signal Modulé en Amplitude . . . . .	21
D.2	Analyse d'un Spectre Modulé en Fréquence . . . . .	22
<b>E</b>	<b>Concept de Modulation Numérique</b>	<b>23</b>
E.1	Modulation d'amplitude en quadrature et de phase . . . . .	25
<b>F</b>	<b>Principes de Démodulation</b>	<b>27</b>
F.1	Boucle de Costas ou Circuit de Récupération de la Porteuse . . . . .	29
<b>G</b>	<b>Notion de Chaîne de Transmission</b>	<b>31</b>
G.1	Compréhension de la globalité d'une chaîne de transmission . . . . .	32
G.2	Simulation de la performance d'une chaîne de transmission . . . . .	32

## Nomenclature

**Bc** *Bande de Carson*

**BLU** *Modulation en Bande Latérale Unique*

**BLR** *Modulation en Bande Latérale Résiduelle*

**C** *Capacité du support*

**D** *Débit binaire*

**DBSP** *Modulation Double Bande sans Porteuse*

**HBDn** *Codage bipolaire à Haute Densité d'ordre n*

**FM** *Modulation de Fréquence*

**MA** *Modulation d'Amplitude*

**MDP2** *Modulation de phase à deux états*

**QAM** *Modulation d'Amplitude et de phase*

**NRZ** *Non retour à Zero*

**R** *Rapidité*

**RZ** *Retour à Zero*

**S/B** *Rapport Signal à Bruit*

**V** *Valence (nombre d'états)*

## **Nomenclature en langue anglaise**

**AM** *Amplitude modulation*

**BLU** *Modulation en Bande Latérale Unique*

**BLR** *Modulation en Bande Latérale Résiduelle*

**C** *Channel capacity*

**D** *Binary rates*

**BnZs** *Bipolar with n zero substitution*

**FM** *Frequency modulation*

**PSK** *Phase Shift Keying modulation*

**QAM** *Amplitude modulation*

**M** *M-States*

**NRZ** *Non Return to Zero*

**R** *Rapidity*

**RZ** *Return to Zero*

**SNR** *Signal-to-Noise Ratio*

**W** *Carson bandwidth*

Ce livret est constitué des différents exercices théoriques de travaux dirigés au programme de la première année du cycle d'ingénieur de l'ISEN-Lille.

En terme de cadre pour les connaissances requises, des bases mathématiques rudimentaires du cycle préparatoire les fonctions trigonométriques simples, quelques rudiments au niveau du calcul des spectres (transformée de Fourier) et des calculs de probabilité sont nécessaires. Toutefois, un effort est fait de manière à présenter les concepts sous une forme pas forcément que mathématique. Des aspects modélisation sont également abordés avec des outils de simulation sous Matlab ou Octave.

Toutefois, en terme de méthode de préparation et de **conceptualisation**, *in-fine*, il est probable que la préparation “à l'ancienne” avec une feuille de papier et d'un crayon en essayant d'être déconnecté soit la plus simple et la meilleure méthode possible surtout en télécommunications de nos jours...

Le domaine au niveau technique est très vaste et il est difficile d'essayer de tout aborder. Il manque probablement un aspect pratique qui mériterait d'être développé. L'autre point de vigilance par rapport à l'usage des outils numériques est qu'une lecture succincte des réponses ou des corrections ne permet pas l'**acquisition** des connaissances sur le long terme qui peuvent vous être utiles dans le futur.

Il est recommandé de chercher à faire ces exercices de manière autonome, à son rythme mais par contre il ne faut pas craindre à solliciter de l'aide pour les points éventuellement bloquants.



# Chapitre A

## Caractéristiques des Supports de Communications Numériques

### Introduction

#### *Connaissances préalable*

*Dans la caractérisation des systèmes de télécommunications numériques, ce tutoriel présente les notions suivantes du cours:*

- *Voie de communication (mode, sens, synchronisation)*
- *Milieu physique de communication (humain, hertzien, filaire)*
- *Rapidité de modulation*
- *Débit binaire*
- *Capacité physique du support de communication*

#### Aspect compréhension

Il est important de comprendre les différences entre les notions liées aux sciences de l'information (rapidité, débit binaire) et celles liées à la physique des support de communication (capacité, technologie et matériau). Le tutoriel permet d'illustrer l'influence des différents paramètres technologiques ou physiques régissant ces différentes notions.

#### Résolution des exercices

Les exercices de ce tutoriel sont des applications et des illustration directes du cours et ne présentent pas de complexité en terme de raisonnement.



## Autoévaluation

## Questionnaire

Questions	Réponses
1. La rapidité dépend-elle du nombre de symboles ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
2. Le débit dépend directement du temps entre les symboles émis $T_b$ ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
3. La séquence de valeurs $\{-5, -3, -1, +1, +3, +5\}$ est-elle un signal M-aire ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
4. La notion de capacité physique est-elle identique à celle du débit ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
5. La définition de la capacité de Shannon est-valable pour l'ensemble des supports physiques ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
6. Si l'on classe les supports en terme de largeur de bande passante, le câble coaxial $\geq$ fibre optique $\geq$ ligne bifilaire $\geq$ canal herztien ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Sinon proposer un autre classement
7. L'atténuation d'un support de transmission caractérise la manière dont la puissance du signal transmis est atténué par le milieu ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
8. Si on augmente le rapport signal à bruit (SNR) d'un facteur deux, la capacité du support est alors augmentée d'un ratio équivalent ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non

## Notion de débit binaire

### Notion de débit binaire

- ↯ Quel est le débit binaire d'une voie de communication émettant un signal binaire à chaque instant d'horloge de période  $T_b$  ? Application numérique :  $T_b = 10ms$ .
- ↯ On désire transmettre un signal M-aire où chaque mot de  $n$  bits est codé par un signal de durée  $T$ . Quelle est la rapidité de modulation  $R$  disponible ? Application numérique :  $T = 100ms$ .
- ↯ Exprimer le débit binaire  $D$  disponible dans ce cas. Application numérique  $n = 4$ .

## A.1 Différence: débit binaire - rapidité de modulation

### Débit binaire vs Rapidité de Modulation

- ↯ Quelle est la rapidité de modulation nécessaire pour que le canal de transmission ait un débit binaire de 2400 bit/s, sachant que les signaux transmis sont binaires.
- ↯ On suppose que le canal est à bruit blanc additif gaussien. Quelle doit être la valeur du rapport signal sur bruit, si la bande passante de la liaison est de  $1kHz$ , pour pouvoir obtenir le débit binaire précédent.
- ↯ Reprendre les questions dans le cas où le signal est quadrivalent.

## A.2 Notion de ligne téléphonique

### Notion de ligne téléphonique:

Soit une ligne téléphonique dont les fréquences extrêmes de la bande passante sont 300 Hz et 3400 Hz. La rapidité de modulation est 1200 bauds et les signaux transmis sont de valence 16.

- ↯ (a) Quel est le débit binaire disponible sur cette ligne ?
- (b) On suppose que la ligne présente un rapport signal sur bruit de 34dB. Quelle est la capacité théorique de cette ligne ?
- ↯ (a) Quelle doit être la fréquence d'échantillonnage minimale si l'on veut numériser un signal analogique dont la bande passante est identique à celle du support de transmission ?
- (b) Si l'on arrondit la valeur de la fréquence maximale du signal à 4kHz, que devient cette fréquence d'échantillonnage ?
- (c) Quel temps sépare deux échantillons consécutifs du signal ?

### A.3 Capacité d'une fibre optique G652.D

#### Capacité d'une fibre optique G652.D

Considérons une fibre optique monomode G652.D caractérisée par une atténuation linéique maximale de 0.22 db/km à 1550 nm. La puissance d'entrée minimale du récepteur optique est de -20 dBm.

- Réaliser un bilan de puissance en considérant l'affaiblissement à 1310 nm. Donner une estimation de la longueur maximale sans utiliser de répéteur optique ?

Selon la recommandation UIT-R BT.1367, il est recommandé de prendre une marge de 3 à 6 dB. Evaluer l'impact sur l'estimation. Pour une fibre optique monomode

La bande passante maximum  $B$  de cette fibre peut être estimée à l'aide de l'équation suivante:

$$B = \frac{0.35}{M(\lambda)\Delta\lambda L} \quad (\text{A.1})$$

et le produit maximal du débit binaire par la longueur de la fibre donnée:

$$(DL)_{max} = \frac{1}{2M(\lambda)\Delta\lambda} \quad (\text{A.2})$$

où  $M(\lambda)$  est le coefficient de dispersion chromatique en (ps/nm/km) est de 18 ps/nm.Km et une source optique de largeur spectrale  $\Delta(\lambda) = 0.5nm$

- Estimer la bande passante maximale de cette fibre.
- Estimer également le produit maximal du débit par la longueur.
- Estimer un temps de propagation si on considère une longueur d'un kilomètre.

# Chapitre B

## Codage dans les Systèmes de Communication

*Les systèmes de télécommunications numériques utilisent des signaux numériques simples générés par des composants électroniques ou optiques et transmis ensuite par les différents supports de communication. Pour ce tutoriel, il est indispensable de connaître les codes simples de base. En pratique, les systèmes de communications humains ou technologiques sont sensibles à de longue suite de zéros qui peuvent aboutir à des phénomènes de désynchronisation.*

### Connaissances préalables

Il est nécessaire de connaître les notions suivantes du cours:

- Paramètres sous-jacent (durée, débit)
- Encodage basique (NRZ, RZ, Manchester)
- Codage plus évolué de type HBDn

### Aspect compréhension

Il est important de comprendre les mécanismes sous-jacents à la formation des différents codes.

### Résolution des exercices

Les exercices de ce tutoriel sont des applications et des illustrations directes du cours et ne présentent pas de complexité en terme de raisonnement sauf pour les codages HBDn où il est nécessaire de comprendre intuitivement les mécanismes de correction. Les premiers exemples d'encodage peuvent être réalisés facilement à la main. Par contre, il est nécessaire d'installer le logiciel libre Octave et les fonctions supplémentaires pour la représentation des différentes séquences.

### Glossaire français-anglais

Bit d'équilibrage	Balancing bit
Bit de non respect de polarité	Violating bit
Polarité	Polarity
Mot	Word
Suite de zéro	String of zeros
Désynchronisation	Loss of synchronization

## Autoévaluation

## Questionnaire

Questions	Réponses
1. Le codage de la séquence $\{1\ 0\ 1\}$ en NRZ polaire donne $\{1\ 0\ -1\}$ ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
2. Un codage RZ implique-t-il une valeur nulle au milieu du temps symbole ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
3. Tout codage est possible sur l'ensemble des supports de transmission ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
4. La densité spectrale d'un code n'est pas important selon le support de transmission considéré ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
5. La séquence $\{1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\}$ est possible pour un codage HBD5 ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
6. Le codage HBD3 est-il la norme (théorique) entre les commutateurs ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
7. En terme de codage au niveau des supports optiques, le codage en tout ou rien est-il préféré ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux

## B.1 Codage

### Codage:

↳ Soit la séquence de bits: 1010. Représenter les signaux transmis en terme de codage NRZ, RZ, manchester.

↳ Soit la suite de bits :

1 1 0 1 0 0 0 0 1 1

Représenter les signaux transmis en code bipolaire simple, en code HDB1, puis HDB2.

↳ Coder la séquence binaire suivante à l'aide du code HDB2 puis à l'aide du code HDB3:

10001110000101110000

↳ Recommencer la même opération avec la séquence binaire suivante:

00001110000001111000

↳ Décoder les séquences suivantes en supposant un codage en code HDB3:

Séquence 1:

$-100 - 10 + 1 - 1 + 1000 + 1 - 100 - 1000 + 1 - 1000 + 1$

Séquence 2:

$000 + 1000 + 1000 - 1000 - 1 + 1000 - 1 + 1000 + 1 - 1 + 1$

↳ Décoder les séquences suivantes en code HDB2:

Séquence 1:

00000000000001000111010001

Séquence 2:

110001100011100010001000000

## B.2 Interprétation des codes

### Interprétation des codes

- Considérons le code suivant: 100100. Traduire le code en point (ti, impulsion courte), tiret (taah) ou espace.
- Considérons le code suivant: +1/-3/-1/+3/+1/-3 et le fait que le code comporte deux messages différents. Le code

## B.3 Notion d'entropie de source

### Notion d'entropie de source

Considérons un code formé d'éléments binaires correspondant à 4 états:

- Proposer un alphabet correspondant aux différents éléments  $\{x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}\}$

Au niveau du récepteur, les probabilités des différents éléments sont les suivantes:  $p_2, p_3, p_4, p_5$ . Définir l'entropie de la source.

- Si l'on considère le tableau de probabilité  $\{1, 0, 0, 0\}$ , calculer l'entropie de la source (bits/symbole).
- Si l'on considère le tableau de probabilité  $\{0.5, 0.5, 0, 0\}$ , calculer l'entropie de la source (bits/symbole).
- Quelles probabilités permettent de maximiser l'entropie de la source ?

## B.4 Représentation de code

### Représentation de code

De manière à représenter les codes transmis au niveau des supports de communication, il est possible d'utiliser le logiciel Octave. Des fonctions complémentaires sont disponibles et à télécharger au niveau de campus. Au préalable, il est nécessaire d'utiliser la fonction `start.m` de manière à initialiser les différentes variables globales le nombre 4. Vérifier la liste des paquets scientifiques disponible par la commande `pkg list`:

- `communications-1.2.1 /octave/packages/communications-1.2.1`
- `control-3.0.0 /usr/share/octave/packages/control-3.0.0`
- `image-2.6.1 /usr/share/octave/packages/image-2.6.1`
- `signal-1.3.2 /usr/share/octave/packages/signal-1.3.2`

### Encodage NRZ

- ↳ En utilisant la fonction `wave_gen.m`, générer un signal rectangulaire avec une amplitude unité et une durée de 1ms symbolisant l'encodage d'un bit à 1 par un code NRZ.
- ↳ Visualiser cette impulsion en utilisant la fonction `waveplot.m`

### Encodage Manchester

- ↳ En utilisant la fonction `wave_gen.m`, générer une impulsion de type Manchester avec une durée de 10 ms symbolisant l'encodage d'un bit de valeur 1.
- ↳ visualiser cette impulsion:

### Séquence

Considérer la séquence binaire suivante: 1 0 0 1 0

- ↳ En supposant un débit binaire de 1 kbits/s, générer la séquence de symboles encodés par un code conventionnel de type NRZ et le représenter.
- ↳ Réaliser la même représentation en utilisant un encodage Manchester
- ↳ Réaliser la même représentation en utilisant un encodage bipolaire.





# Chapitre C

## Des communications dans des canaux bruités

*Les systèmes de télécommunications numériques utilisent un support de transmission ou canal où par lequel sont envoyés les informations entre l'émetteur et le récepteur. En fonction de la nature physique (conducteur, hertzien, optique) de ces supports de transmission, différents phénomènes de propagation peuvent prendre place. En particulier:*

### Phénomènes de propagation

De nombreux canaux de communication en particulier hertzien sont particulièrement sensibles au bruit présent. On distingue deux types de variations fondamentales dans des canaux sans fil:

- **Atténuation d'espace:** les phénomènes mis en jeu (réflexion, diffraction, absorption) sont principalement liés à la propagation du signal et se traduit par une variation en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur. L'effet de masquage par des bâtiments, obstacles est un phénomène du second ordre sur l'atténuation du signal. Ces phénomènes ne dépendent de la fréquence.
- **Fluctuation d'échelle:** les variations d'amplitudes sont principalement le résultat des phénomènes d'interférence du fait des phénomènes de propagation dûs à des chemins ou trajets multiples. Le phénomène d'interférence sont localisés spatialement de l'ordre de la longueur d'onde et sont par contre dépendent de la fréquence.

A ces phénomènes d'atténuation et de fluctuation peut venir se rajouter des sources de bruit environnementales ou de brouillage. Il peut être vu en terme de composant comme un filtre linéaire aléatoire voire dispersif.

### Connaissances préalables

Il est nécessaire de connaître les notions suivantes du cours:

- Système de communication
- Notion de bruit blanc gaussien (BBAG)
- Théorème de Bayes
- Notion de probabilité d'erreur

### Aspect compréhension

Il est important de comprendre l'aspect probabiliste introduit par le bruit du support de transmission et de poser le signal reçu au niveau du récepteur en présence de bruit.

### Résolution des exercices

La démarche de résolution est de chercher à décrire sur le plan mathématique le signal reçu en tenant compte du bruit au niveau du récepteur. Puis d'estimer la probabilité d'erreur en fonction du seuil du récepteur. La détermination de la probabilité d'erreur permet d'estimer le nombre de bits sans erreur.

### Glossaire français-anglais

Canal binaire symétrique	CBSSM	Binary State Symmetric Channel	BSSC
Bruit blanc gaussien	BBAG	White Gaussian Noise	AWGN
Détecteur Maximum (à priori)	MAP	Maximum (a posteriori) Detector	MAP

## Autoévaluation

### Questionnaire

Questions	Réponses
1. Existe-t-il des supports de communication sans bruit ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
2. En réception, il n'existe comme source de bruit que celui du support de communication ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux <input type="checkbox"/> Si autre précisez
3. Un bruit blanc gaussien (BBAG) est caractérisé par une densité spectrale de puissance gaussienne et une moyenne temporel constante ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
4. Un support de communication additif blanc gaussien (BBAG) va convoluer le signal avec le bruit ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
5. Un détecteur cohérent comportant un seuil décision va permettre de supprimer le bruit du support de transmission ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux

## C.1 Détecteur Maximum à Posteriori (MAP) et canaux BBAG

### Codage:

La partie émission d'un système de communication fonctionne de la manière suivante:

- si le bit est à 1, un signal  $+5V$  est envoyé.
- si le bit est à 0, un signal  $-5V$  est envoyé.

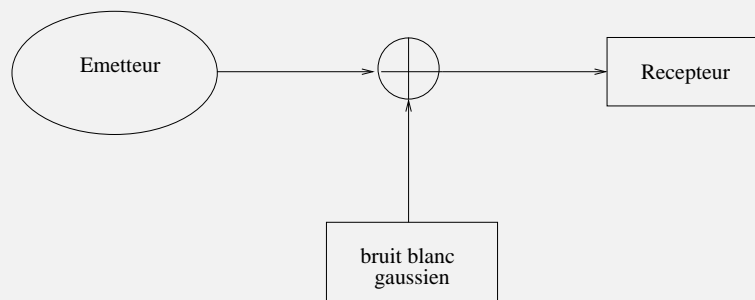
On fait l'hypothèse que les deux états possibles sont équiprobables durant la durée de la transmission.

↳ Identifier le type de canal de communication ?

En terme physique, le canal est caractérisé par l'ajout d'un bruit blanc gaussien décrit mathématiquement de la manière suivante :

$$y(t) = \alpha s(t) + n(t) \quad (\text{C.1})$$

Celui-ci est caractérisé par une moyenne de  $m = 1V$  et un écart type de ( $\sigma = 2V$ ). Il est supposé que celui-ci n'atténue pas le signal.



Une synchronisation est réalisée par la chaîne et réalise une opération d'échantillonnage chacun des bits étant échantillonné au milieu de chaque période.

- ↳ si l'échantillon a un niveau supérieur à  $> 0V$ , le récepteur décide qu'un échantillon de valeur "1" a été reçu.
- ↳ si l'échantillon a un niveau d'amplitude inférieur à  $< 0V$ , le récepteur décide qu'un échantillon "0" a été reçu.
- ↳ Représenter schématiquement le canal de communication
- ↳ Estimer la probabilité d'erreur sur un bit?
  - (a) Décrire les caractéristiques du signal reçu
  - (b) Tracer la densité de probabilité du signal reçu
  - (c) Calculer la probabilité d'erreur si un "0" a été détecté alors que c'était un bit à "1".
- ↳ Calculer le nombre de bits transmis sans erreur c'est à dire le taux erreur binaire.

## C.2 Canal radiomobile, notion de bande et de temps de cohérence

### Codage:

Les supports de transmission ne sont pas caractérisés que par une atténuation ou des fluctuations d'échelle. Les phénomènes d'interférences liés, de réfraction liés à la propagation de signaux multichemin. La figure suivante illustre différents scénarios possible d'interférence et de diffraction au niveau des canaux hertziens. Ces phénomènes sont amplifiés dans le cas de canaux radiomobile avec le déplacement du récepteur et le décalage de la fréquence dû au déplacement et la présence d'effet Doppler.

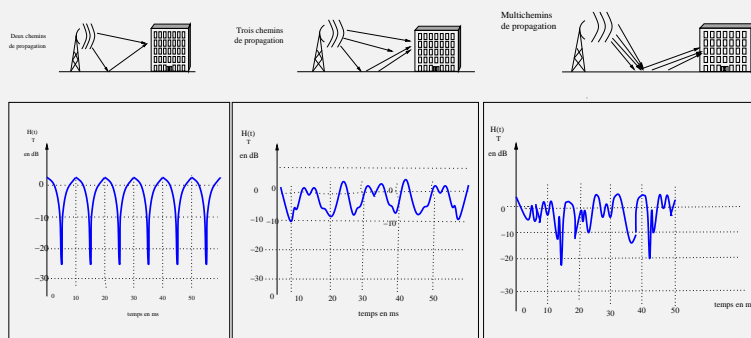
Il est possible d'écrire de manière simplifiée que le signal  $y(t)$  dans le cas d'un canal ou support de transmission variant dans le temps comme:

$$y(t) = \sum_{k=1}^K h(t,k)s(t - \tau_k(t)) + n(t) \quad (C.2)$$

Dans un premier temps, un modèle très simple de propagation à deux trajets est considéré, l'un direct sans atténuation et retard et l'autre où l'amplitude est atténuée d'un facteur 0.25 et subit un retard d'une période  $T$ .

↳ Ecrire le signal reçu et la réponse fréquentielle du support de transmission.

Considérer dans un second temps, les exemples de transmission suivante:



↳ Estimer graphiquement le temps de cohérence  $T_c$  pour lequel les variations de la réponse temporelle du canal radiomobile sont constant.

Il existe un lien entre le temps de cohérence du support de transmission et le décalage Doppler  $B_d$  des fréquences reçues:

$$B_d \approx \frac{1}{T_c} \quad (C.3)$$

↳ Estimer le décalage Doppler relatif en fréquence du support de transmission.



# Chapitre D

## Concept de Modulation Analogique

*L'une des opérations nécessaire afin de transmettre l'information à travers un canal ou un support de transmission est de le porter à une fréquence plus élevée par rapport au signal initial. Cette opération correspond à l'étape de modulation et est réalisée par l'intermédiaire d'un signal à plus haute fréquence appelée porteuse. La contrainte principale au niveau des modulations analogiques, est que le signal modulant varie de manière continu est nécessite des circuits spécifiques afin de venir moduler l'amplitude, la fréquence ou la phase de la porteuse afin de transmettre l'information.*

### Connaissances préalables

Il est nécessaire de connaître les notions suivantes:

- Principes de modulation d'amplitude
- Principes de modulation de fréquence

### Aspect compréhension

Il est nécessaire d'avoir compris les différences entre un signal modulant, la porteuse (correspondant au signal de fréquence élevée) et le signal modulé. La différence entre les paramètres d'amplitude et de fréquence est également importante. L'une des problématiques est l'occupation spectrale du signal après l'étape de modulation par rapport à la bande passante totale du support de transmission.

### Résolution des exercices

Le premier exercice nécessite d'écrire l'expression mathématique du signal modulé en amplitude et de représenter son spectre. Ceci permet d'estimer la bande en fréquence occupée et ainsi d'extraire les caractéristiques du signal modulé. Le second exercice nécessite d'écrire l'expression du signal modulé en fréquence et d'identifier grâce à l'excursion en fréquence, déviation instantanée de fréquence ainsi que la bande de fréquence occupée.



## Autoévaluation

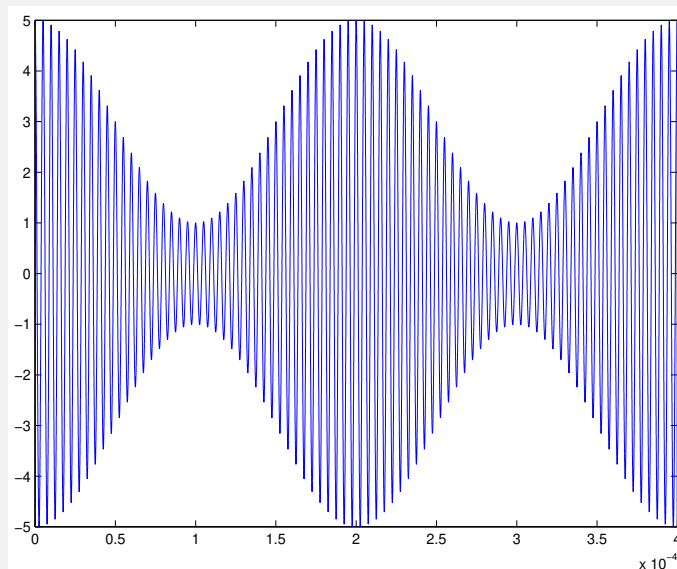
## Questionnaire

Questions	Réponses
1. En terme de modulation analogique, les informations sont transmises par les paramètres de fréquence, de phase ou d'amplitude des signaux ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
2. La modulation bande latérale uniquement (BLU) occupe deux fois moins de bande passante que la double bande avec porteuse (DBSP)?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux <input type="checkbox"/> Si autre précisez
3. Un signal modulé en amplitude sans porteuse (DBSP) peut être démodulé simplement en ne gardant que les variations de l'enveloppe du signal ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
4. Le portage en fréquence peut être modélisé par l'équation $s(t) \otimes \delta(\nu - f_p)$ où $f_p$ est la fréquence de la porteuse. S'agit-il d'une modulation de type:	<input type="checkbox"/> DBAP ? <input type="checkbox"/> DBSP ? <input type="checkbox"/> BLU ? <input type="checkbox"/> FM ?
5. Le signal modulé $s(t) = A_p \cos(2\pi f_p t + \phi(t))$ correspond-t-il à un signal ?	<input type="checkbox"/> Modulé en fréquence <input type="checkbox"/> Modulé en phase
6. Pour une modulation de fréquence, si l'indice de modulation est $\beta$ est de 2 et la fréquence de porteuse est de 4 kHz, estimez la variation instantanée de fréquence	<input type="checkbox"/> $\pm 4$ kHz ? <input type="checkbox"/> $\pm 8$ kHz ? <input type="checkbox"/> $\pm 16$ kHz ?
7. En pratique, une modulation de fréquence occupe la même bande spectrale qu'une modulation d'amplitude	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
8. La bande de Carson $B_c$ permettant d'estimer la bande occupée par un signal modulé en fréquence de fréquence maximale $f_m$ est :	<input type="checkbox"/> $B_c = 2(\beta + 1)f_m$ <input type="checkbox"/> $B_c = 2\beta f_m$ <input type="checkbox"/> Les deux en fonction de l'application
9. Les modulations analogiques AM et FM demeurent utilisés uniquement dans le cadre de système de radiodiffusion terrestre :	<input type="checkbox"/> Vrai ? <input type="checkbox"/> Faux ? <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

## D.1 Analyse d'un signal Modulé en Amplitude

### Analyse d'un signal AM:

Un oscilloscope permet de donner une représentation temporelle d'un signal électrique. Un signal modulé en amplitude (AM) est capté par un récepteur. Sa fréquence de porteuse est de 200 kHz, sa fréquence modulante est de 5 kHz. Le signal reçu est envoyé sur un oscilloscope, l'amplitude est en volt :

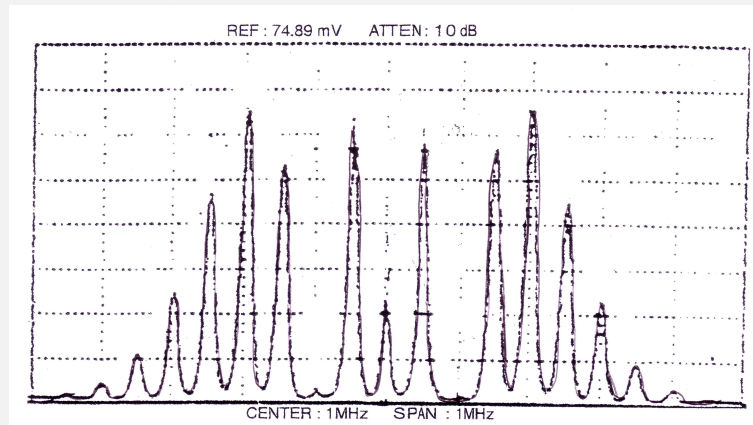


- ↳ Quelles sont les fréquences contenues dans le signal modulé ?
- ↳ Quelle est la bande de fréquence du signal modulé ?
- ↳ Quel est l'indice de modulation ?
- ↳ Calculer la répartition de la puissance contenue dans la porteuse et dans chacune des bandes latérales.
- ↳ Au niveau du signal modulé en amplitude, estimer le temps nécessaire pour que l'amplitude du signal modulé au maximum (5V) retourne à une amplitude unité ?

## D.2 Analyse d'un Spectre Modulé en Fréquence

### Analyse d'un signal FM:

Soit le spectre visualisé par l'analyseur de spectre, d'un signal porteur modulé en fréquence par un modulant sinusoïdal :



- ↻ Rappeler l'expression temporelle du signal modulé en fréquence. Donner la définition du taux de modulation  $\beta$ .
- ↻ Déterminer graphiquement: la fréquence de la porteuse et la fréquence du modulant.
- ↻ En reprenant une valeur remarquable sur le spectre et en s'aidant du graphe fourni donnant l'évolution des fonctions de Bessel, donner la valeur de  $\beta$ .
- ↻ L'amplitude du modulant est mesuré :  $A_m = 1V$ . Déduire la valeur de la sensibilité du modulateur.
- ↻ Donner l'encombrement spectral  $B_c$  du signal modulé.

# Chapitre E

## Concept de Modulation Numérique

*L'une des opérations nécessaire afin de transmettre l'information à travers un canal ou un support de transmission est de le porter à une fréquence plus élevée que celle du signal initial. Cette opération correspond à l'étape de modulation et est réalisée par l'intermédiaire d'une porteuse. Contrairement aux modulations analogiques, où une série de bits transmis à travers le support de transmission, il est également nécessaire de le porter en fréquence. Le principe de modulations du signal en amplitude et en fréquence demeure mais nécessite d'être adapté aux propriétés du signal numérique. Il est, par ailleurs, possible d'accéder à un nombre très important d'états en diversifiant les paramètres de phase et d'amplitude. La modulation numérique permet d'envoyer l'information sous la forme de paquets.*

### Connaissances préalables

Il est nécessaire de connaître les notions suivantes:

- Principes de modulation d'amplitude numérique (MDA)
- Principes de modulation de fréquence numérique (FSK)
- Principes de modulation de phase (PSK)

### Aspect compréhension

Il est important d'avoir compris les différences entre les différents types de modulation numérique (amplitude, phase et fréquence) et les sauts entre les différents états.

### Résolution des exercices

Le premier exercice nécessite d'écrire la constellation d'une modulation en phase et en amplitude (QAM). Il est nécessaire de poser les différences entre symboles, bits et le modulateur IQ. Le second exercice correspond à l'étude d'une modulation V29 également en amplitude et en phase, plus complexe et caractérisé par des changement et les transition de phase entre les différent symboles.

## Autoévaluation

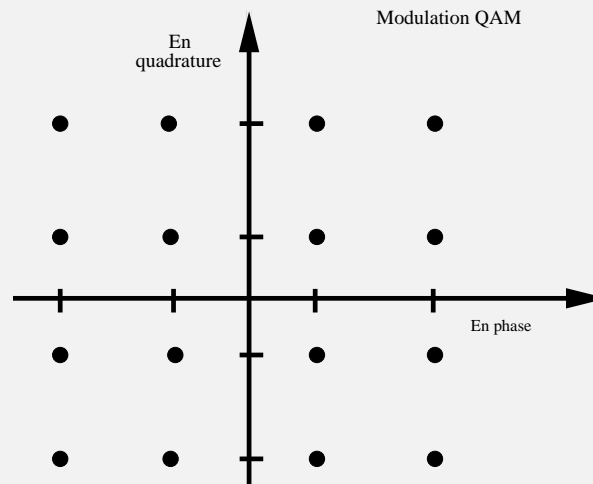
## Questionnaire

Questions	Réponses
1. La modulation numérique la plus simple est la modulation dite tout ou rien (OOK en anglais)?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
2. En pratique, réaliser une modulation numérique est plus simple qu'une modulation analogique ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
3. La notion de constellation c'est à dire un diagramme représentant les différents états selon $(x,y)$ permet de caractériser la modulation numérique	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
4. En terme de modulation numérique, il n'est pas possible de moduler à la fois l'amplitude et la phase	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
5. L'expression suivante du signal $x(t) = A\cos(2\pi f_k t + \phi_0)$ où $f_k$ est-elle caractéristique d'une modulation numérique	<input type="checkbox"/> MDA ? <input type="checkbox"/> PSK ? <input type="checkbox"/> QAM ? <input type="checkbox"/> FSK ?
6. Les modulations numériques standard de type (PSK) ou (QAM) sont réalisées à partir d'un circuit comportant deux porteuses en quadrature de phase ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
7. Afin de démoduler un signal numérique, il est nécessaire de réaliser une démodulation cohérente ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
8. La majorité des systèmes de diffusion herztien (mobile 2G,3G,4G), Wifi utilisent des modulations numériques ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux

## E.1 Modulation d'amplitude en quadrature et de phase

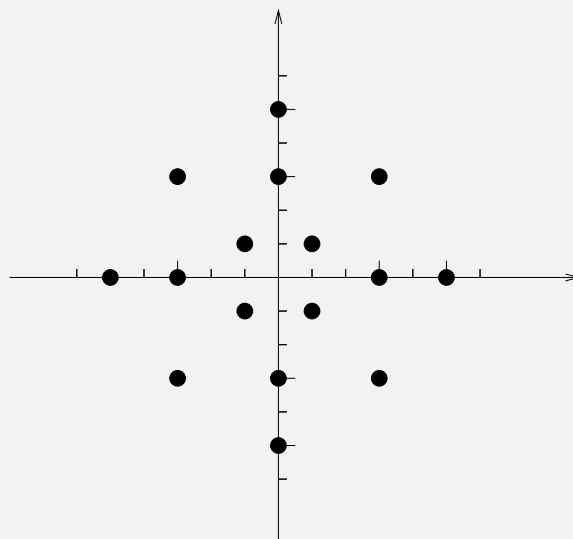
### Analyse de la modulation QAM:

L'on désire réaliser un modulateur QAM (Quadrature Amplitude Modulation= modulation d'amplitude et de phase). La constellation des différents états du signal modulé est la suivante :



- ↯ Combien existe-t-il de symboles pour ce type de modulation ?
- ↯ Combien de bits sera-t-il possible d'envoyer simultanément ?
- ↯ Le système est implémenté avec un modulateur IQ. Donner les différents niveaux analogiques qu'il convient d'appliquer sur les entrées I et Q du modulateur.
- ↯ Si l'on désire, dans ce cas, transmettre un signal numérique à 30 Mbits, quelle devra être la fréquence des signaux en bande de base sur les voies dites I et Q ?

Les dispositifs à base de fax utilisent une modulation un peu différente dite V29 (télécopie rapide). Un rapport signal sur bruit de 40 dB est nécessaire. La modulation V29 est en réalité une modulation de type QAM, dont le débit est de 9600 bits/s. Sa constellation est représentée sur la figure ci-dessous:



Les 4 bits  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  utilisés pour coder chaque symbole suivent la règle suivante :



# Chapitre F

## Principes de Démodulation

*L'une des opérations nécessaire dans la chaîne de réception d'un signal est la démodulation. Celle-ci correspond à l'inverse de l'étape de modulation et consiste à enlever le portage en fréquence et à le remettre le signal en bande de base. La démodulation cohérente consiste à convoluer le signal modulé  $p$  par une porteuse de même fréquence et de phase et à filtrer la partie du signal à haute fréquence pour ne garder que la partie en bande de base.*

### Connaissances préalables

Il est nécessaire de connaître les notions suivantes:

- Principes de démodulation
- Principes de cohérente

### Aspect compréhension

Il est important d'avoir compris les différences entre les différents types de modulation numérique (amplitude, phase et fréquence) et les sauts possible entre les différents états de la constellation.

### Résolution de l' exercice

L'exercice est un circuit permettant la récupération de la porteuse par synchronisation. La récupération de la porteuse est en effet nécessaire de manière à diminuer l'influence des variations de phase ou de fréquence dans le cadre d'une démodulation cohérente.



## Autoévaluation

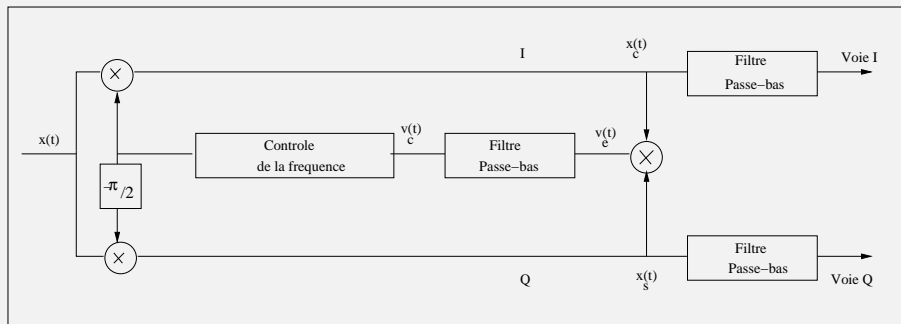
### Analyse d'un signal AM:

Questions	Réponses
1. Le principe de démodulation consiste à convoluer en temporel le signal par une porteuse équivalente ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
2. La démodulation cohérente est adaptée pour une modulation d'amplitude ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
3. Pour démoduler un signal modulé en amplitude, un circuit simple RC avec une diode suffit ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
4. La démodulation en fréquence peut être réalisé en transformant la variation de fréquence en amplitude par un circuit appelé discriminateur ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
5. Quelle est l'influence de variations de fréquence ou de phase de la porteuse au niveau de la démodulation sont-elles importantes ?	<input type="checkbox"/> Distorton fréquentielle ? <input type="checkbox"/> Variation d'amplitude ?

## F.1 Boucle de Costas ou Circuit de Récupération de la Porteuse

### Boucle de Costas

Le circuit de la figure suivante est considéré :



$x(t)$  est un signal numérique MDP2 (modulation de phase à deux états, 0 et  $\pi$ ), d'amplitude  $A$ , de débit binaire  $1/T$  et de fréquence de porteuse  $f_o$ :

$$x(t) = A \cos(2\pi f_o t + \theta(t))$$

avec  $\theta(t) = 0$  ou  $\pi$ . L'oscillateur commandé en tension délivre le signal  $v_c(t)$  :

$$v_c(t) = \cos(2\pi f_o t + \theta_o(t))$$

✎ Exprimer  $v_c(t)$  en fonction de l'erreur de phase  $\phi(t) = [\theta_o(t) - \theta(t)]$

✎ Dans le cas où  $v_c(t)$  est nul, que valent  $x_s(t)$  et  $x_c(t)$  ? Y a t'il ambiguïté par rapport à la suite binaire initiale ?



# Chapitre G

## Notion de Chaîne de Transmission

Le schéma ci-dessous résume le concept de chaîne de télécommunication complète. Elle distingue les deux parties différentes à savoir la partie émission de la partie réception qui ont des fonctions totalement différentes dans la chaîne complète.

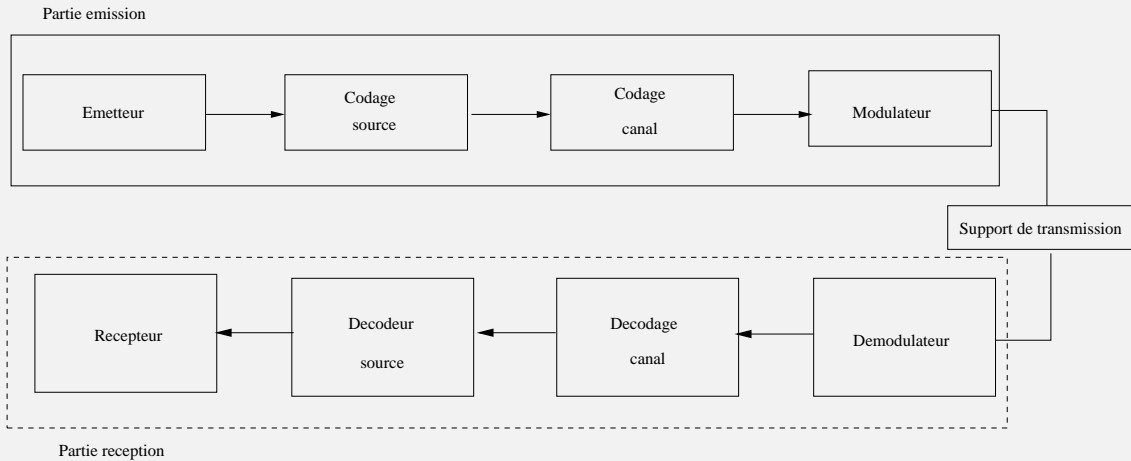
### Autoévaluation

Questionnaire	
Questions	Réponses
1. Les trois blocs principaux d'une chaîne de transmission sont l'émetteur, le support de transmission et le récepteur ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
2. Au niveau du récepteur, la présence d'un filtre adapté permet de diminuer le bruit du support de transmission ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
3. La performance d'une chaîne de transmission est mesuré par le taux erreur binaire ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
4. La distortion entre symboles est une caractéristique importante de la chaîne de transmission ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
5. Le filtre est adapté à la forme d'onde des signaux de la générée par la modulation numérique ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
6. En réception, le détecteur est composé d'un filtre adapté et d'un détecteur à seuils ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
7. Le filtre en cosinus sur-élevé dit Roll-off permet de diminuer l'interférence entre symboles ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux
8. Au niveau d'une chaîne de transmission, plus l'oeil est ouvert et plus la distortion entre symboles est importante ?	<input type="checkbox"/> Vrai <input type="checkbox"/> Faux

## G.1 Compréhension de la globalité d'une chaîne de transmission

### Notion de chaîne globale de transmission

La figure suivante résume la structure simplifiée de l'ensemble d'une chaîne d'un système de télécommunication:



- ☞ Expliciter la notion de source numérique.
- ☞ Entre le codage de source et le codeur canal, il peut exister une étape de chiffrement. Distinguer la différence entre la redondance introduite par le codeur canal et l'étape de chiffrement.
- ☞ En quoi, l'étape de modulation est-elle importante ?
- ☞ Si un modèle multi-entrée, multi-sortie (MIMO) est considéré. Comment l'architecture du système de communication est-elle modifiée ?
- ☞ Quelles sont les opérations implémentées par le décodeur source ?
- ☞ Analyser l'impact en terme de *fonctionnalité*, l'absence de chaque élément de la chaîne.

## G.2 Simulation de la performance d'une chaîne de transmission

### Simulation de chaîne de transmission

- ☞ En utilisant la boîte à outil télécommunication sous Octave, générer un signal modulé de type ASK à l'aide d'une séquence aléatoire de 500 bits.
- ☞ Ce signal se propage au travers d'un canal de transmission avec un gain unité, une bande passante de  $49\text{kHz}$  et un bruit blanc gaussien additif caractérisé par une variance de  $\sigma^2 = 1$ .
- ☞ Réaliser une détection cohérente et représenter le diagramme d'oeil à la sortie du filtre adapté. En déduire le circuit optimal de décision et le taux d'erreur.

**Variables mathématiques (nécessaire)**

$a(t)$  Signal modulant

$A_m$  Amplitude du modulant

$b(t)$  Bruit

$B_c$  Encombrement spectral

$\beta$  Indice de modulation en fréquence

$D$  D'ebit binaire

$f_0$  Fréquence de la porteuse

$f_c$  Fréquence de la porteuse

$F_p$  Fréquence de la porteuse

$k$  Sensibilité du modulateur

$n$  Nombre de bits

$N_0$  Densité spectrale de bruit

$m(t)$  Signal modulant

$m$  Indice de modulation

$P(t)$  Porteuse

$Q_0, Q_1, Q_2, Q_3$  Bit (modulation V29)

$v(t)$  Tension du détecteur

$v_c(t)$  Erreur de phase

$s(t)$  Signal transmis

$T_b$  Temps symbole

$T$  Période d'horloge

$\theta$  Phase du modulant

$z(t)$  Signal psk-8

# Index

- Architecture de système de communication, 29
- Atténuation d'espace, 12
  
- Bande de Carson, 19
- Bande latérale, 19
- Bande passante, 3
- Bilan de puissance, 3
- Bit, 7
- Boucle de Costas, 27
- Bruit blanc additif gaussien, 3
- Bruit blanc gaussien, 12
  
- Canal hertzien, 12
- Canal radiomobile, 12
- Capacité physique, 3
- Codage bipolaire, 7
- Codage HBDn, 7
- Codage Manchester, 7
- Codage NRZ (Non Retour à zero), 7
- Codage RZ (Retour à zero), 7
- Coefficient de dispersion chromatique, 3
  
- Débit binaire, 3
- Décalage herztien, 12
- Détection de maximum (à posteriori), 12
  
- Effet doppler, 12
- Encombrement spectral, 19
  
- Fibre optique monomode, 3
- Fluctuation d'échelle, 12
  
- Indice de Modulation, 19
  
- Ligne téléphonique, 3
  
- Milieu de communication, 3
- Modèle emetteur-support-récepteur, 29
- Modèle multi-entrée multi-sortie (MIMO), 29
- Mode de communication, 3
- Modulation, 19
- Modulation analogique, 19
- Modulation d'Amplitude, 19
- Modulation d'amplitude en quadrature (APSK), 23
- Modulation d'amplitude en quadrature (QAM), 23
- Modulation d'amplitude et de phase (PSK), 23
- Modulation de fréquence, 19
- Modulation de phase, 19
- Modulation de phase à deux états (MDP2), 27
- Modulation en quadrature (MDA), 23
- Modulation numérique, 23
- Modulation par déplacement d'amplitude (MDA), 23
  
- Notion d'entropie de Source, 7
- Notion d'interférence en symbole (IES), 29
- Notion de filtre adapté, 29
- Notion de filtre cosinus surélevé (Roll-off), 29
- Notion de mot, 7
- Notion de synchronisation, 7
- Notion de taux erreur binaire, 29
  
- Porteuse, 19
- Principe de démodulation, 27
  
- Rapidité de modulation, 3
  
- Seuil de détection, 12
- Signal M-aire, 3
- Signal modulant, 19
- Support de transmission, 3
  
- Temps de cohérence, 12
- Translation en fréquence, 19
  
- Valence d'un signal, 3
- Voie de communication, 3