

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Pour l'obtention du

DIPLÔME de MASTER

En : Télécommunication

Spécialité : Réseaux de télécommunications(RT)

Par : **BOUDJEMA Ilyas**

Sujet

**Etudes des formats de modulations et de démodulations :
DPSK et QAM**

Soutenu publiquement, en **juin 2019** devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------|-----|---------------|----------------------|
| Mr. BOUACHA. A | MCA | Univ. Tlemcen | Président |
| Mr. KHELLADI. M | MCA | Univ. Tlemcen | Directeur de mémoire |
| Mr. KARIM F A | MCA | Univ. Tlemcen | Examinateur |
| Mr. IRID H. S M | MCB | Univ. Tlemcen | Examinateur |

Année universitaire : 2018 - 2019

سورة التوبة

Dédicace

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédis ce
modeste travail de fin d'étude À mes chers parents :*

*+ Okkacha qui représente pour moi le symbole de patience et du
courage*

*+ Nouria, qui représente pour moi l'exemple du Sacrifice du
dévouement, et de l'honnêteté.*

+ Mes très chères sœurs et mon frère .

*Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon amour et
mon affection.*

Que DIEU vous accorde santé et prospérité.

ILYAS...

Remerciement

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

*Ce travail a été effectué à la faculté de technologie, Université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, sous la direction du **Mr. KHELLADI Mounir** (MCA) à la faculté de technologie, université de Tlemcen, ma plus grande gratitude va à mon encadreur, pour sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordée, et surtout ses judicieux conseils.*

*J'exprime toute ma reconnaissance à **Mr. BOUACHA Abdelhafid** (MCA), à la faculté de technologie, université de Tlemcen, pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire, que **Mr. KARIM Fethallah** (MCA) à la faculté de technologie université de Tlemcen, trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail, que **Mr. IRID HADJ S M** (MCB), à la faculté de technologie, université de Tlemcen, trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail.*

Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce modeste mémoire.

Merci...

Résumé

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible. La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis.

Notre travail sera emporté sur l'étude et la comparaison de la modulation DPSK et QAM en utilisant *le logiciel Optisystem*.

Mots clés : Modulation, Démodulation, Diagramme de constellation, Diagramme de L'œil, séquence binaire.

Abstract

Digital transmission systems convey information between an emitter and a receiver by using a physical medium such as cable, optical fiber or propagation over a radio channel. The signals transported can be either directly of digital origin, as in the data networks, or of analog origin (speech, image ...) but converted into a digital form. The task of the transmission system is to convey information from the emitter to the receiver as reliably as possible. The role of the modulation is to adapt the signal spectrum to the channel (physical environment) on which it will be emitted. Our work will be focused on the study and comparison of DPSK and QAM modulation using *Optisystem software*.

Key words: Modulation, Demodulation, Constellation Diagram, Eye Diagram, Binary Sequence.

Sommaire

| | |
|----------------------------|------|
| LISTE DES FIGURES..... | IX |
| LISTE DES ABREVIATION..... | XIII |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |

CHAPITRE I . MODULATION ANALOGIQUE

| | |
|--|----|
| I. Généralités..... | 3 |
| I.1 Présentation générale sur le traitement du signal..... | 3 |
| I.1.1 Transmission des signaux..... | 3 |
| I.2 Transmission d'informations..... | 5 |
| I.2.1 Absorption et distorsion dans le milieu..... | 5 |
| I.2.2 Le spectre..... | 5 |
| I.3 Transmission en bande de base..... | 6 |
| I.4 Modulation, modulant, modulé..... | 7 |
| I.4.1 Principe de la modulation..... | 8 |
| I.4.2 Intérêt de la modulation..... | 9 |
| II Modulation..... | 10 |
| II.1 Signal sinusoïdal..... | 11 |
| II.2 Modulation analogique sur une porteuse sinusoïdale..... | 11 |
| II.2.1 Synoptique d'une chaîne de transmission analogique..... | 11 |
| a. Mélangeur..... | 12 |
| II.2.2 Principe du récepteur superhétérodyne..... | 13 |
| a. Fréquence image x | 13 |
| b. Filtres sélectifs..... | 14 |
| II.3 Le canal de transmission..... | 14 |
| II.3.1 L'effet du canal..... | 14 |
| III Types de modulation analogiques..... | 15 |
| III.I Modulation d'amplitude..... | 15 |
| III.1.1 Taux de modulation m (l'indice de modulation m)..... | 16 |
| III.1.2 Bande occupée..... | 17 |

| | | |
|---------|--|----|
| III.1.3 | Occupation spectrale par une modulation d'amplitude..... | 17 |
| a. | Démonstration..... | 17 |
| III.1.4 | Différentes modulations d'amplitude..... | 18 |
| III.1.5 | Démodulation non cohérente (ou non cohérente)..... | 18 |
| a. | Détection d'enveloppe..... | 18 |
| III.2 | Modulation de phase..... | 19 |
| III.2.1 | Limite de la PM..... | 19 |
| III.3 | Modulation de fréquence..... | 19 |
| III.3.1 | Relation entre phase et fréquence..... | 20 |
| III.3.2 | Exemple Modulation de fréquence..... | 21 |
| III.3.3 | Indice de modulation | 21 |
| IV | Conclusion..... | 21 |

CHAPITRE II . MODULATION NUMERIQUE

| | | |
|--------|---|----|
| I. | Généralités..... | 22 |
| I.1 | Définitions et appellations..... | 23 |
| I.2 | Principes de la modulation numérique..... | 24 |
| I.3 | critères de choix d'une modulation..... | 26 |
| II. | Types de modulations numériques..... | 27 |
| II.1 | Modulation par déplacement d'amplitude (MDA)..... | 27 |
| II.1.1 | Modulation par tout ou rien..... | 29 |
| II.1.2 | Modulation à "M-Etats" | 29 |
| II.1.2 | Modulation et démodulation..... | 31 |
| II.1.3 | Conclusion sur la MDA..... | 31 |
| II.2 | Modulation par déplacement de phase (MDP)..... | 32 |
| II.2.1 | Exemple : La modulation "MDP-2"..... | 34 |
| II.2.2 | Chronogramme de la "MDP-2" | 35 |
| II.2.3 | Modulation et démodulation..... | 35 |
| II.2.4 | Le spectre de la "MDP-2" | 36 |
| II.2.5 | Conclusion sur la MDP..... | 36 |

| | |
|---|----|
| II.3 Modulation par déplacement de fréquence (MDF)..... | 36 |
| II.3.1 La modulation MDF à phase discontinue..... | 38 |
| II.3.2 Exemple : MDF binaire à phase discontinue..... | 39 |
| II.3.3 La modulation MDF à phase continue MDF-PC..... | 39 |
| II.3.4 Exemple : MDF binaire à phase continue..... | 40 |
| II.3.5 Conclusion sur la MDF..... | 41 |

CHAPITRE III . MODULATION DPSK ET QAM

| | |
|---|----|
| I. Introduction..... | 42 |
| II. Modulation par déplacement de phase différentielle (DPSK)..... | 42 |
| II.1 Modulateur DPSK..... | 44 |
| II.2 Démodulateur DPSK..... | 44 |
| II.3 Modulation par déplacement de phase différentielle (DPSK)..... | 45 |
| II.3.1 Base de fonctionnement..... | 45 |
| II.4 Differential Phase Shift Keying (DPSK)..... | 46 |
| III. Modulation d’amplitude en quadrature (QAM)..... | 50 |
| III.1 Principe de la modulation QAM..... | 50 |
| III.2 Démodulateur QAM..... | 51 |
| III.4 Formes du modulateurs QAM..... | 54 |
| III.5 Modulation d’amplitude sur deux porteuses en quadratures (MAQ)..... | 55 |
| III.5.1 Les constellations MAQ-M..... | 55 |
| III.5.2 Efficacité spectrale..... | 56 |
| III.5.3 Probabilité d’erreur M-QAM..... | 57 |
| III.5.4 Densité spectrale de puissance..... | 58 |
| III. Comparaison entre QAM, 16 PSK and APSK : diagramme de constellation..... | 59 |

CHAPITRE IV . SIMULATION ET COMPARAISON DES RESULTATS

| | |
|---|----|
| I. Introduction..... | 60 |
| I.1 Présentation du logiciel de simulation..... | 60 |
| I.2 Applications d’Optisystem..... | 61 |

| | |
|--|----|
| I.3 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem..... | 61 |
| I.4 Avantage du logiciel OptiSystem..... | 62 |
| II. Support de transmission..... | 62 |
| II.1 la fibre optique..... | 62 |
| II.2 Diode électroluminescente (DEL)..... | 63 |
| II.3 Diodes laser..... | 64 |
| II.4 Photodiode..... | 64 |
| II.5 Modulation de la lumière..... | 65 |
| II.5.1 L'effet électrooptique..... | 65 |
| II.6 L'amplificateur optique dopé à l'erbium..... | 66 |
| III. Simulation pour la modulation DPSK..... | 67 |
| III.1 Modulation DPSK (2bit/Symbol)..... | 68 |
| III.2 Modulation DPSK (4 bit/symbol)..... | 71 |
| III.3 Modulation DPSK (6bit/symbol)..... | 74 |
| IV. Modulation QAM..... | 77 |
| IV.1 Modulation QAM (2bit/Symbol)..... | 78 |
| IV.2 Modulation QAM (4bit/Symbol)..... | 81 |
| IV.3 Modulation QAM (6bit/Symbol)..... | 84 |
| V. Discussion..... | 87 |
| VI. Conclusion générale..... | 90 |
| Bibliographie..... | 92 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1.1: Synoptique de la transmission d'information..... | 4 |
| Figure 1.2: Amplitude d'une onde en fonction de la distance parcourue..... | 5 |
| Figure 1.3: Représentations temporelle puis spectrale d'un signal carré..... | 6 |
| Figures 1.4 : Représentation temporelle et fréquentielle de la note « LA »..... | 7 |
| Figure 1.5 : Les différents types de modulation..... | 11 |
| Figures 1.6 schéma synoptique d'un émetteur /récepteur..... | 12 |
| Figure 1.7: Principe d'un mélangeur..... | 13 |
| Figure 1.8 : principe d'un récepteur superhétérodyne..... | 14 |
| Figure1.10 : signal modulant, porteuse et signal résultant AM..... | 15 |
| Figure 1.9: Principe d'un modulateur d'amplitude..... | 15 |
| Figure1.10 : signal modulant, porteuse et signal résultant AM..... | 16 |
| Figure 1.11 : représentation du taux de modulation pour plusieurs valeur de m..... | 16 |
| Figure 1.12: Représentation d'occupation spectrale d'une modulation d'amplitude..... | 17 |
| Figure 1.13: Modulation de phase..... | 19 |
| Figures 1.14: Modulation fréquentielle..... | 20 |
| <hr/> | |
| Figure II.1 : schéma d'un système de transmission numérique..... | 22 |
| Figure II.2 : Forme générale du modulateur..... | 25 |
| Figure II.4 : Définition d'une constellation numérique..... | 26 |
| Figure II.5 : Densité spectrale de puissance..... | 27 |
| Figure II.6 | 27 |
| Figure II.7 : Signal ASK..... | 28 |
| Figure II.8 : Modulation d'amplitude par tout ou rien (OOK)..... | 29 |
| Figure II.10 : Constellation de la modulation d'amplitude à M états..... | 30 |
| Figure II.11 : Modulation d'amplitude MDA 4 Symétrique..... | 30 |
| Figure II.13 : Démodulation cohérente sur une seule porteuse..... | 31 |
| Figure II.14 :representation de diagramme de constellation..... | 32 |
| Figure II.15 : Constellation des symboles en modulation de phase MDP-M..... | 34 |
| Figure II.16 : Constellation de la modulation de phase MDP-2..... | 34 |
| Figure II.17 : Chronogramme de la modulation de phase MDP-2..... | 35 |
| Figure II.18 : Modulateur MDP-2..... | 35 |
| Figure II.19 : Démodulateur MDP-2..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Figure II.20 :MDF..... | 36 |
| Figure II.21 : Modulateur MDF à commutation d'oscillateurs..... | 38 |
| Figure II.22 : Chronogramme MDF binaire à phase discontinue..... | 39 |
| Figure II.23 : Modulateur MDF-M-PC..... | 40 |
| Figure II.24 : Démodulateur MDF-M-PC..... | 40 |
| Figure II.25 : Chronogramme d'une MDF binaire à phase continue..... | 40 |
| Figure II.26 : Treillis des phases en MDF binaire à phase continue..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Figure III.1: Modulateur DPSK..... | 43 |
| Figure III.2 : Génération of DPSK..... | 43 |
| Figure III.3 : Forme d'onde pour la DPSK..... | 43 |
| Figure III.4 : Démodulateur DPSK..... | 44 |
| Fig. III.5 : Représentation du champ électrique des formats OOK (en haut) et PSK (en bas), diagramme de constellation (centre) et spectre (à droite)..... | 46 |
| Figure III.6: amélioration de la sensibilité par DPSK..... | 48 |
| Figure III.7 : La Forme générale du modulateur..... | 48 |
| Figure III.8 : Principe d'un modulateur QAM..... | 51 |
| Figure III.9 : Modulateur à 8-QAM..... | 51 |
| Figure III.10: Démodulateur QAM..... | 52 |
| Figure III.11 : Constellation pour la modulation MAQ- E | 53 |
| Figure III.12 : Modulation d'amplitude et de phase à plusieurs niveaux (M-aire)..... | 54 |
| Figure III.13: Constellations MAQ-16 et MAQ-64..... | 56 |
| Figure III.14 : Représentation des probabilité d'erreur de symbole pour M-QAM | 58 |
| Figure III.15 : diagramme de constellation,(Comparaison entre QAM,16 PSK and APSK).. | 59 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.1 : Bibliothèque des composants..... | 60 |
| Figure IV.2 : Interface d'utilisateur graphique (GUI)..... | 61 |
| Figure IV.3 : support de transmission optique..... | 62 |
| Fig. IV.4: Anatomie d'une fibre optique..... | 63 |
| Figure IV.5 : Exemple de deux types de profil d'indice..... | 63 |
| Figure IV.6 : Diode laser..... | 64 |
| Figure IV.7: Jonction PN polarisée en inverse..... | 65 |
| Figure IV.8: Modulation électrooptique de phase..... | 65 |
| Figure IV.9 : structure de l'amplificateur à fibre optique dopé en erbium..... | 66 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.10 : Schéma d'un E/R à base d'un modulateur/démodulateur DPSK..... | 67 |
| Figure IV.11 : Débit binaire à l'émission..... | 68 |
| Figure IV.12 : Débit binaire à la réception..... | 68 |
| Figure IV.13 : Diagramme de Constellation après modulation..... | 69 |
| Figure IV.14 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite..... | 69 |
| Figure IV.15 : Diagramme de L'œil à la réception | 70 |
| Figure IV.16: Densité Spectrale de Puissance..... | 70 |
| Figure IV.17 : Débit binaire à l'émission..... | 71 |
| Figure IV.18 : Débit binaire à la réception..... | 71 |
| Figure IV.19 : Diagramme de Constellation après modulation..... | 72 |
| Figure IV.20 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite..... | 72 |
| Figure IV.21 : Diagramme de L'œil à la réception..... | 73 |
| Figure IV.22: Densité Spectrale de Puissance..... | 73 |
| Figure IV.23 : Débit binaire à l'émission..... | 74 |
| Figure IV.24 : Débit binaire à la réception..... | 74 |
| Figure IV.25 : Diagramme de Constellation après modulation..... | 75 |
| Figure IV.26 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite..... | 75 |
| Figure IV.27 : Diagramme de L'œil à la réception..... | 76 |
| Figure IV.28: Densité Spectrale de Puissance..... | 76 |
| Figure IV.29 : Schéma d'un E/R à base d'un modulateur/démodulateur QAM..... | 77 |
| Figure IV.30 : Débit binaire à l'émission..... | 78 |
| Figure IV.31 : Débit binaire à la réception..... | 78 |
| Figure IV.32 : Diagramme de Constellation après modulation..... | 79 |
| Figure IV.33 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite..... | 79 |
| Figure IV.34 : Diagramme de L'œil à la réception..... | 80 |
| Figure IV.35: Densité Spectrale de Puissance..... | 80 |
| Figure IV.36 : Débit binaire à l'émission..... | 81 |
| Figure IV.37 : Débit binaire à la réception..... | 81 |
| Figure IV.38 : Diagramme de Constellation après modulation..... | 82 |
| Figure IV.39 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite..... | 82 |
| Figure IV.40 : Diagramme de L'œil à la réception..... | 83 |
| Figure IV.41: Densité Spectrale de Puissance..... | 83 |
| Figure IV.42 : Débit binaire à l'émission..... | 84 |
| Figure IV.43 : Débit binaire à la réception..... | 84 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.44 : Diagramme de Constellation après modulation..... | 85 |
| Figure IV.45 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite..... | 85 |
| Figure IV.46 : Diagramme de L'œil à la réception..... | 86 |
| Figure IV.47: Densité Spectrale de Puissance..... | 86 |

LISTE DES ABREVIATIONS

- **CAN** : Convertisseur Analogique Numérique
- **CNA** : Convertisseur Numérique Analogique
- **DSP** : Densité Spectrale de Puissance
- **MAQ** : Modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature
(*QAM Quadrature Amplitude modulation*)
- **MDA** : Modulation par Déplacement d'Amplitude
(*ASK Amplitude Shift Keying*)
- **MDAP** : Modulation par Déplacement d'Amplitude et de Phase
- **MDF** : Modulation par Déplacement de Fréquence
(*FSK Frequency Shift Keying*)
- **MDP** : Modulation par Déplacement de Phase
(*PSK Phase Shift Keying*)
- **MDPD** : Modulation par Déplacement de Phase Différentiel
(*DPSK Differential Phase Shift Keying*)
- **NRZ** : Non Retour à Zéro
- **PLL** : *Phase Lock Loop*
- **VCO** : *Voltage controlled Oscillator*

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, la communication de l'information prend de plus en plus de place et d'importance dans notre quotidien. Que ce soit la téléphonie, la télévision ou l'Internet, il est évident que nous sommes constamment entourés par des systèmes de communications.

Les télécommunications font partie des technologies qui ont révolutionné notre mode de vie au vingtième siècle. Du télégraphe à l'Internet, du télégraphe sans fil au téléphone cellulaire, les progrès établis en la matière sont spectaculaires. Les informations transmises étaient tout d'abord codées en morse, puis des techniques de modulation et de codage analogiques ont permis de transmettre du son, puis des images. Ensuite la venue des techniques numériques a considérablement augmenté le débit et la qualité des informations à transmettre d'un point à un autre.

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible.

Cette popularité des communications nous pousse d'ailleurs à continuellement augmenter les capacités des systèmes de transmissions d'information et c'est cette quête d'augmenter le débit de données qui est la motivation principale des recherches effectuées en communications. Dans les systèmes modernes, on utilise de plus en plus les circuits numériques pour la réalisation pratique. Cette approche nous permet d'atteindre de meilleures performances au niveau de la fiabilité, de la flexibilité, de la simplicité et de la qualité de transmission. Dans les systèmes de communications, on retrouve le maillon le plus faible au niveau du canal de transmission. Ce canal peut entre autres être une paire de fil torsadé, une fibre optique, une liaison hertzienne, etc.

Parallèlement, le développement rapide de la microélectronique et des capacités de miniaturisation permet aujourd'hui la mise en œuvre des techniques complexes dans des appareils de taille réduite. Cependant l'augmentation des besoins en débit se heurte à la nature des canaux

eux-mêmes. En effet, dans des applications telles que la télédiffusion à grande échelle ou un réseau informatique radio à l'intérieur d'un bâtiment, le canal est de type multitrajet. Le signal est réfléchi en plusieurs endroits, et des échos apparaissent et créent des perturbations dont l'influence augmente avec le débit de transmission. Parmi les solutions étudiées pour pallier ce problème, les modulations multiporteuses sont étudiées depuis les années soixante et sont particulièrement adaptées à ces canaux sévères.

Ce mémoire est organisé en 4 chapitres.

Dans le premier chapitre on présente tout d'abord un système de transmission émetteur/récepteur, ensuite on parlera de la modulation analogique et les différents types de modulation analogiques.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la modulation numérique, ensuite les quelques formes de la modulation numérique ASK, FSK, PSK, QPSK

Le chapitre trois en exploite en détail les deux techniques de modulation et de démodulation DPSK et QAM. Ce chapitre insiste sur la mise en œuvre de ces méthodes de modulation, tout en donnant la théorie et les schémas correspondant pour chaque méthode.

Le chapitre 4 présente la partie simulation et comparaison entre les deux techniques de modulations DPSK et QAM. La partie support de transmission qui est dans notre cas réalisé à partir de la fibre optique sera moins détaillé. A cause de leurs complexités d'une part et n'est pas notre but principal d'autre part. Aussi une petite description sur les composants qui la compagne comme les diodes lasers, les photodiodes, les amplificateurs optiques et le modulateur électrooptique.

Ce mémoire se termine par une conclusion et des perspectives de recherches qu'il est possible de mener afin de prolonger le travail effectué durant ce mémoire.

CHAPITRE I

MODULATION ANALOGIQUE

I. Généralités

La transmission d'information nécessite la prise en compte des caractéristiques du canal de transmission (sa bande passante, la puissance maximale admissible et le bruit qu'il génère). Il est donc nécessaire pour transmettre un signal de l'adapter aux canaux de transmission, deux solutions sont disponibles :

- La transmission en bande de base (le codage)
- La transmission sur une fréquence porteuse (la modulation), c-à-d le canal doit laisser passer une certaine gamme de fréquence parmi lesquelles se trouve la fréquence porteuse.

■ **A l'émission**, la modulation nécessite de faire varier une des caractéristiques d'une sinusoïde de fréquence élevée (la porteuse) au rythme du signal à transmettre. Cette caractéristique est soit son amplitude, soit sa fréquence, soit sa phase, c'est le rôle du modulateur.

Il est cependant nécessaire pour pouvoir réaliser une modulation que le signal à transmettre soit de basse fréquence par rapport à la fréquence de la porteuse [1].

■ **A la réception**, on essaye de restituer le signal, ainsi de récupérer l'information transmise : cette restitution est le rôle du démodulateur [1].

I.1 Présentation générale sur le traitement du signal

- **Signal analogique** : On appelle signal analogique, un signal dont l'amplitude varie de façon continue au cours du temps. Il évolue dans sa gamme de tension et dans un temps continu [2].
- **Signal numérique** : On appelle signal numérique, un signal dont l'amplitude varie de façon discontinue au cours du temps. Il évolue dans sa gamme de tension et dans un temps continu [2].

I.1.1 Transmission des signaux

La transmission d'informations se fait suivant ce schéma de la figure 1.1.

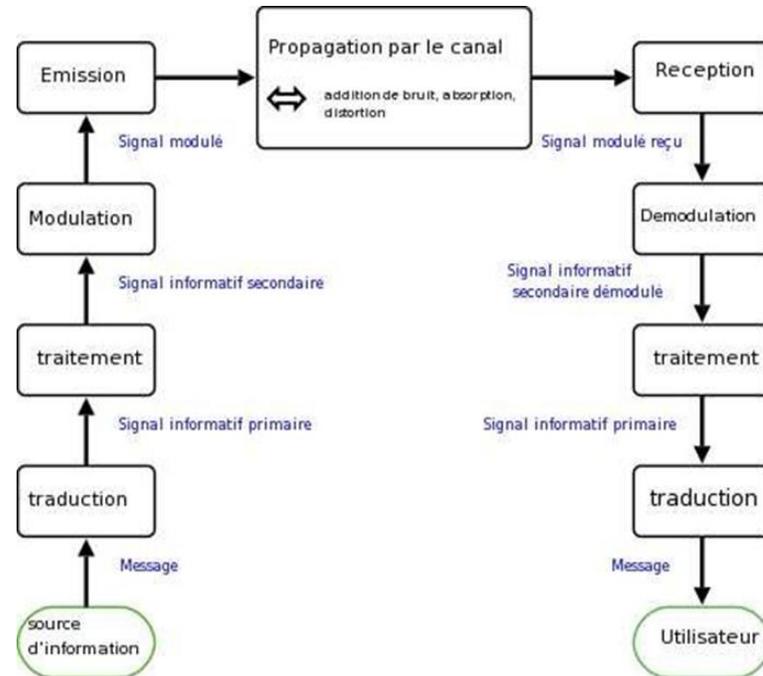


Figure 1.1: Synoptique de la transmission d'information [2]

Définitions des mot clé de schéma synoptique de la transmission d'information

- ❖ **Traduction** : Permet de convertir le signal (par exemple la voie) en signal électrique, via un microphone piézoélectrique par exemple et inversement convertit le signal en son.
- ❖ **Traitement** : Ce peut être une simple amplification linéaire, il peut s'agir pour des signaux numériques de compression, ou de codage. Par exemple pour du son il peut s'agir de compression MP3, ou pour la vidéo, de compression MPEG-2.
- ❖ **Modulation** : Elle a pour fonction de transposer l'information sur une porteuse, afin d'occuper un espace fréquentiel plus réduit et que l'on a choisi. On module une porteuse dont la fréquence est beaucoup plus élevée que le message à transmettre. Cette nouvelle fréquence est plus favorable à la transmission. La modulation consiste à faire varier les caractéristiques de la porteuse (amplitude, fréquence, phase) en fonction du message à transmettre.

- ❖ **Canal** : Le canal est le milieu dans lequel se propage le signal. Ce terme indique aussi la plage de fréquence utilisée. La largeur du canal dépend du type d'application : 8Mhz pour un canal TV, 250 KHz pour un canal audio FM, 12,6 KHz en téléphonie.

I.2 Transmission d'informations

Nous allons maintenant voir pourquoi il est important de moduler un signal avant de le transmettre [2].

I.2.1 Absorption et distorsion dans le milieu

La transmission d'information se faisant bien souvent par antennes, le canal utilisé est l'air qui a la propriété d'absorber les ondes. L'absorption est un phénomène dû à une perte d'énergie dans le milieu, le signal s'atténue en parcourant le milieu comme le fait l'onde de choc créée par un corps jeté dans l'eau. De la même façon, toutes les composantes fréquentielles d'un signal ne se propagent pas à la même vitesse. D'où l'intérêt, lors de la transmission [2].

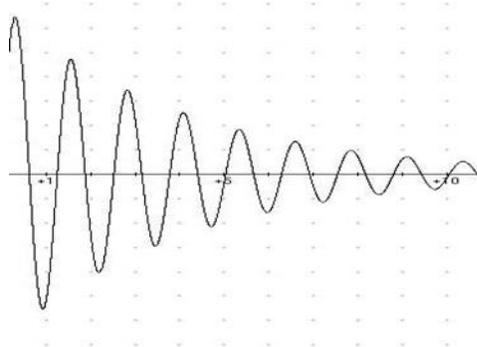


Figure 1.2: Amplitude d'une onde en fonction de la distance parcourue

I.2.2 Le spectre

Le signal électrique issu du microphone peut être représenté soit par sa variation temporelle soit de manière fréquentielle. La variation temporelle du signal électrique est définie par l'évolution de l'amplitude du signal en fonction du temps. Plus la variation est rapide et plus le signal est aigu, plus l'amplitude est élevée et plus le son est fort. Supposons maintenant que le signal se répète (on dit qu'il est périodique). Si la variation temporelle du signal (donc l'amplitude) se répète 100 fois en une seconde, on entendra une multitude de sons, dont 1 à 100 Hz. Si on accélère la variation temporelle du signal jusqu'à 440 fois par seconde, on entendra une multitude de sons, dont une note à 440 Hz, soit une note plus aigüe par rapport au signal à 100 Hz.

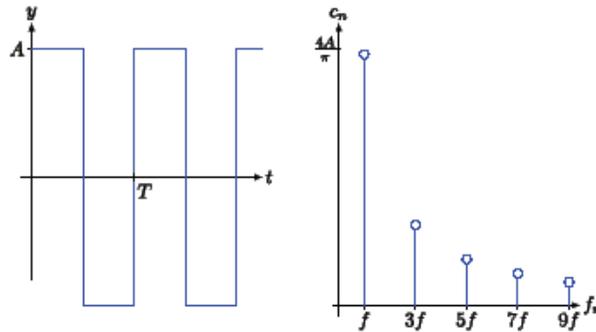


Figure 1.3: Représentations temporelle puis spectrale d'un signal carré.

La représentation fréquentielle consiste à représenter l'amplitude d'un extrait temporel du signal en fonction de la fréquence. Plus l'amplitude est élevée plus la note est forte, plus la fréquence est élevée plus la note est aigue.

Un signal issu du microphone possède donc un spectre de 20 Hz à 20 kHz. Il s'agit du spectre issu du capteur, et non modifié. On parle alors de signal en bande de base.

Cependant, si on souhaite transmettre ce signal via une antenne, il faudra transformer l'onde électrique vers une fréquence plus élevée. On parle alors de modulation. Cette opération est nécessaire car la dimension de l'antenne est d'autant plus petite que la fréquence est élevée. Un signal à 300 Hz doit être émis par une antenne quarte d'onde d'environ 250 m, un signal à 300 MHz doit être émis par une antenne quarte d'onde d'environ 25 centimètres.

Bien que les bases "représentation temporelle - fréquentielle" sont supposées acquises, nous allons rappeler quelques notions et principes.

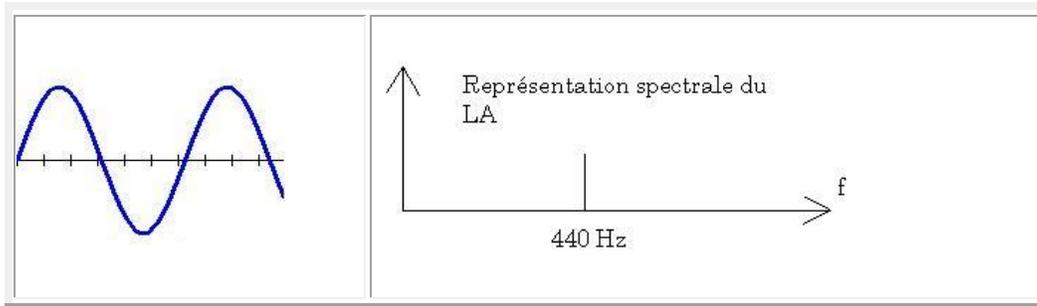
Le spectre d'un signal est la représentation fréquentielle du signal

I.3 Transmission en bande de base

Une transmission en bande de base consiste à transmettre un signal sans déplacer son spectre

➤ Application acoustique :

En musique, la note 'LA' est une onde sinusoïdale qui se répète 440 fois en une seconde. Le signal est périodique (sinusoïde), la période est de 1/440 seconde. La fréquence est l'inverse de la période. La fréquence est donc de 440 Hz.



Figures 1.4 : Représentation temporelle et fréquentielle de la note « LA »

Savez-vous par quel moyen cette onde peut se propager dans l'espace ? La note "LA" est un signal périodique à 440 Hz. Au cours du temps l'amplitude du signal est représentée par une sinusoïde.

I.4 Modulation, modulant, modulé

La problématique initiale posée dans ce cours était : "Comment transmettre ma voix à une personne éloignée". Nous avons vu une première possibilité consistant à transformer le signal de ma voix (onde acoustique) en un signal électrique. Il ne me reste plus qu'à transmettre ce signal à mon correspondant (la technique du pot de yaourt suffit : prenez deux pots de yaourt, percez le fond et reliez les deux pots par une ficelle à rôtir de longueur minimale de 10 m. Tendez la ficelle, parlez dans le pot pendant que votre interlocuteur écoute - attention la ficelle doit être tendue, sinon les vibrations ne passeront pas).

Maintenant, si mon correspondant est très éloigné, une autre technique consiste à transmettre le signal dans l'air via une antenne. Toutefois, il m'est impossible de transmettre le signal tel quel, je dois le transmettre à plus hautes fréquences (par exemple, regardez à quelle fréquence émet votre station de radio préférée, alors qu'à cette fréquence, seules les ondes audibles c'est-à-dire voix et musique sont transmises).

La technique couramment utilisée pour transmettre le signal consiste à déplacer son spectre. En règle générale, on translate son spectre vers une plus haute fréquence par une modulation.

La modulation consiste à transformer un signal connu par le signal à transmettre. Le signal à transmettre est appelé signal d'information. Lorsqu'on module un signal, on appelle :

- **Porteuse:** le signal connu;
- **Modulant:** le signal d'information;

- **Modulé** : le signal résultant de la transformation de la porteuse par le modulant.

Le signal connu est *généralement* un signal sinusoïdal défini par son amplitude et sa fréquence. La fréquence est appelée fréquence porteuse. On trouve parfois un signal d'impulsion (radar) et très rarement d'autres signaux.

➤ Applications

De nos jours, de nombreuses transmissions utilisent encore des modulations analogiques, bien que celles-ci soient progressivement remplacées par des modulations numériques (*sur porteuses analogiques*).

On peut citer :

- la transmission Radio : les grandes ondes, les moyennes ondes, la *FM*
- La télévision analogique : les chaînes classiques (TF1, France Télévision ; C+, ARTE et M6), remplacées progressivement par la TNT (*modulation numérique sur porteuse analogique*). La télévision analogique fonctionne sur différentes bandes de fréquences, à titre d'exemple, la bande VHF (ou bande III) correspond à une modulation sur la bande de fréquence [108-310 MHz] (donc juste après la FM) et la bande UHF (ou bande IV) est définie sur la bande [310-410 MHz]

I.4.1 Principe de la modulation

En télécommunications, le signal transportant une information doit passer par un moyen de transmission entre un émetteur et un récepteur. Le signal est rarement adapté à la transmission directe par le canal de communication choisi, hertzien, filaire, ou optique.

Un récepteur capable de capter un signal provenant d'un émetteur rayonnant une onde électromagnétique d'amplitude, de phase et de pulsation constantes, ne recevrait comme information que la fréquence du signal émis.

Il est donc nécessaire de moduler le signal émis afin de pouvoir multiplier les informations transmises.

Indépendamment de cela, il faut pouvoir transmettre les signaux à distance. Dans le cas de la radiodiffusion : l'intérêt est d'utiliser un signal porteur de haute fréquence qui se propage bien dans l'air, pour transmettre un signal basse fréquence (la voix ou musique) qui se transmettrait moins loin de l'émetteur [2].

La modulation est apparue nécessaire pour transmettre une information d'un point à un autre (point à point), ou d'un point vers un ensemble de sites distants (multipoints) en adaptant le

signal au moyen de transport utilisé. On appelle canal de transmission, le support physique utilisé pour la communication.

1. Canal guidé : câble métallique, fibre optique ... le signal est contenu (guidé) par le support .
2. Canal en espace libre : faisceaux hertziens, liaisons radios, liaisons sous-marines, ... le signal se propage librement.

Chaque canal est caractérisé par "sa fonction de transfert" qui traduit l'aptitude à transmettre un signal à une fréquence donnée (cela représente en fait l'atténuation et le déphasage pour certaines fréquences)

Exemple

La ligne téléphonique est utilisée pour transmettre de la voix et des signaux ADSL. La ligne téléphonique permet de transmettre des signaux jusqu'à 2.2 MHz. Au-delà, les lignes téléphoniques ne sont plus adaptées au transport des signaux. C'est pour cette raison que l'ADSL ne permet le haut débit que pour les habitations proches d'un centre fournissant l'internet ;

Pour les transmissions en espace libre, l'utilisation d'une antenne permet de transformer une énergie guidée en une onde Electro-Magnétique qui rayonne dans l'espace libre. La dimension de l'antenne de l'ordre de $\lambda/4$ ou λ est la longueur d'onde.

La longueur d'onde est liée à la fréquence du signal à transmettre par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

où c est la célérité $c=3.10^8$ m/s, et f la fréquence du signal.

Nous avons vu précédemment qu'il était impossible de transmettre le signal directement à la sortie d'un micro, et que pour transmettre le signal à un interlocuteur éloigné, nous devons moduler à plus haute fréquence. En effet, transmettre un signal à 30 Hz supposerait une antenne de dimension un quart de la longueur d'onde soit le quart de $300000000/30$. Autrement dit, une antenne de 2500 km.

I.4.2 Intérêt de la modulation

Supposons que l'on veut transmettre un signal sonore audible. Il encombrerait une plage de fréquences s'étendant de 50 Hz à 20 kHz. La transmission directe de ce signal, par

ondes hertziennes, est impossible car :

- Il serait impossible, à la réception, de distinguer ce signal de tous les autres occupant la même plage de fréquences.
- Les dimensions des antennes sont grandes d'environ une longueur d'onde du signal. Celle-ci atteindrait alors des dimensions prohibitives.
- Même s'il était possible de construire l'antenne, étant donné que, dans notre cas, la fréquence du signal varie sur une large plage de fréquences, l'antenne ne serait pas adaptée [3].
- La **modulation** peut être définie comme le processus par lequel le signal est transformé de sa forme originale en une forme adaptée au canal de transmission, par exemple en faisant varier les paramètres d'amplitude et d'argument (phase/fréquence) d'une onde sinusoïdale appelée porteuse. Le dispositif qui effectue cette modulation, en général électronique, est un modulateur. L'opération inverse permettant d'extraire le signal de la porteuse est la démodulation [3].
- L'intérêt de la modulation réside donc dans la possibilité d'avoir un signal aisément discernable et qui se propage correctement [3].

II Modulation

La transmission de messages par voie radioélectrique se fait grâce à trois systèmes principaux de modulation [3].

- La modulation d'amplitude : très classique, qui est utilisée depuis les débuts de la transmission des messages téléphoniques et de la radiodiffusion.
- La modulation de fréquence : qui contient l'information, non plus dans l'amplitude mais dans la fréquence instantanée du signal.

La modulation par impulsion : très employée malgré la nécessité d'une grande largeur de bande par rapport à celle de l'information à transmettre. Il ne s'agit plus d'un signal en créneaux mais en pics dont on module l'amplitude ou la fréquence.

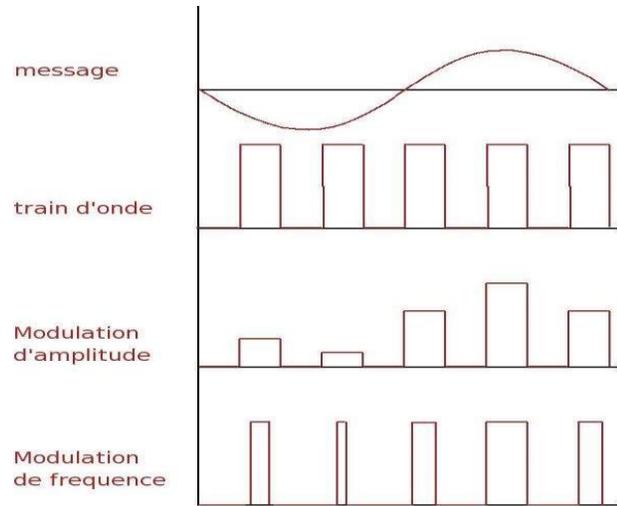


Figure 1.5 : Les différents types de modulation [3]

II.1 Signal sinusoïdal :

La modulation consiste à transformer un signal sinusoïdal connu appelé porteuse par le signal à transmettre. Un signal sinusoïdal est entièrement défini par trois caractéristiques qui sont :

- Son amplitude A
- Sa fréquence f
- Sa phase Θ

Le signal sinusoïdal s'écrit de la manière suivante :

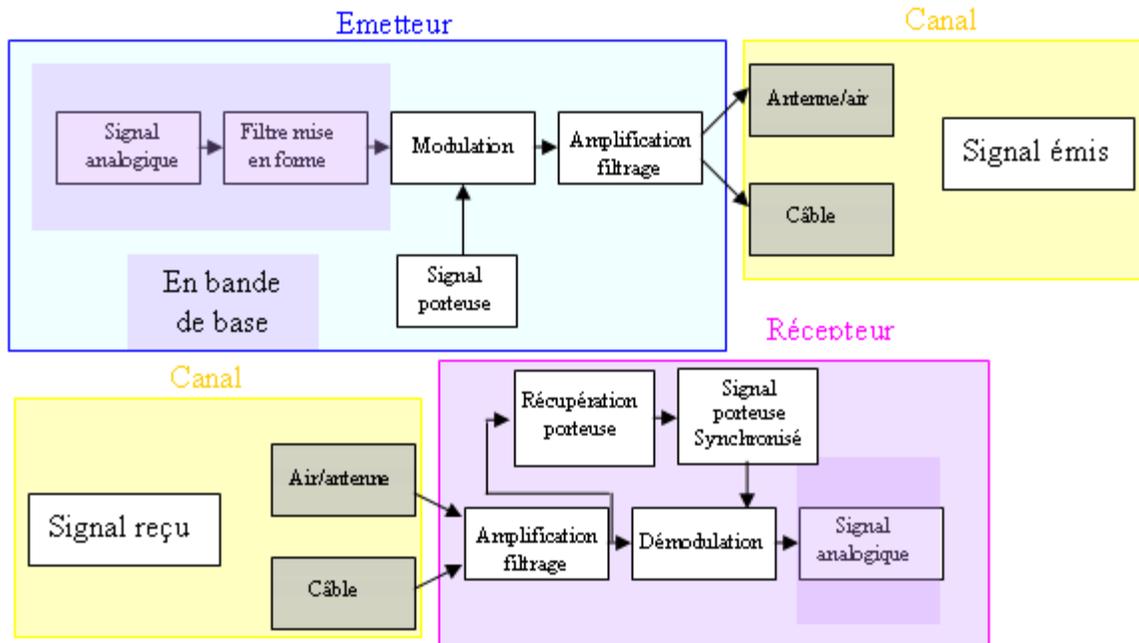
$$\circ \text{ Temporel : } V(t) = A \sin(2\pi ft + \theta) \quad \text{I.1}$$

II.2 Modulation analogique sur une porteuse sinusoïdale

La modulation analogique sur une porteuse sinusoïdale consiste à modifier une ou plusieurs caractéristiques du signal sinusoïdal par le signal analogique à transmettre.

II.2.1 Synoptique d'une chaîne de transmission analogique

Une chaîne de transmission analogique représente l'ensemble des éléments nécessaires à la transmission d'une information de nature analogique. Elle est composée d'un émetteur, d'un canal de propagation et d'un récepteur.



Figures 1.6 schéma synoptique d'un émetteur /récepteur

a. Mélangeur :

La modulation permet de modifier la caractéristique d'une porteuse et de translater le spectre en bande de base vers une fréquence plus élevée. L'opération consistant à translater le spectre d'une fréquence vers une fréquence plus élevée peut être réalisée par un mélangeur.

Un mélangeur est un circuit électronique qui effectue la multiplication entre deux signaux

Couramment utilisé dans les émetteurs/récepteurs HF, un mélangeur effectue une multiplication entre un oscillateur local (il s'agit de la porteuse à $f(p)$) et un signal modulé ou modulant. Au niveau du spectre, cela revient à une simple translation autour de $\mp fp$ du signal modulant, comme le montre la figure.

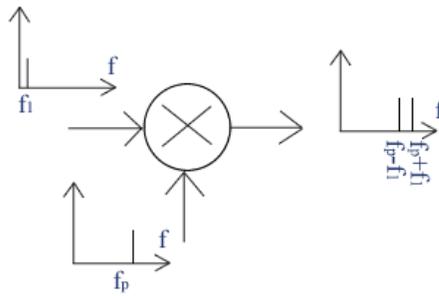


Figure 1.7: Principe d'un mélangeur

Multiplication d'un signal sinusoïdal de fréquence f_1 par un signal sinusoïdal de fréquence f_p

Le mélangeur effectue donc une multiplication de deux signaux, à titre d'exemple multipliez (faites l'opération mathématique) un signal sinusoïdal de fréquence 440 Hz avec un signal sinusoïdal de fréquence f_p .

De manière similaire, on retrouve un mélangeur au niveau du récepteur pour ramener le signal modulé vers une plus basse fréquence (jusqu'à obtenir le signal en bande de base). C'est par ce procédé que vous réglez la station FM que vous souhaitez écouter au niveau de votre poste radio.

II.2.2 Principe du récepteur superhétérodyne

Au niveau de la réception, en amont de l'amplificateur on peut placer un mélangeur, de fréquence variable selon la station à écouter. Ainsi, le signal en sortie du mélangeur est défini à une fréquence fixe, appelée Fréquence Intermédiaire f_I . On peut ainsi utiliser un amplificateur qui fonctionne sur une bande de fréquence réduite et connue.

a. Fréquence image x :

Nous avons vu que la multiplication d'une sinusoïde de fréquence f_2 avec une sinusoïde de fréquence f_1 permettait d'obtenir un signal dont la fréquence est la somme et la différence des deux fréquences f_2+f_1 et f_2-f_1 .

Prenons maintenant l'exemple d'une structure superhétérodyne, telle la radio FM. On rappelle qu'une structure superhétérodyne permet de ramener le signal d'une fréquence porteuse vers la bande de base en deux temps. Dans une première phase, le système de réception va diminuer la fréquence de la station FM sur 10 MHz, un deuxième mélangeur réglé sur 10 MHz ramène le signal autour de 0 Hz

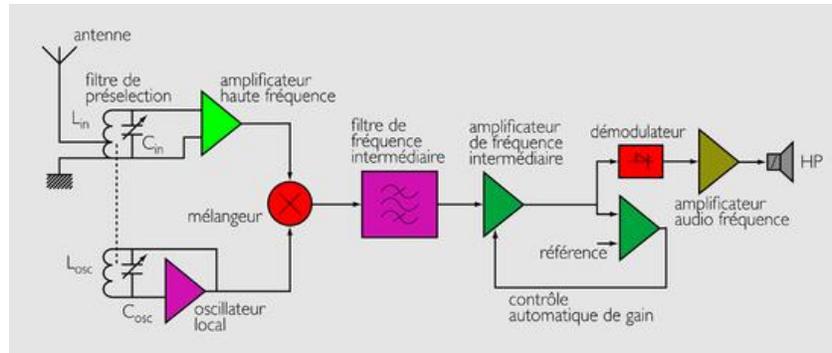


Figure 1.8 : principe d'un récepteur superhétérodyne

Sur quelle fréquence doit être réglé l'oscillateur f_{o1} qui permet de ramener mon signal modulé sur f_p autour de 10 MHz. Supposons que ma station FM diffuse sur $f_p = 94.3$ MHz. Pour ramener le signal autour de 10 MHz, la fréquence f_{o1} doit être égale à 84.3 MHz (premier exemple). Si un signal est émis à 74,3 MHz, à la sortie du mélangeur de fréquence $f_{o1}=84,3$ MHz, je récupère un signal à 10 MHz. Cette fréquence parasite est appelée fréquence image.

b. Filtres sélectifs :

Un filtre est défini par son gabarit. Cela représente les fréquences que le filtre va laisser passer et les fréquences qu'il va atténuer (éliminer). Plus cette atténuation est forte, plus *le filtre est sélectif*. Ainsi, on caractérise la bande occupée par rapport à la fréquence porteuse pour déterminer la bande de coupure du filtre (gabarit). Il est donc nécessaire de pouvoir déterminer la bande utile d'un signal lorsque ce dernier est modulé.

II.3 Le canal de transmission :

Le support physique ou hertzien (le câble ou l'antenne-air) correspond au canal de transmission.

II.3.1 L'effet du canal

Dans le canal, le signal subit des déformations, des perturbations par du bruit, diaphonie (couplage entre les voies), des dérives en fréquences (*effet Doppler*),

III Types de modulation analogiques :

III.I Modulation d'amplitude

Le principe théorique de la modulation d'amplitude est de faire varier l'amplitude d'un signal haute fréquence (la porteuse) au rythme d'un signal basse fréquence (le modulant), on utilise pour cela un modulateur ; ce principe est décrit sur la figure 1.9.

La modulation d'amplitude est la première modulation employée en Télécommunication de part sa simplicité de mise en œuvre.

La modulation d'amplitude consiste à modifier l'amplitude de la porteuse par une fonction linéaire ($y = Ax + b$) du signal à transmettre.

Ainsi, soient

| | | |
|---|------------------------------------|--|
| • | La porteuse | $S_p(t) = S \cdot \sin(2\pi \cdot f_p t + \varphi_p)$ |
| • | Le modulant (signal d'information) | $S_i(t)$ |
| • | Le signal modulé | $V_i(t) = [S + k \cdot S_i(t)] \cdot \sin(2\pi \cdot f_p t + \varphi_p)$ |

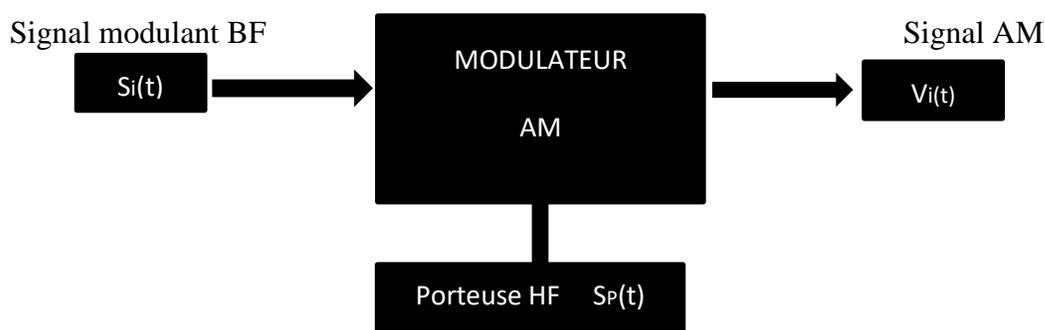


Figure 1.9: Principe d'un modulateur d'amplitude

la représentation temporelle d'un signal modulant d'une porteuse et un signal AM résultant

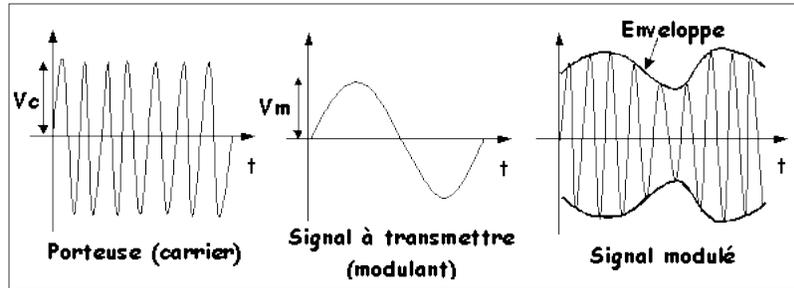


Figure 1.10 : signal modulant, porteuse et signal résultant AM

III.1.1 Taux de modulation m (l'indice de modulation m) :

Le taux de modulation, noté m est caractéristique du modulateur. Il représente l'amplitude du signal modulé par rapport à l'amplitude de la porteuse

Soit un signal modulant sinusoïdal d'amplitude S_i , et soit S l'amplitude de la porteuse. On appelle taux de modulation, le taux défini par le facteur m représentant le rapport entre l'amplitude maximale du signal modulant et l'amplitude de la porteuse $m = S_i/S$

$S_i(t)$ représente l'amplitude du signal modulant.

Sur la figure ci-dessous, on représente différentes valeurs de m :

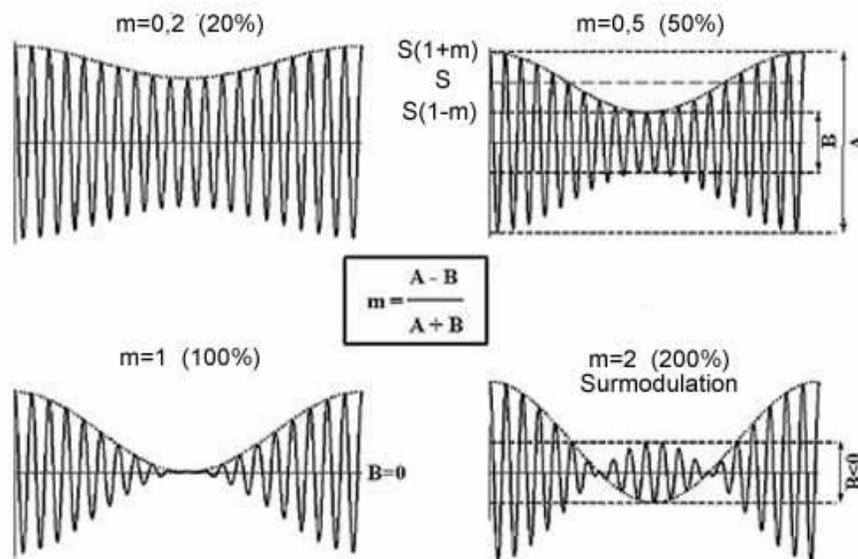


Figure 1.11 : représentation du taux de modulation pour plusieurs valeur de m

Dans le cas général les crête du signal AM évoluent entre un maximum (V_{max}) et un minimum (V_{min}) ; la définition générale du taux de modulation est : $m = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}}$

III.1.2 Bande occupée

La bande occupée correspond à la largeur de bande nécessaire à la transmission du signal après la modulation. La bande de largeur minimale est la bande spectrale minimale à transmettre pour être capable de récupérer le signal émis.

En réalité, on cherche à transmettre le signal d'information par un circuit le plus simple possible, tant à l'émission qu'à la réception (coût du modulateur/démodulateur). D'un autre côté, on souhaite réduire au maximum la bande occupée pour pouvoir transmettre le plus d'informations dans une même largeur de bande autorisée.

Cependant, ces deux notions sont antinomiques. Il faudra donc faire un choix entre simplicité et bande occupée.

III.1.3 Occupation spectrale par une modulation d'amplitude

Pour une transmission d'amplitude basique, la bande occupée est double de la bande de base du signal d'information.

a. Démonstration :

Nous avons vu en cours que tout signal physique possède un spectre dont le module est symétrique autour de l'axe des ordonnées. Cependant, physiquement les fréquences négatives n'existent pas et par conséquent la mesure du spectre d'un signal quelconque est représentée uniquement pour des fréquences positives.

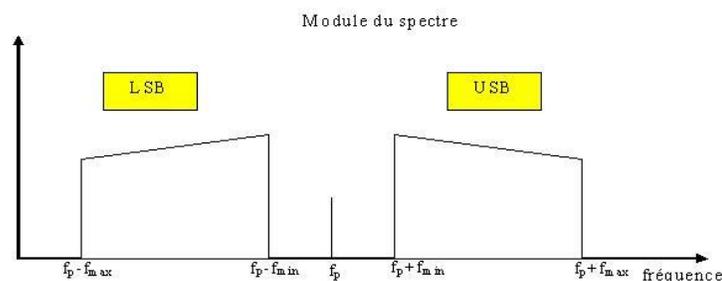


Figure 1.12: Représentation d'occupation spectrale d'une modulation d'amplitude

Néanmoins, les fréquences négatives existent en théorie. Lorsqu'on translate le spectre autour d'une fréquence porteuse f_p , on translate la totalité du spectre. On retrouve donc le spectre (mesurable) suivant la figure 1.12.

III.1.4 Différentes modulations d'amplitude

Pour économiser la puissance transmise, on peut supprimer la raie à la fréquence porteuse et/ou supprimer une des deux bandes (BLU). La première technique s'appelle : Modulation d'amplitude sans porteuse, la seconde est la modulation d'amplitude à Bande Latérale Unique.

L'avantage de la deuxième méthode est de réduire en plus l'occupation de la bande occupée.

Rmq1 : dans le cas de dispositif portable, la puissance émise est délivrée par la batterie. Plus la puissance transmise est élevée et plus l'autonomie sera de courte durée.

Rmq2 : la quantité d'information à transmettre est fonction de la largeur de bande utile occupée. Dans le cas de la BLU, on supprime une bande sur 2 (la deuxième bande contenait la même information que la première donc une seule bande est utile), ce qui libère une bande de fréquence. La bande de fréquence libérée peut ainsi être réutilisée pour envoyer une autre information.

III.1 5 Démodulation non cohérente (ou non cohérente)

On appelle démodulation incohérente, une démodulation qui ne nécessite pas la connaissance de la porteuse. L'enveloppe d'un signal est la forme basse fréquence du signal.

a. Détection d'enveloppe

La détection d'enveloppe permet de récupérer l'enveloppe d'un signal. Un tel procédé est mis en œuvre pour démoduler des signaux modulés classiquement en amplitude. La détection d'enveloppe récupère le signal modulé à partir de son amplitude seule et ne nécessite pas la connaissance de la fréquence porteuse. Il s'agit donc bien d'une démodulation non cohérente

- **Application**

Par un simple circuit électronique composé d'une diode, d'une capacité et d'une résistance, il est possible de récupérer l'information transmise en supprimant l'enveloppe. Il s'agit du détecteur d'enveloppe

III.2 Modulation de phase

Pour la modulation de phase, la phase de la porteuse est modifiée en fonction du signal modulant, autrement dit le signal modulant modifie la phase de la porteuse par une fonction linéaire.

$$V_m(t) = S_p \cdot \cos(2\pi f_p t + \theta(t)) \quad \text{I.2}$$

avec la phase qui varie linéairement par rapport au signal à transmettre :

$$\theta(t) = k \cdot S_i(t) \quad \text{I.3}$$

où s est le signal à transmettre.

Pour une modulation de phase, c'est la phase instantanée qui varie linéairement en fonction du signal modulant.

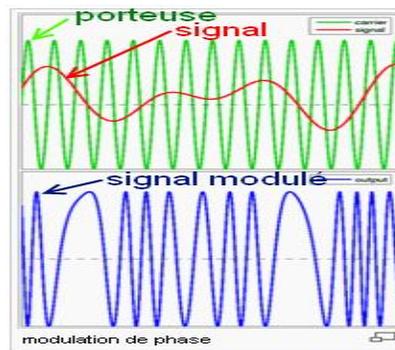


Figure 1.13: Modulation de phase

III.2.1 Limite de la PM :

Si les deux modulations sont identiques, le choix se portera sur l'une ou l'autre en fonction de l'indice de modulation dans le cas de modulation analogique. Elle se prête néanmoins très bien aux modulations à "grande vitesse" mais la phase initiale doit être connue.

Pour démoduler un signal PM, il est nécessaire que l'excursion de phase soit inférieure à π . La modulation PM n'est donc employée que pour des faibles modulations d'indices.

III.3 Modulation de fréquence

Pour la modulation de fréquence, la fréquence de la porteuse est modifiée en fonction du signal modulant. Toutefois, la porteuse est définie à une fréquence fixe, appelée fréquence porteuse. On ne peut pas en principe modifier la porteuse du signal.

➤ Comme dans le cas de la modulation d'amplitude, nous allons nous intéresser à la modulation de fréquence d'un signal d'information de nature sinusoïdale ; Ainsi, soient :

- La porteuse : $Vp(t) = A \cos(2\pi f_p t + \theta)$.
- Le modulant (signal d'information) : $m(t) = a \cos(2\pi f_m t)$
- Le modulé s'écrit, de manière générale :

$$Vt(t) = A \cos (2\pi f_p t + 2\pi k_f \int_0^t a \cos(2\pi f_m u) du) \quad \text{I.4}$$

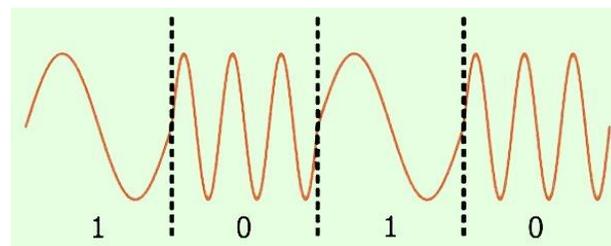
Le signal modulé, par une modulation de fréquence, s'écrit donc de la manière suivante :

$$Vt(t) = A \cos (2\pi f_p t + \frac{k_f a}{f_m} \sin(2\pi f_m t)) \quad \text{I.5}$$

➤ L'application de la modulation de fréquence la plus connue est la radio FM. Quand vous choisissez une radio, vous sélectionnez la fréquence FM de votre station (MHz). Il existe de nombreuses applications, la plus simple à comprendre est la modulation type FSK. Celle-ci est utilisée, à titre d'exemple en téléphonie et sur les anciens modems.

Illustrons ce principe utilisé lors de la transmission de l'identifiant d'appelant en téléphonie. Pour transmettre un '0', un signal à 2100 Hz est transmis sur la ligne téléphonique. Pour transmettre un '1' un signal à 1300 Hz est transmis sur la ligne téléphonique.

Ainsi, le signal binaire 110100 est modulé de la manière suivante :



Figures 1.14: Modulation fréquentielle

III.3.1 Relation entre phase et fréquence.

La fréquence est liée à la pulsation par la relation : $\omega = 2\pi f$

La fréquence correspond à des Hertz, c'est-à-dire l'inverse de la seconde. 2π correspond à la phase pour parcourir un cercle et s'exprime en unité radians. La pulsation ω s'exprime donc en radian par seconde.

La pulsation représente la vitesse angulaire. Elle est donc liée à la phase par :

$$\omega = \frac{\partial \varphi(t)}{\partial (t)} \quad \text{I.6}$$

Ainsi, la fréquence est liée à la phase par la relation suivante :

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi(t)}{\partial t} \quad \text{I.7}$$

De manière équivalente, on peut exprimer la relation inverse :

$$\varphi(t) = 2\pi \int_0^t f(t) dt \quad \text{I.8}$$

Exemple

III.3.2 Modulation de fréquence : En reprenant la définition, le signal modulant modifie la fréquence de la porteuse en modifiant la phase du signal.

$$Vm(t) = Sp \cdot \cos(2\pi f_p t + \varphi(t)) \quad \text{I.9}$$

avec la phase qui varie linéairement par rapport à l'intégrale du signal à transmettre :

$$\varphi(t) = 2\pi k_f \int_0^t Si(t) dt \quad \text{I.10}$$

où s est le signal à transmettre.

$$Vm(t) = Sp \cdot \cos(2\pi f t + 2\pi k_f \int_0^t Si(t) dt) \quad \text{I.11}$$

III.3.3 Indice de modulation :

L'indice de modulation s'écrit : $m = \frac{\Delta f}{f_m}$

le signal modulant s'écrit : $m(t) = \Delta\omega \cos(\Omega t)$

Avec $\Delta\omega$ l'amplitude du signal modulant et on trouve la relation suivante :

$$m = \frac{\Delta\omega}{\Omega} \quad \text{I.12}$$

Rmq : L'excursion en fréquence est liée à l'amplitude du signal modulant. L'indice de modulation joue un rôle essentiel et il est important de noter, que contrairement à la modulation AM, l'indice de modulation FM dépend de l'amplitude et de la fréquence du signal modulant.

IV Conclusion

En ce qui concerne le choix économique, la modulation d'amplitude est moins coûteuse (car de complexité moindre) que les modulations angulaires. Pour conclure, choisir une modulation est un compromis entre raison économique et choix techniques.

CHAPITRE II

MODULATION NUMERIQUE

I. Généralités

L'utilisation des modulations numériques répond à deux impérative :

- Lorsque la transmission des signaux numériques en bande de base n'est pas possible (dans l'air ou sur les lignes téléphoniques), on est obligé de translater le spectre bande de base vers les hautes fréquences : il faut réaliser une modulation.
- La demande en plages de fréquences augmente considérablement, alors que l'espace (le spectre) disponible est fini. Le numérique utilise plus efficacement ces plages (encombrement réduit grâce à des techniques de compression de données et de modulation adaptées).

Le principe de réalisation de modulateur et de démodulateur est le même que dans le cas des modulations analogiques : le mélangeur équilibré est la base de beaucoup de réalisation. La qualité de la liaison se chiffre aussi à l'aide du rapport (signal/bruit) mais ces dégradations entraînent des erreurs de transmission (réception d'un bit erroné) ; aussi la quantité utilisée pour chiffrer la qualité de la transmission est la probabilité d'erreur (qui est une fonction du rapport (signal/bruit)).

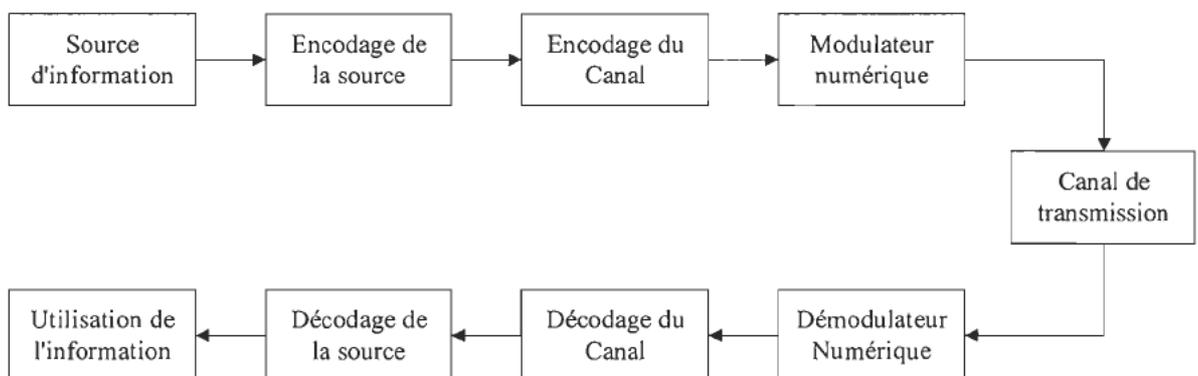


Figure II.1 : schéma d'un système de transmission numérique

Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique est donné à la figure II.1 où l'on se limite aux fonctions de base :

- La source émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires.
- Le codeur peut éventuellement supprimer des éléments binaires non significatifs (compression de données ou *codage de source*), ou au contraire introduire de la redondance dans l'information en vue de la protéger contre le bruit et les perturbations présentes sur le canal de transmission (*codage de canal*).

Le codage du canal n'est possible que si le débit de source est inférieur à la capacité du canal de transmission

- La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis.
- Enfin, du côté récepteur, les fonctions de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur.

I.1 Définitions et appellations

- Un *symbole* est un élément d'un alphabet. Si M est la taille de l'alphabet, le symbole est alors dit M -aire. Lorsque $M=2$, le symbole est dit binaire. En groupant, sous forme d'un bloc, n symboles binaires indépendants, on obtient un alphabet de $M = 2^n$ symboles M -aires. Ainsi un symbole M -aire véhicule l'équivalent de $n = \log_2 M$ bits.
- La *rapidité de modulation* R se définit comme étant le nombre de changements d'états par seconde d'un ou de plusieurs paramètres modifiés simultanément. Un changement de phase du signal porteur, une excursion de fréquence ou une variation d'amplitude sont par définition des changements d'états.
- La "rapidité de modulation" $R = 1/T$ s'exprime en "bauds". Le *débit binaire* D se définit comme étant le nombre de bits transmis par seconde. Il sera égal ou supérieur à la rapidité de modulation selon qu'un changement d'état représentera un bit ou un groupement de bits.
- Le "débit binaire" $D = 1/T_b$ s'exprime en "bits par seconde".
- Pour un alphabet M -aire, on a la relation fondamentale : $T = nT_b$ soit $D = n R$.

Il y a égalité entre débit de source et rapidité de modulation uniquement dans le cas d'une source binaire (alphabet binaire).

- La qualité d'une liaison est liée au *taux d'erreur par bit* :

$$T.E.B = \frac{\text{nombre de bits faux}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad \text{II.1}$$

On notera la différence entre P_e et TEB . Au sens statistique, on a : $P_e = E_{(T.E.B)}$. TEB tend vers P_e si le nombre de bits transmis tend vers l'infini.

- L'*efficacité spectrale* d'une modulation se définit par le paramètre : $\eta = \frac{D}{B}$ et s'exprime en "bit/seconde/Hz". La valeur D est le "débit binaire" et B est la largeur de la bande occupée par le signal modulé. Pour un signal utilisant des symboles Maires, on aura :

$$\eta = \frac{1}{T.B} \log_2 M \text{ bit/s/Hz} \quad \text{II.2}$$

Remarquons que pour B et T donnés, l'efficacité spectrale augmente, comme on pouvait s'y attendre, avec le nombre de bit/symbole $n = \log_2 M$. C'est en effet la raison d'être de la modulation M-aire.

I.2 Principes de la modulation numérique

Le message à transmettre est issu d'une source binaire. Le signal modulant, obtenu après codage, est un signal en bande de base, éventuellement complexe, qui s'écrit sous la forme :

$$C(t) = \sum_k C_k \cdot g(t - kT) = C_k(t) = a_k(t) + jb_k(t) \quad \text{avec } C_k = a_k + jb_k$$

La fonction $g(t)$ est une forme d'onde qui est prise en considération dans l'intervalle $[0, T[$ puisque t doit vérifier la relation : $kT \leq t < (k+1)T$. [3]

Dans les modulations MDA, MDP et MAQ, la modulation transforme ce signal $c(t)$ en un signal modulé $m(t)$ tel que :

$$m(t) = \text{Re}[\sum_k C_k(t) \cdot e^{-j\omega_0 t + \varphi_0}] \quad \text{II.3}$$

La fréquence $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ et la phase φ_0 caractérisent la sinusoïde porteuse utilisée pour la modulation.

Si les $C_k(t) = a_k(t) + jb_k(t)$ sont réels ($b_k(t) = 0$), la modulation est dite unidimensionnelle, et s'ils sont complexes la modulation est dite bidimensionnelle. Le signal modulé s'écrit aussi plus simplement :

$$m(t) = \sum_k a_k(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - \sum_k b_k(t) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{II.4}$$

Ou encore : $m(t) = a(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - b(t) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$

En posant : $a(t) = \sum_k a_k(t)$ et $b(t) = \sum_k b_k(t)$

Le signal : $a(t) = \sum_k a_k(t)$ module en amplitude la porteuse en phase : $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ et le signal : $b(t) = \sum_k b_k(t)$ module en amplitude la porteuse en quadrature : $\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$. Dans la plupart des cas les signaux élémentaires : $a_k(t)$ et $b_k(t)$ sont identiques à un coefficient près et ils utilisent la même forme d'impulsion $g(t)$ appelée aussi "formant".

$$a_k(t) = a_k \cdot g(t - kT) \quad \text{et} \quad b_k(t) = b_k \cdot g(t - kT) .$$

Les deux signaux $a(t)$ et $b(t)$ sont aussi appelés « trains modulants » et s'écrivent :

$$a(t) = \sum_k a_k \cdot g(t - kT) \quad \text{et} \quad b(t) = \sum_k b_k \cdot g(t - kT) \quad \text{II.5}$$

Les symboles a_k et b_k prennent respectivement leurs valeurs dans l'alphabet $(A_1, A_2, A_3, \dots, A_M)$ et dans l'alphabet $(B_1, B_2, B_3, \dots, B_M)$. [3]

Le schéma théorique du modulateur est représenté sur la figure II.2.

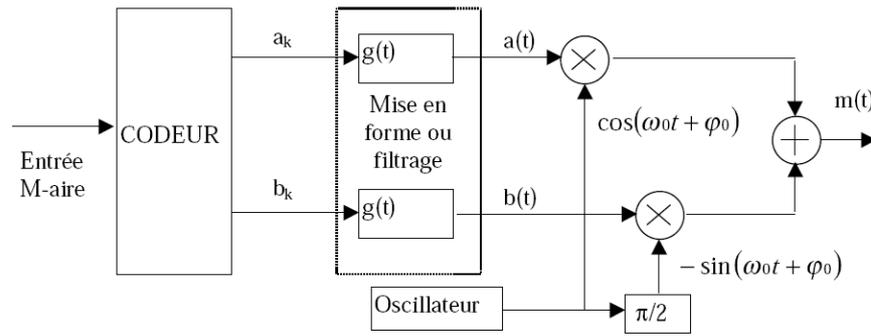


Figure II.2 : Forme générale du modulateur

Les différents types de modulations sont définies par les alphabets décrits ici dessus et par la fonction $g(t)$. A chaque symbole émis correspond un signal élémentaire de la forme :

$$m_k(t) = a_k . g(t - kT) . \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - b_k . g(t - kT) . \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{II.6}$$

qui peut être représentés (voir figure 1.17) dans un espace à deux dimensions dont les vecteurs de base sont :

$$g(t - kT) . \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \text{ et } -g(t - kT) . \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

(décomposition de Fresnel).

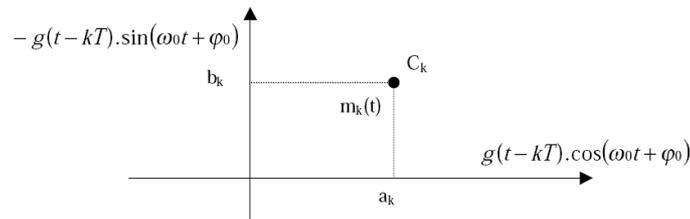


Figure II.3 : Position d'un symbole dans le plan de Fresnel

Le signal modulé $m(t)$ véhicule des informations distinctes à travers $a_k(t)$ et $b_k(t)$ qui sont deux signaux en bande de base appelés respectivement *composante en phase* (I en anglais) et *composante en quadrature* (Q en anglais). La récupération de $a_k(t)$ et $b_k(t)$ sera possible uniquement si ces deux signaux sont de bande limitée à l'intervalle $[-B, B]$ avec $B \ll f_0$ (Condition de Rayghley).[3]

Une représentation dans le plan complexe qui fait correspondre à chaque signal élémentaire un point : $C_k = A_k + jB_k$ permet de différencier chaque type de modulation. L'ensemble de ces points associés aux symboles porte le nom de **constellation**.

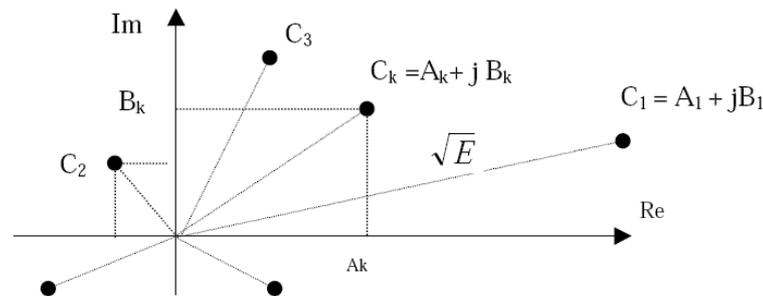


Figure II.4 : Définition d'une constellation numérique

Le choix de la répartition des points dépend des critères suivants :

- Pour pouvoir distinguer deux symboles, il faut respecter une distance minimale d_{min} , entre les points représentatifs de ces symboles. Plus cette distance est grande et plus la probabilité d'erreur sera faible. La distance minimale entre tous les symboles est :

$$d_{min} = \text{Min}(d_{ij}) \text{ avec } d_{ij} = |C_i - C_j|^2 \quad \text{II.7}$$

Ceci est à rapprocher avec la définition de la distance de Hamming.

- A chaque symbole émis correspond un signal élémentaire $m_k(t)$ et par là même une énergie nécessaire à la transmission de ce symbole. Dans la constellation, la distance entre un point et l'origine est proportionnelle à la racine carrée de l'énergie qu'il faut fournir pendant l'intervalle de temps $[kT, (k+1)T]$ pour émettre ce symbole. La puissance moyenne d'émission des symboles est assimilable à $\sum_i |C_i|^2$ et la puissance crête à $\text{Max}|C_i|^2$

Les deux critères évoqués ci-dessus sont antagonistes puisque l'on serait tenté d'une part d'éloigner les symboles au maximum pour diminuer la probabilité d'erreur et d'autre part, de les rapprocher de l'origine pour minimiser l'énergie nécessaire à la transmission.

I.3 Les critères de choix d'une modulation sont :

- La constellation qui suivant les applications mettra en évidence une faible énergie nécessaire à la transmission des symboles ou une faible probabilité d'erreur.
- L'occupation spectrale du signal modulé.
- La simplicité de réalisation (avec éventuellement une symétrie entre les points de la constellation).

Remarque :

Concernant la Densité Spectrale de Puissance (DSP) du signal modulé $m(t)$, certaines formules du cours de Théorie du Signal [3]. nous rappelle que si $\alpha_m(t) = Xc(t) + jXs(t)$ représente le

signal en bande de base de $m(t) = Re [\alpha_m(t). e^{-j(\omega_0 t + \varphi_0)}]$ et si $\gamma_{\alpha_m}(f)$ est la densité spectrale de puissance de $\alpha_m(t)$ alors la DSP du signal modulé $m(t)$ sera :

$$\gamma_m(f) = \frac{1}{4} [\gamma_{\alpha_m}(f - f_0) + \gamma_{\alpha_m}(-f - f_0)] \quad \text{II.8}$$

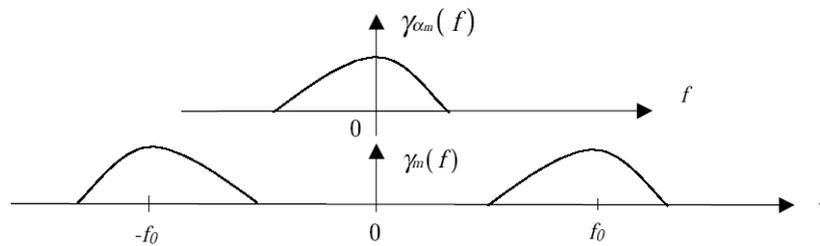


Figure II.5 : Densité spectrale de puissance

Lorsque la modulation est linéaire, l'opération de modulation a pour effet dans la plupart des cas de translater la densité spectrale de puissance (DSP) du signal modulant. La DSP du signal modulé $m(t)$ est aussi liée à la forme de l'onde $g(t)$, (qui sera souvent rectangulaire) par sa transformée de Fourier $G(f)$.

II. Types de modulations numériques

II.1 Modulation par déplacement d'amplitude (MDA)

Les Modulations par Déplacement d'amplitude (MDA) sont aussi souvent appelées par leur abréviation anglaise : ASK pour "Amplitude Shift Keying".

La modulation numérique la plus simple est la modulation d'amplitude tout ou rien (ASK: *Amplitude Shift Keying* ou *OaK: On Off Keying*).

La modulation d'amplitude ASK permet de coder des signaux numériques en signaux analogique avec une amplitude variable. Dans l'exemple suivant le signal analogique peut avoir deux amplitudes différentes. A chaque amplitude correspond un symbole M-aire ou un mot binaire. Ainsi on codera le signal '0001001100' comme suit :

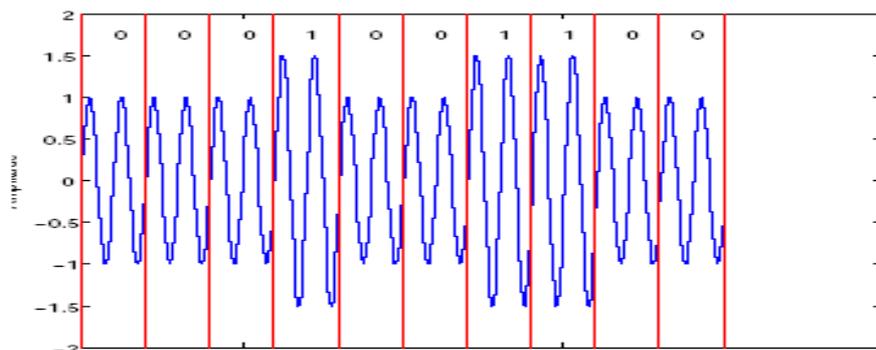


Figure II.6 :

Le principe de cette modulation est de transmettre la porteuse seulement lorsque la valeur du bit au temps t est d'amplitude A . Si la vitesse de la porteuse est beaucoup plus grande que la vitesse de l'information, on peut obtenir le signal modulé tel que montré à la Figure II.7 (à titre d'exemple).

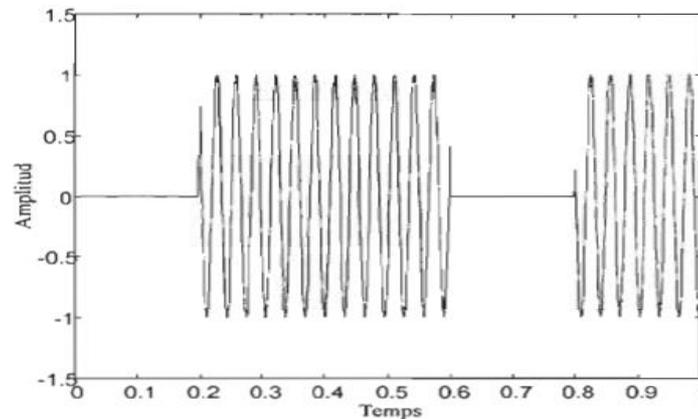


Figure II.7 : Signal ASK

On voit dans cet exemple que la séquence transmise est 0 110 1 (largeur des bits de 0.2 seconde) ce qui correspond aux endroits où la porteuse est présente ou non. Ce genre de modulation est utilisé dans le cas des communications à faibles débits sans contrainte dans l'utilisation spectrale du canal. Si on désire améliorer le taux d'utilisation de la bande passante, il est nécessaire de varier simultanément plusieurs paramètres de l'onde porteuse.

Ce type de modulation n'utilise non pas un seul bit à la fois mais elle regroupe les bits en M symboles selon une règle définie. La valeur de M est définie par le nombre de bits b encodés à la fois soit $M = 2^b$. On appelle ce type de regroupement *M-aire*.

Dans ce cas, la modulation ne s'effectue que sur la porteuse en phase : $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ Il n'y a pas de porteuse en quadrature. Cette modulation est parfois dite mono dimensionnelle. Le signal modulé s'écrit alors :

$$m(t) = \sum_k a_k \cdot g(t - kT) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{II.9}$$

La forme de l'onde $g(t)$ est rectangulaire, de durée T et d'amplitude égale à 1 si t appartient à l'intervalle $[0, T[$ et égale à 0 ailleurs.

Rappelons que le symbole a_k prend sa valeur dans l'alphabet (A_1, A_2, \dots, A_M) . Autrement dit, cet alphabet met en évidence les $M = 2^n$ amplitudes possibles du signal, la valeur n désignant les groupements de n bits ou symboles à émettre. Les changements d'amplitude de la porteuse se produiront au rythme R de la transmission des symboles.

II.1.1 Modulation par tout ou rien

Un exemple de modulation d'amplitude est la modulation (binaire) par tout ou rien encore appelée par son abréviation anglaise : OOK pour "On Off Keying". Dans ce cas, un seul bit est transmis par période T , et par conséquent $n=1$ et $M=2$. Le symbole a_k prend sa valeur dans l'alphabet $(0, a_0)$. On observe donc sur un chronogramme des extinctions de porteuse quand $a_k = 0$ (figure II.8).

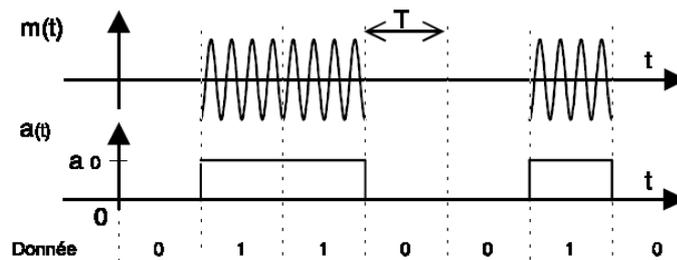


Figure II.8 : Modulation d'amplitude par tout ou rien (OOK)



Figure II.9 : Constellation de la modulation d'amplitude par tout ou rien (OOK)

A la réception, cette modulation d'amplitude est souvent démodulée par une détection d'enveloppe. En l'absence de bruit, l'élévation au carré du signal $m(t)$ donne un terme à la fréquence $2f_0$ qui sera éliminé par filtrage et un terme en bande de base proportionnel à

$$\sum_k a_k^2 \cdot g(t - kT) \text{ qui est porteur de l'information puisqu'il contient } a_k.$$

Le spectre du signal en bande de base est donné par:

$$\gamma m(f) = \frac{a_0^2 T}{4} \left[\frac{\sin \pi f T}{\pi f T} \right]^2 + \frac{a_0^2}{4} \delta(f) \quad \text{II.10}$$

Le spectre du signal modulé est le même décalé de $\pm f_0$ et comporte donc une raie aux fréquences $\pm f_0$.

II.1.2 Modulation à "M-Etats"

Dans ce cas on utilise plutôt la modulation symétrique.

❖ Les constellations "MDA M symétrique"

On a toujours $M = 2^n$ amplitudes possibles du signal, mais ici les valeurs de l'alphabet sont telles que : $A_i = (2i - M + 1) \cdot a_0$ avec $i = 1, 2, \dots, M$.

Suivant les valeurs de n on obtient le tableau suivant :

| n | M | Valeurs de l'alphabet |
|---|---|--|
| 1 | 2 | $-1a_0, 1a_0$ |
| 2 | 4 | $-3a_0, -1a_0, 1a_0, 3a_0$ |
| 3 | 8 | $-7a_0, -5a_0, -3a_0, -1a_0, 1a_0, 3a_0, 5a_0, 7a_0$ |

Tableau II.1

La constellation de la modulation à M états symétriques est donnée figure II.10 pour M prenant comme valeurs 2, 4 et 8.

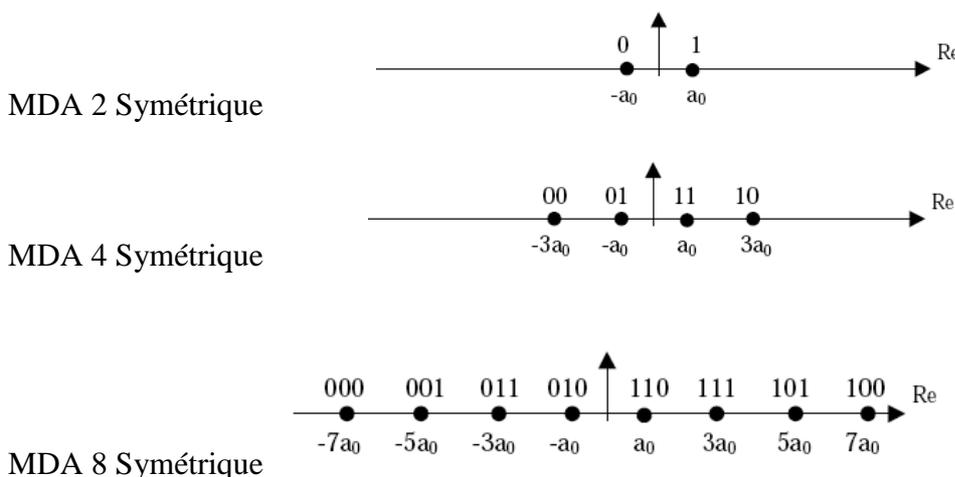


Figure II.10 : Constellation de la modulation d'amplitude à M états

On remarquera que la disposition des symboles met en œuvre un code de *Gray* de telle sorte qu'un seul bit change lorsque l'on passe d'un point à un autre.

❖ **Chronogramme de "MDA 4 Symétrique"**

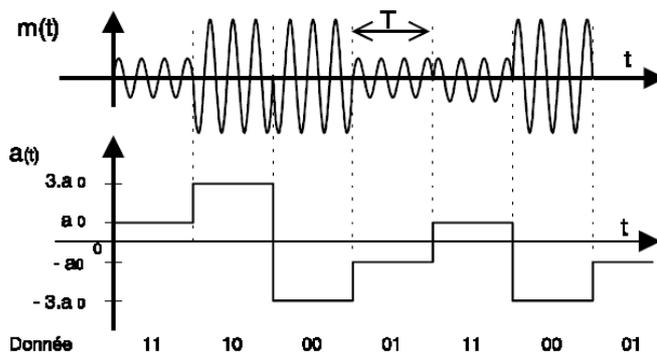


Figure II.11 : Modulation d'amplitude MDA 4 Symétrique

La figure II.11 met en évidence que deux bits sont transmis simultanément à chaque période T . Elle met aussi en évidence qu'il n'est pas question ici de pratiquer une détection d'enveloppe à la réception.

❖ Le spectre de la "MDA M Symétrique"

Le spectre du signal en bande de base ne présente pas de raie et s'écrit

$$\gamma_{am}(f) = \frac{M^2-1}{3} a_0^2 \left[\frac{\sin \pi f T}{\pi f T} \right]^2 \cdot T \quad \text{II.11}$$

Le spectre du signal modulé est le même décalé de $\pm f_0$

II.1.2 Modulation et démodulation

Les figures II.12 et II.13 montrent respectivement un synoptique simplifié de la modulation et de la démodulation cohérente sur une seule porteuse.[3]

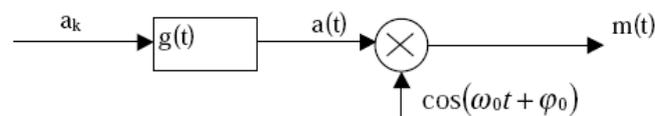


Figure II.12 : Modulation sur une seule porteuse

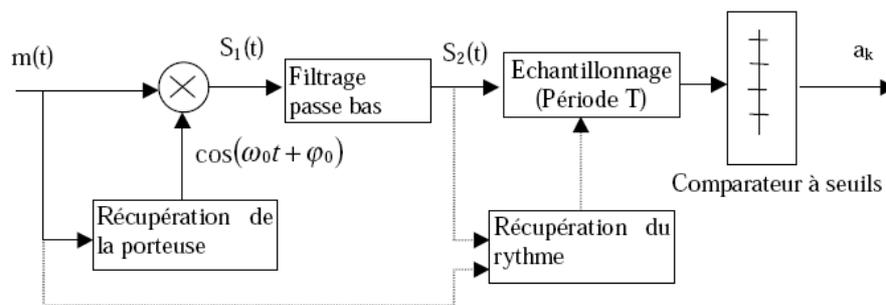


Figure II.13 : Démodulation cohérente sur une seule porteuse

II.1.3 Conclusion sur la MDA

La tentation d'augmenter M (c'est à dire le nombre de bits transmis par symbole) est grande mais présente les avantages et les inconvénients suivants :

- L'efficacité spectrale : $\eta = \frac{1}{T \cdot B} \log_2 M$ augmente, (pour une largeur de la bande B donnée).
- Malheureusement, la probabilité d'erreur par symbole $P_s(e)$ augmente aussi, et, pour ne pas la dégrader, il sera nécessaire d'augmenter l'énergie émise par bit E_b .
- Finalement, ce type de modulation est simple à réaliser mais est assez peu employé pour $M > 2$ car ses performances sont moins bonnes que celles d'autres modulations, notamment pour sa résistance au bruit.

II.2 Modulation par déplacement de phase (MDP)

Les Modulations par Déplacement de phase (MDP) sont aussi souvent appelées par leur abréviation anglaise : PSK pour "Phase Shift Keying".

La modulation de phase PSK permet de coder des signaux numériques en signaux analogique avec une phase variable. Dans l'exemple suivant le signal analogique peut avoir 4 phases différentes. A chaque phase correspond un mot binaire. On peut représenter ces phases de manière spatiale. On utilise un cercle trigonométrique pour représenter chaque phase.

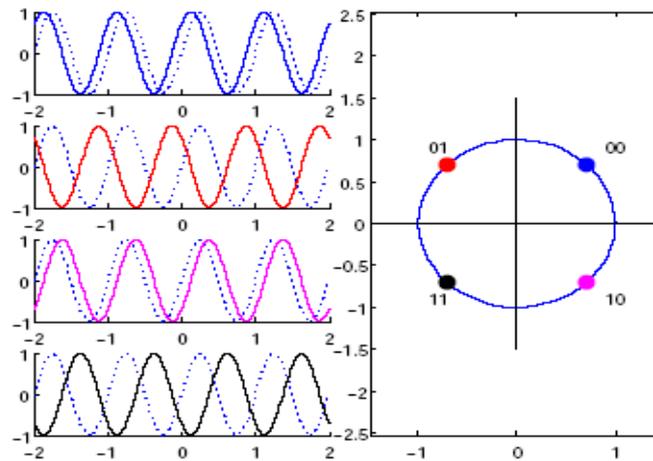


Figure II.14 :representation de diagramme de constellation

Reprenons l'expression générale d'une modulation numérique :

$$m(t) = Re [C_k(t). e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}] \quad \text{II.12}$$

$$\text{avec } c_k(t) = a_k(t) + jb_k(t)$$

Les signaux élémentaires $a_k(t)$ et $b_k(t)$ utilisent la même forme d'onde $g(t)$ qui est ici une impulsion rectangulaire, de durée T et d'amplitude égale à A si t appartient à l'intervalle $[0, T[$ et égale à 0 ailleurs.

On a toujours : $a_k(t) = a_k \cdot g(t - kT)$ et $b_k(t) = b_k \cdot g(t - kT)$

Soit : $c_k(t) = (a_k + jb_k) \cdot g(t - kT) = c_k \cdot g(t - kT)$

Dans le cas présent, les symboles ck sont répartis sur un cercle, et par conséquent :

$$c_k = a_k + jb_k = e^{j\varphi_k} \text{ d'ou : } a_k = \cos(\varphi_k) \text{ et } b_k = \sin(\varphi_k)$$

$$\text{Et : } a_k(t) = \cos(\varphi_k) \cdot g(t - kT) \text{ et } b_k(t) = \sin(\varphi_k) \cdot g(t - kT)$$

On pourrait imaginer plusieurs MDP-M pour la même valeur de M où les symboles seraient disposés de façon quelconque sur le cercle ! Pour améliorer les performances par rapport au

bruit, on impose aux symboles d'être répartis régulièrement sur le cercle (il sera ainsi plus facile de les discerner en moyenne).[3] L'ensemble des phases possibles se traduit alors par les expressions suivantes :

$$\varphi_k = \frac{\pi}{M} + K \frac{2\pi}{M} \text{ Lorsque } M > 2$$

$$\varphi_k = 0 \text{ ou } \pi \text{ Lorsque } M > 2$$

Remarque :

Les symboles c_k prennent leurs valeurs dans un alphabet de $M > 2$ éléments $\{ e^{j\varphi_k} \}$ ou φ_k est défini ci-dessus avec $k = 0, 1, 2, \dots, M-1$.

On peut aussi considérer que a_k et b_k prennent simultanément leurs valeurs dans l'alphabet $\{\cos(\varphi_k)\}$ et $\{\sin(\varphi_k)\}$.

Le signal modulé devient :

$$m(t) = \text{Re} \left[\sum_k e^{j\varphi_k} \cdot g(t - kT) \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \right] = \text{Re} \left[\sum_k g(t - kT) \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k)} \right] \quad \text{II.13}$$

Soit, plus simplement, en ne considérant que l'intervalle de temps $[kT, (k+1)T[$:

$$m(t) = \text{Re} \left[\sum_k A \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k)} \right]$$

$$m(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k)$$

$$= A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos(\varphi_k) - A \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin(\varphi_k) \quad \text{II.14}$$

Cette dernière expression montre que la phase de la porteuse est modulée par l'argument φ_k de chaque symbole ce qui explique le nom donné à la MDP. Remarquons aussi que la porteuse en $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ est modulée en amplitude par le signal $A \cdot \cos(\varphi_k)$ et que la porteuse en quadrature $\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ est modulée en amplitude par le signal $A \cdot \sin(\varphi_k)$

L'expression de la MDP montre qu'il s'agit d'une modulation à enveloppe constante ; l'enveloppe étant le module de l'enveloppe complexe. Cette propriété est intéressante pour des transmissions sur des canaux non linéaires, ce qui fait de la MDP un outil de choix par exemple pour les transmissions par satellites. L'intérêt d'avoir un signal modulé à enveloppe constante est que cela permet d'employer les amplificateurs dans leur zone de meilleur rendement qui correspond souvent à un mode de fonctionnement non linéaire.

Ainsi, la disposition des symboles sur un cercle se traduit non seulement par enveloppe constante, mais aussi, par une énergie identique mise en œuvre pour transmettre chaque symbole, ces deux aspects étant bien entendu intimement liés.

On appelle "MDP-M" une modulation par déplacement de phase (MDP) correspondant à des symboles M-aires. La figure II.15 montre différentes constellations de MDP pour M= 2, 4 et 8.

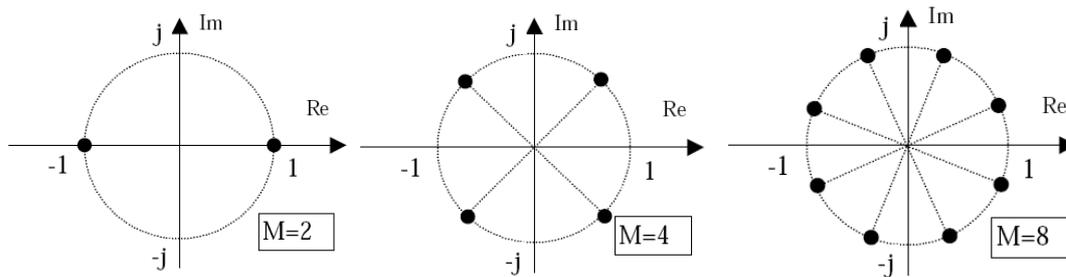


Figure II.15 : Constellation des symboles en modulation de phase MDP-M

II.2.1 Exemple : La modulation "MDP-2"

Un exemple de modulation MDP-M est la modulation MDP-2 encore appelée par son abréviation anglaise : BPSK pour "Binary Phase shift Keying". C'est une modulation binaire (un seul bit est transmis par période T) :

$n=1, M=2$ et $\varphi_k=0$ ou π .

Le symbole $c_k = e^{j\varphi_k}$ prend donc sa valeur dans l'alphabet $\{-1, 1\}$.

Ici, la modulation ne s'effectue que sur la porteuse en phase $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$.

C'est une modulation mono dimensionnelle.

Le signal modulé s'écrit alors pour t appartenant à l'intervalle $[0, T[$:

$$m(t) = \pm A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \tag{II.15}$$

La constellation MDP-2 est représentée figure II.16. On remarquera que cette modulation est strictement identique à la modulation MDA-2 symétrique.

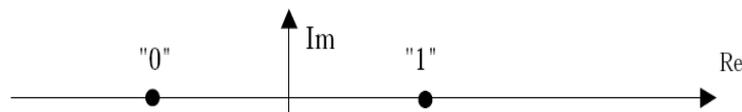


Figure II.16 : Constellation de la modulation de phase MDP-2

II.2.2 Chronogramme de la "MDP-2"

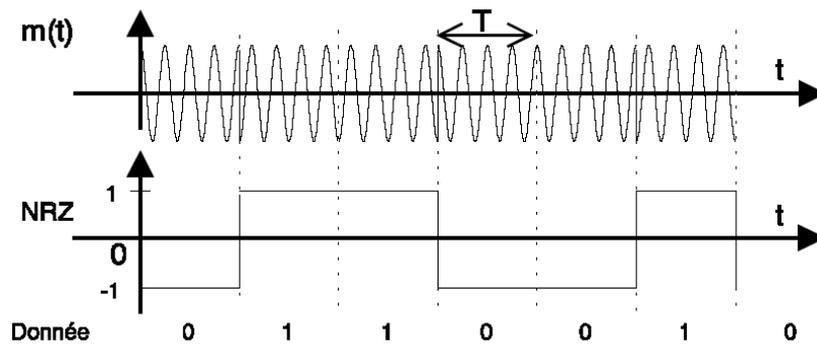


Figure II.17 : Chronogramme de la modulation de phase MDP-2

II.2.3 Modulation et démodulation

Le modulateur représenté figure II.18 est constitué d'un multiplicateur qui effectue le changement de fréquence sur un train numérique codé en NRZ.

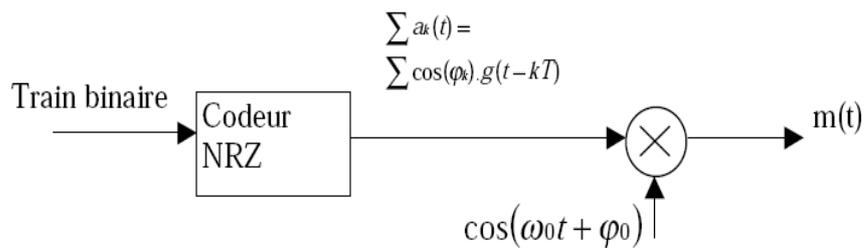


Figure II.18 : Modulateur MDP-2

Le récepteur requiert l'utilisation d'une démodulation cohérente : (voir figure II.19) le synoptique simplifié du démodulateur MDP-2).

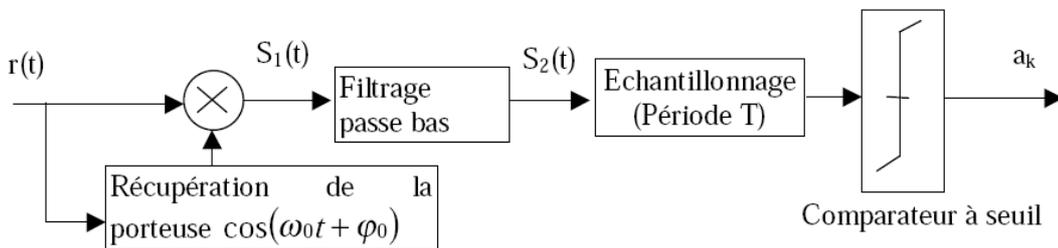


Figure II.19 : Démodulateur MDP-2

Soit : $r(t) = B \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k)$ le signal non bruité reçu par le récepteur dans l'intervalle de temps $[kT, (k+1)T]$. Après multiplication avec la porteuse récupérée, on obtient :

$$S_1(t) = B \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \tag{II.16}$$

Soit, après filtrage pour éliminer la composante à la fréquence $2f_0$:

$S_2(t) = \frac{B}{2} \cos(\varphi_k)$, Le récepteur doit encore récupérer le rythme des symboles transmis, puis échantillonner le signal $S_2(t)$ au milieu de chaque période. Suivant le symbole émis –1 ou 1, φ_k prend la valeur π ou 0 et le signe de $S_2(t)$ devient négatif ou positif mettant en évidence la donnée binaire reçue "0" ou "1".

II.2.4 Le spectre de la "MDP-2"

Le spectre du signal en bande de base est le spectre de puissance de $g(t)$ qui est ici une impulsion rectangulaire :

$$\gamma_{am}(f) = A^2 T \left[\frac{\sin \pi f T}{\pi f T} \right]^2 \quad \text{II.17}$$

Le spectre du signal modulé est décalé de $\pm f_0$.

II.2.5 Conclusion sur la MDP

La tentation d'augmenter M (c'est à dire le nombre de bits transmis par symbole) est grande et présente les avantages et les inconvénients suivants :

- *L'efficacité spectrale* : $\left[\eta = \frac{1}{T.B} \log_2 M \right]$ augmente, (pour une largeur de la bande B donnée).
- La probabilité d'erreur par symbole $P_s(e)$ augmente aussi, et, pour ne pas la dégrader il est nécessaire d'augmenter le rapport signal sur bruit, cette augmentation restante raisonnable jusque $M = 16$.
- Nous avons vu que la complexité de l'ensemble émission/réception de la MDP augmente avec M . Cependant cette complexité n'est pas très élevée et fait de la MDP une modulation fréquemment utilisée pour M allant de 2 à 16 avec de bonnes performances.
- Dans les inconvénients de la MDP, citons l'existence de sauts de phase importants de $\pm\pi$ radians qui font apparaître des discontinuités d'amplitude. Les modulations décalées sont une solution à ce problème.

II.3 Modulation par déplacement de fréquence (MDF)

Les Modulations par Déplacement de fréquence (MDF) sont aussi souvent appelées par leur abréviation anglaise : FSK pour "Frequency Shift Keying".

La modulation de fréquence FSK permet de coder des signaux numériques en signaux analogique avec une fréquence variable. Dans l'exemple suivant le signal analogique peut avoir deux fréquences différentes. A chaque fréquence correspond un mot binaire. Ainsi on codera le signal '0001001100' comme suit :

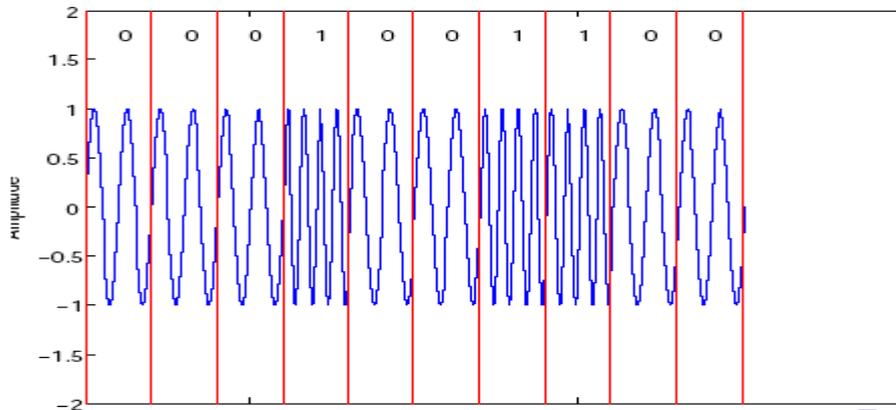


Figure II.20 :MDF

Le signal modulé $m(t)$ peut s'écrire :

$$m(t) = \text{Re} \left[e^{j\varphi(t)} \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \right] \quad \text{II.18}$$

Une propriété de la modulation par déplacement de fréquence est d'avoir une enveloppe constante : $e^{j\varphi(t)} = \text{Cte}$

L'expression du signal modulé par déplacement de fréquence s'écrit aussi plus simplement, et en prenant : $\varphi_0 = 0$,

$$\text{par : } m(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t)) \quad \text{II.19}$$

C'est la **dérivée** de la phase $\varphi(t)$ qui est reliée de façon simple (linéaire) à la valeur des symboles, le tout constituant une relation non linéaire.

La *fréquence instantanée* : $f(t)$ du signal $m(t)$ est obtenue par dérivation de la phase

$$(2\pi f_0 t + \varphi(t)). \text{ par rapport au temps : } f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt}$$

Dans cette expression f_0 représente la *fréquence centrale* : $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$, et $\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt}$ représente la *déviaton de fréquence* par rapport à la fréquence f_0

Appelons Δf la différence de la *fréquence instantanée* correspondant à l'émission de deux symboles adjacents ; Et soit a_k un symbole appartenant à l'ensemble $\{ \pm 1, \pm 3, \dots \pm (M-1) \}$. La *déviaton de fréquence* s'écrit alors, suivant la valeur à transmettre :

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Delta f}{2} \sum_k a_k \cdot g(t - kt)$$

où $g(t)$ est l'impulsion rectangulaire de durée T .

Alors : $\frac{d\phi}{dt} = \pi\Delta f \sum_k a_k \cdot g(t - kt)$ II.20

La phase étant l'intégrale de la fréquence, on obtient après intégration de l'expression précédente et pour t appartenant à l'intervalle $[kT, (k+1)T[$:

$\Phi(t) = \pi \cdot \Delta f \cdot a_k \cdot (t - kT) + \theta_k$ ou $\theta_k = \Phi(kT)$, est une constante

Cette expression montre que la phase varie linéairement sur l'intervalle $[kT, (k+1)T[$ et que cette variation est de: $\pi \cdot \Delta f \cdot T \cdot a_k$

En reportant l'expression de $\Phi(t)$ dans la relation $(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt}$, on obtient :

La *fréquence instantanée* : $f(t) = f_0 + \frac{\Delta f}{2} a_k$

L'expression du signal modulé : $m(t) = \cos(2\pi(f_0 + \frac{\Delta f}{2} a_k))$

On peut aussi définir l'*indice de modulation* : $\mu = \Delta f \cdot T$, qui conditionne la forme de la densité spectrale du signal modulé.

II.3.1 La modulation MDF à phase discontinue

Dans les Modulations par Déplacement de fréquence, on trouve les MDF à phase discontinue pour lesquelles la phase aux instants de transition kT peut sauter brusquement.

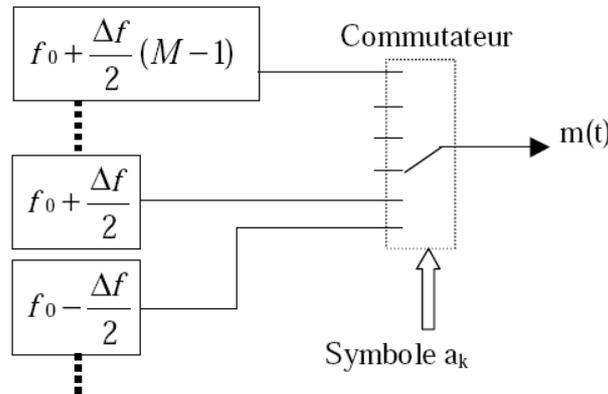


Figure II.21 : Modulateur MDF à commutation d'oscillateurs

Le modulateur MDF le plus simple, représenté figure 1.35, est constitué d'oscillateurs différents. La différence de fréquence entre deux oscillateurs voisins est Δf . La fréquence instantanée du signal modulé saute d'une valeur à l'autre à chaque changement de symbole.

Ceci ne permet pas de garantir la continuité de phase de $m(t)$ et, par conséquent, le spectre occupé par ce type de modulation est très large. En effet, plus un signal est régulier, (ou plus il est dérivable à un ordre élevé) et plus son spectre décroît rapidement.

L'intérêt de la MDF à phase discontinue réside dans la simplicité de réalisation du modulateur et dans la possibilité d'une démodulation non cohérente.

II.3.2 Exemple : MDF binaire à phase discontinue

Dans le cas d'une MDF binaire, a_k prend sa valeur dans l'alphabet $\{-1, 1\}$ en fonction de la donnée "0" ou "1" à transmettre. Un chronogramme est présenté figure II.22 où l'on observera les discontinuités de phase.

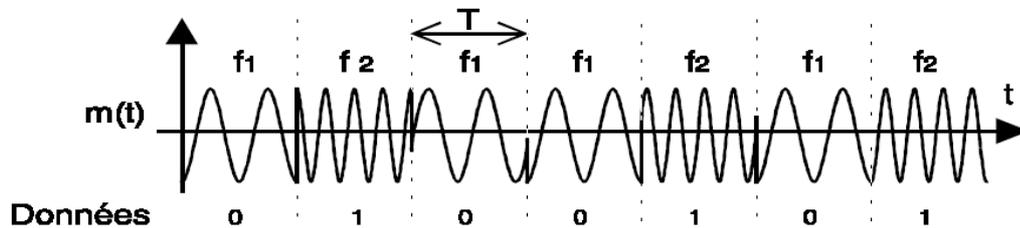


Figure II.22 : Chronogramme MDF binaire à phase discontinue

Dans un intervalle de temps donné $[kT, (k+1)T]$, la fréquence instantanée :

$$f(t) = f_0 + \frac{\Delta f}{2} a_k \quad \text{II.21}$$

Devient : $f_1 = f_0 - \frac{\Delta f}{2}$ ou $f_2 = f_0 + \frac{\Delta f}{2}$

La fréquence centrale s'écrit : $f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2}$ et l'excursion de fréquence est : $\Delta f = |f_2 - f_1|$

L'expression du signal modulé est : $m(t) = \cos(2\pi(f_0 + \frac{\Delta f}{2})t)$ II.22

II.3.3 La modulation MDF à phase continue MDF-PC

Dans les Modulations par Déplacement de fréquence, on trouve les MDF avec continuité de phase pour lesquelles la phase varie de façon continue aux instants de transition kT .

Reprenons l'expression de la phase : $\Phi(t) = \pi \cdot \Delta f \cdot a_k \cdot (t - kT) + \theta_k$ et intéressons-nous à la constante d'intégration θ_k , pour qu'il y ait continuité de phase entre la fin de l'émission du symbole a_{k-1} et le début de l'émission du symbole a_k :

La phase au début de l'émission du symbole a_k doit être égale à la phase au début de l'émission du symbole a_{k-1} augmentée de la variation de la phase : $\pi \cdot \Delta f \cdot T \cdot a_{k-1}$ pendant l'émission de ce symbole : a_{k-1} . Ceci s'écrit simplement : $\theta_k = \theta_{k-1} + \pi \cdot \Delta f \cdot T \cdot a_{k-1}$

Cette condition de continuité est réalisée quand on utilise un oscillateur unique dont on module la fréquence.

Un exemple de modulateur MDF-M-PC est représenté figure II.23. Il est constitué d'une logique de codage permettant de charger un convertisseur N/A dont la tension de sortie, en forme de paliers, est représentative du symbole à transmettre. Cette sortie du CNA module alors un oscillateur commandé par tension (VCO).

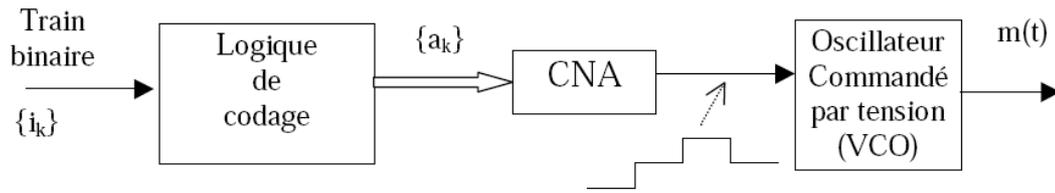


Figure II.23 : Modulateur MDF-M-PC

Un synoptique de démodulateur MDF-M-PC est représenté figure II.24. Il est constitué d'un discriminateur de fréquence dont la sortie fournit un signal analogique à plusieurs niveaux. Ce signal analogique est envoyé dans un convertisseur analogique numérique (CAN) dont la sortie est décodée pour déterminer les symboles et régénérer le train de bits reçus.

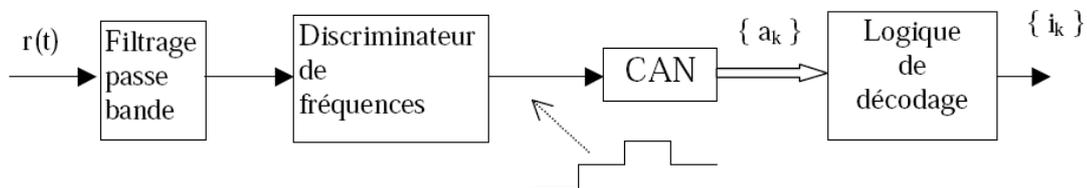


Figure II.24 : Démodulateur MDF-M-PC

II.3.4 Exemple : MDF binaire à phase continue

Le cas d'une MDF binaire à phase continue (MDF-2-PC) où a_k prend sa valeur dans l'alphabet $\{-1, 1\}$ en fonction de la donnée "0" ou "1" à transmettre, est présenté figure II.25.

On remarquera la continuité de phase.

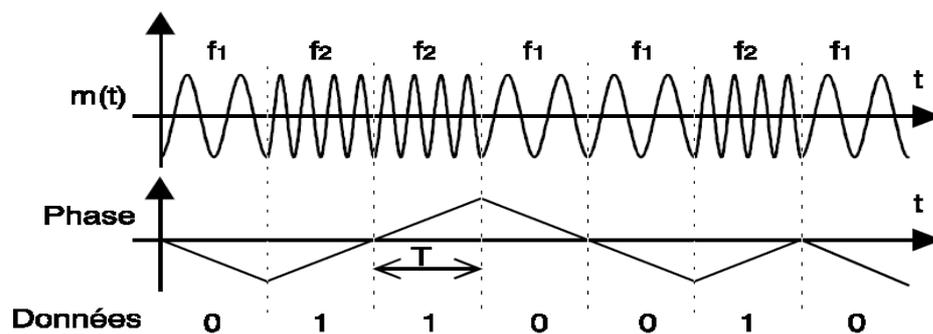


Figure II.25 : Chronogramme d'une MDF binaire à phase continue

Nous avons vu que la phase varie linéairement de $\pi \cdot \Delta f \cdot T \cdot a_k$ sur l'intervalle $[kT, (k+1)T]$ et que l'indice de modulation est $\mu = \Delta f \cdot T$. La variation de la phase pendant une période T d'émission d'un symbole est donc égale à : $\pi \cdot \mu \cdot a_k$. On peut alors représenter cette variation de

la phase dans le temps pour des symboles binaires $a_k = \pm 1$. Cette représentation, figure II.26, porte le nom de "treillis des phases".

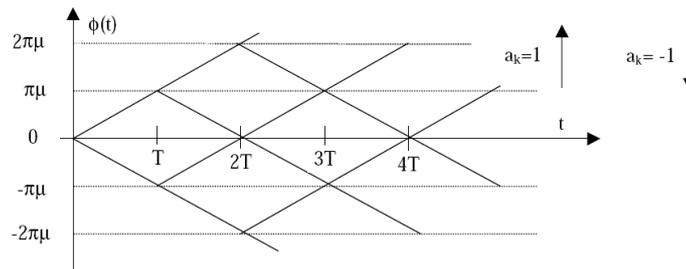


Figure II.26 : Treillis des phases en MDF binaire à phase continue

II.3.5 Conclusion sur la MDF

Nous avons trouvé deux types de Modulation par Déplacement de fréquence, chacun ayant présentant des avantages et des inconvénients :

- La MDF à phase discontinue :
 - Elle est simple de réalisation.
 - Son principal défaut est la grande bande passante dont elle a besoin pour pouvoir transmettre les sauts de phase.
- La MDF avec continuité de phase :
 - Elle est plus complexe à réaliser.
 - Elle requiert une bande passante plus étroite.

Elles ont en commun d'avoir une densité spectrale de puissance compliquée à calculer en raison du caractère non linéaire de la MDF.[4]

La modulation par déplacement de phase DPSK et la modulation d'amplitude en quadrature QAM fera l'objet du chapitre III.

CHAPITRE III

MODULATION DPSK ET QAM

I. Introduction

Pour une communication de meilleure qualité et efficace, une technique de modulation numérique est utilisée. Les principaux avantages de la modulation numérique par rapport à la modulation analogique comprennent la bande passante disponible, l'immunité au bruit élevée et la puissance admissible. En modulation numérique, un signal de message est converti d'un message analogique en un message numérique, puis modulé en utilisant une onde porteuse.

L'onde porteuse est activée et désactivée pour créer des impulsions telles que le signal est modulé. Semblable à l'analogique, dans ce système, le type de la modulation numérique est décidé par la variation des paramètres de l'onde porteuse tels que l'amplitude, la phase et la fréquence.

Les techniques de modulation numérique les plus importantes sont basées sur la saisi comme Changement d'amplitude, modulation par déplacement de fréquence, modulation par déplacement de phase...

Dans ce chapitre on va étudier la modulation par déplacement de phase différentielle (DPSK) et la modulation QAM.

II. Modulation par déplacement de phase différentielle (DPSK)

Dans la modulation par déplacement de phase différentielle (DPSK), la phase du signal modulé est décalée par rapport à l'élément de signal précédent. Aucun signal de référence n'est considéré ici.

- Une version de PSK binaire. DPSK est utilisé pour simplifier le processus de démodulation en l'absence de référence absolue de la phase de la porteuse.
- Au lieu de la technique de synchronisation comme dans le BPSK, le signal transmis devient la référence de phase où la phase du bit reçu est comparée à la phase du bit précédemment reçu.
- La DPSK peut être générée à partir de la BPSK par un processus appelé codage de phase différentielle, dans lequel le flux de bits série passe le XNOR comme indiqué dans la figure III.1 suivante.
- The XNOR output is then applied to 1 bit delay before applied back to the other input of the XNOR.

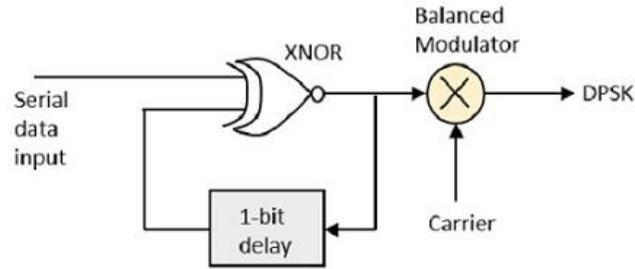


Figure III.1: Modulateur DPSK

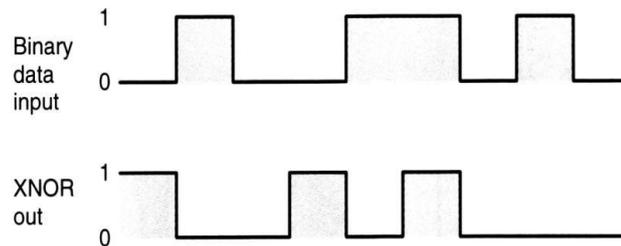


Figure III.2 : Génération of DPSK

La phase du signal suit l'état haut ou bas de l'élément précédent. Cette technique DPSK n'a pas besoin d'un oscillateur de référence [4].

La figure III.3 suivante représente la forme d'onde du modèle :

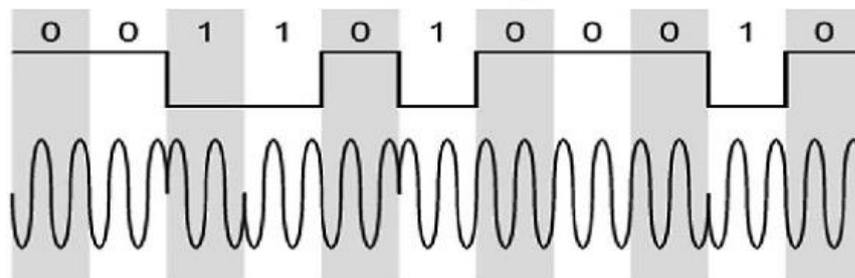


Figure III.3 : Forme d'onde pour la DPSK

La figure ci-dessus montre que, si le bit de données est à l'état bas, c'est-à-dire 0, la phase du signal n'est pas inversée, mais continue telle quelle. Si les données sont à l'état haut, c'est-à-dire 1, la phase du signal est inversée, comme avec NRZI, inverser sur 1 (forme de codage différentiel).

Si nous observons la forme d'onde ci-dessus, nous pouvons dire que l'état haut représente un M dans le signal modulant et que l'état bas représente un W dans le signal modulant [4].

II.1 Modulateur DPSK

La DPSK est une technique de BPSK dans laquelle il n'y a pas de signal de phase de référence. Ici, le signal transmis lui-même peut être utilisé comme signal de référence. Voici le schéma du modulateur DPSK [4].

La DPSK code deux signaux distincts, à savoir la porteuse et le signal modulant avec un déphasage de 180° chacun. L'entrée de données série est transmise à la porte XNOR et la sortie est à nouveau renvoyée à l'autre entrée avec un retard de 1 bit. La sortie de la porte XNOR avec le signal de porteuse est transmise au modulateur d'équilibrage afin de produire le signal modulé DPSK [4].

II.2 Démodulateur DPSK

Dans un démodulateur DPSK, la phase du bit inversé est comparée à la phase du bit précédent. Vous trouverez ci-dessous le schéma synoptique du démodulateur DPSK [4].

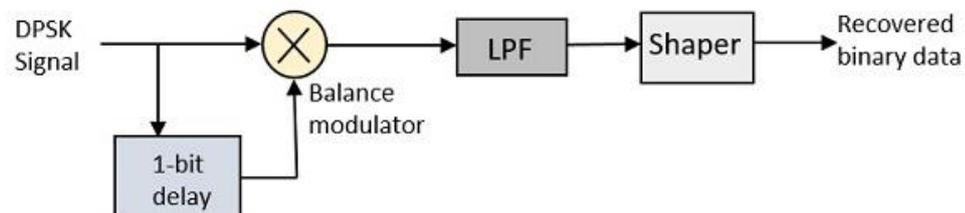


Figure III.4 : Démodulateur DPSK

D'après la figure III.4 ci-dessus, il est évident que le modulateur de balance reçoit le signal DPSK avec une entrée de retard à 1 bit. Ce signal est fait pour se limiter aux basses fréquences à l'aide de LPF. Ensuite, il est passé à un circuit de mise en forme, qui est un comparateur ou un circuit de déclenchement de Schmitt, pour récupérer les données binaires d'origine en sortie [5].

II.3 Modulation par déplacement de phase différentielle (DPSK)

II.3.1 Base de fonctionnement

- Pour la modulation **DPSK**, le terme «différentiel» est utilisé car le déphasage fait référence au bit précédent. Cependant, la fréquence des signaux de référence doit être identique à celle du signal reçu.
- Les données portant des informations sont transportées par la différence de phase entre le symbole actuel et le symbole précédent : $\{\Theta(k+1) - \Theta_k = \varphi_i = 2\pi i / M\}$.

| Indice de l'échantillon, k | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|---|---|-------|-------|-------|---|-------|-------|
| Message, m(k) | | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Message encodé différentiellement | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Décalage de phase correspondant | π | π | π | 0 | 0 | π | π | π | 0 | π | π |

Tableau III.1

- Dans l'émetteur, chaque symbole est modulé par rapport à la phase de l'élément de signal immédiatement précédent transmis :
 - Bit «0»**: rafale de signal avec la même phase que la rafale de signal précédente.
 - Bit «1»**: rafale de signal de phase opposée à la rafale de signal précédente.
- La DPSK ne nécessite pas d'oscillateur local à réception précise qui corresponde à l'émetteur pour les informations de phase, mais dépend évidemment de la phase précédente (bit d'information) reçue correctement.
- La densité spectrale de puissance (DSP) pour la DPSK est identique à la DSP pour la BPSK ; Bande passante de transmission RF DPSK Null à Null: $B_{null} = 2fb$.
- La probabilité d'erreur de bit pour la PSK différentielle est:

$$\{ P_{be, DPSK} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{N_0}\right) \}.$$

II.4 Differential Phase Shift Keying (DPSK)

La modulation par décalage de phase (PSK) a été proposée pour la première fois il y a plus de 20 ans. Il a retrouvé de l'intérêt en 2002 [5] lorsqu'il a été démontré qu'une transmission extrêmement performante était réalisable au débit de 40 Gbit /s en configuration WDM.

L'association de la modulation par décalage de phase (PSK) et de la détection différentielle côté récepteur est appelée modulation par décalage de phase différentielle (DPSK) ou modulation par décalage de phase binaire différentielle (DBPSK); B indiquant qu'une modulation binaire est utilisée [5].

La représentation du champ électrique de la modulation OOK standard et de la modulation DPSK est illustrée à la Figure III.5.

Dans la plage de longueurs d'onde des systèmes de communication optiques, c'est-à-dire environ 1550 nm, la fréquence du champ électrique est d'environ 200 THz et la période d'oscillation est d'environ 5 fs. Dans un signal à 10 G Symbol/s, chaque symbole contient environ 20 000 oscillations. Pour le format OOK, l'amplitude (donc l'intensité) du champ électrique est modulée. Pour le format BPSK, la phase du signal peut être changée de π d'un symbole à l'autre [5].

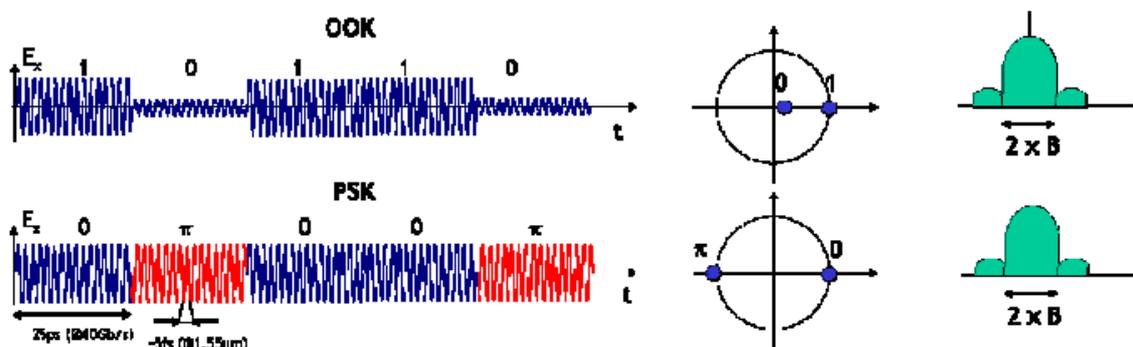


Fig. III.5 : Représentation du champ électrique des formats OOK (en haut) et PSK (en bas), diagramme de constellation (centre) et spectre (à droite)

Les phases "0" et " π " sont clairement visibles sur le diagramme de constellation. La distance entre les deux états apparaît nettement plus grande que pour le signal OOK. Sur la partie gauche de la figure, on peut observer que les spectres sont assez similaires, du moins en largeur. Mais les signaux PSK ne présentent aucune porteuse car la moyenne de

l'amplitude de tous les symboles est nulle contrairement aux signaux OOK. Procédé pour générer un signal DPSK est légèrement modifié par rapport au signal de OOK.

Pour éviter l'utilisation de récepteurs cohérents complexes, une approche différentielle a été proposée conjointement avec un récepteur équilibré. L'un des principaux avantages de la modulation par décalage de phase différentielle (DPSK) est une amélioration de 3 dB de la tolérance au bruit optique, également appelée sensibilité OSNR, apportée par le récepteur symétrique [6].

Un interféromètre de Mach Zehnder (également appelé démodulateur optique) ayant un délai d'un bit entre ses deux bras génère des interférences entre un bit et le précédent. Lorsque les deux bits consécutifs ont la même phase, une interférence de construction génère une impulsion optique à la sortie du port de construction et aucun signal optique sur le port de destruction. Lorsque deux bits consécutifs présentent une différence de phase de π , une interférence destructive ne produit aucun signal optique à la sortie du port de construction et une impulsion optique sur le port de destruction. Des photodiodes équilibrées sont connectées aux deux ports du démodulateur optique, puis au filtre passe-bas, suivies d'un élément de décision et d'un circuit de récupération d'horloge, comme illustré à la Figure III.6.

Un moyen simple d'expliquer l'amélioration 3dB de la sensibilité OSNR de DPSK sur OOK consiste à tracer le diagramme de constellation des deux formats, OOK et DPSK (voir Figure III.7), c'est-à-dire le champ électrique aux emplacements attendus de « 0 » et « 1 » Symboles dans le plan complexe, en supposant une intensité normalisée. En considérant OOK, un symbole « 0 » a une amplitude presque nulle et tombe au centre du cercle, tandis qu'un symbole « 1 » a une amplitude normalisée à 1. Les symboles « 1 » peuvent être situés n'importe où sur le cercle, en fonction de leur phase. La phase n'a pas d'importance dans notre explication et nous avons choisi de représenter les symboles OOK avec une phase nulle, c'est-à-dire le long de l'axe Réel.

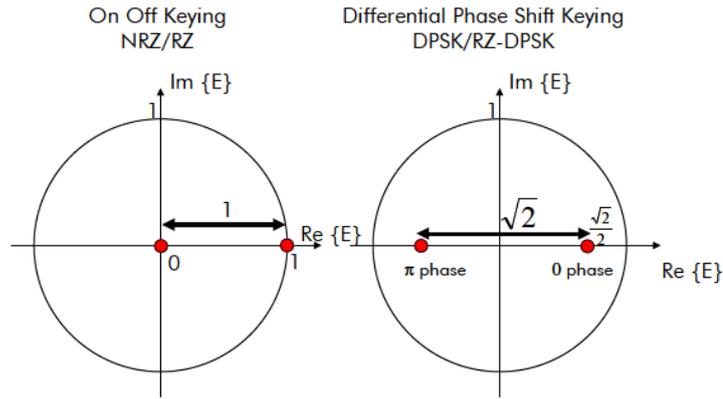


Figure III.6: amélioration de la sensibilité par DPSK

Compte tenu de la DPSK, les symboles « 0 » et « 1 » ont la même amplitude, afin de maintenir la même puissance moyenne que pour le format OOK, mais une différence de phase de π . Là encore, leur phase réelle importe peu ici, et nous pouvons localiser les symboles DPSK le long de l'axe réel, autour du centre du cercle. Pour chaque symbole du train de bits, toute perturbation de bruit ajoute au champ électrique et décale ses coordonnées dans le plan complexe de la valeur représentée à la Figure III.7.[7]

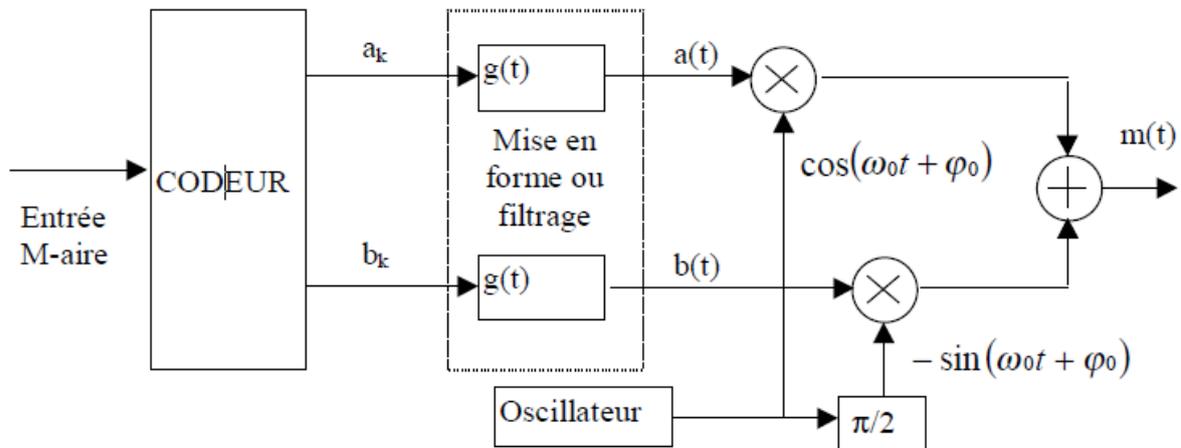


Figure III.7 : La Forme générale du modulateur

Dans la mesure où, la distance entre «0» et «1» est plus grande pour DPSK que pour OOK, il faut une plus grande quantité de bruit pour confondre un «1» avec un «0» ou l'inverse pour DPSK que pour OOK. Cela explique intuitivement pourquoi la sensibilité OSNR de DPSK est supérieure à celle de OOK. Ces considérations ne valent que si DPSK est détecté avec un récepteur spécial capable de distinguer la phase des symboles sans perte de puissance, comme dans une configuration équilibrée.

- La **Modulation à Déplacement D'amplitude (MDA)** consiste à faire varier l'amplitude du signal selon la loi de transcodage associée. Celui-ci s'exprime alors :

$$s(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \phi) \quad \text{avec } A(t) = \sum a_k g(t - kTs)$$

Où $g(t)$ est un filtre de mise en forme des impulsions, par exemple une porte $g(t) = 1$ si $t \in [0, Ts[$ et 0 ailleurs], ϕ est une phase de référence et $\{a_k\}$ la suite des symboles M-aires. Ce type de modulation est simple à réaliser mais est assez peu employé pour $M > 2$ car ses performances sont moins bonnes que celles d'autres modulations, notamment en ce qui concerne sa résistance au bruit.

- Pour la **Modulation à Déplacement de Phase (MDP)**, le seul paramètre susceptible de varier est la phase de l'onde porteuse. A la sortie du modulateur, le signal s'exprime :

$$s(t) = A \sum g(t - kTs) \cos(\omega_0 t + \phi_k) \quad \text{III.1}$$

Où A représente l'amplitude constante de l'onde porteuse et ϕ_k la valeur de la phase pendant un intervalle de temps $[kTs, (k+1)Ts[$. Pour une modulation MDP- M , ϕ_k prend ses valeurs dans un alphabet de M éléments :

$$\phi_n = \phi + (2n+1)\pi/M, \quad n = 0, 1, \dots, M-1.$$

La complexité de l'ensemble émission/réception de la **MDP** augmente avec M , mais reste raisonnable, ce qui en fait une modulation fréquemment utilisée pour M allant de 2 à 16 avec de bonnes performances. Parmi les inconvénients de la **MDP**, citons l'existence de sauts de phase importants qui font apparaître des discontinuités d'amplitude. Les modulations décalées ou tournées peuvent être une solution à ce problème.

- En ce qui concerne la **modulation à déplacement de fréquence (MDF)**, c'est la fréquence instantanée, dérivée de la phase instantanée, qui peut prendre plusieurs valeurs associées aux états possibles. Après modulation, le signal a pour expression :

$$s(t) = [\cos(\omega_0 + 2\pi a_k \Delta F)t] \quad \text{III.2}$$

Avec les a_k symboles appartenant à $\{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm (M-1)\}$ et l'excursion en fréquence $2\Delta F = mTs$ où m est l'indice de modulation. Une modulation fréquemment utilisée considère le cas particulier $m = 0.5$. Le spectre est alors concentré autour de la fréquence porteuse et cette modulation prend naturellement le nom de modulation à déplacement minimum de fréquence.

Densité spectrale de puissance

$$PSD_{BPSK} = \frac{E_b}{2} \left[\left(\frac{\sin \pi(f-f_c)T_b}{\pi(f-f_c)T_b} \right)^2 + \left(\frac{\sin \pi(f+f_c)T_b}{\pi(f+f_c)T_b} \right)^2 \right] \quad III.3$$

III. Modulation d'amplitude en quadrature (QAM) [8]

Les modulations d'amplitude sur deux porteuses en quadrature (MAQ) sont aussi appelées par leur abréviation anglaise : QAM pour "Quadrature Amplitude modulation". C'est une modulation dite bidimensionnelle.

Modulation QAM est une forme de modulation d'une porteuse par modification de l'amplitude de la porteuse elle-même et d'une onde en *quadrature* (une onde déphasée de 90° avec la porteuse) selon l'information transportée par deux signaux d'entrée. Cela signifie que l'amplitude et la phase de la porteuse sont simultanément modifiées en fonction de l'information à transmettre. QAM est utilisée dans les systèmes de télévision PAL et NTSC, où les signaux *en phase* (signal *I* pour *In Phase*) et à 90° (signal *Q* pour *Quadrature*) transportent les composantes des informations de couleur (chroma).

La modulation QAM est l'association d'une **modulation d'amplitude** et d'une **modulation de phase**. Deux porteuses de même fréquence sont déphasées de 90°. La modulation d'amplitude se fait sur deux niveaux (par exemple 1 et 0,5). Chaque porteuse peut avoir un déphasage 0° ou 180°. Chaque porteuse peut transporter 4 informations différentes (soit 2 bits) par cellule. Les deux porteuses peuvent transporter 4 bits (16 informations différentes) par cellule d'où le nom de **QAM 16** (Il existe aussi QAM 64, QAM 128...) [7]

III.1 Principe de la modulation QAM

QAM est une forme de modulation d'une porteuse par modification de l'amplitude de la porteuse elle-même et d'une onde en quadrature (une onde déphasée de 90° avec la porteuse) selon l'information transportée par deux signaux d'entrée.

Lorsque le signal $m(t)$ est obtenu par une combinaison de deux porteuses en quadrature modulées en amplitude par des symboles a_k et b_k indépendants, cela simplifie le modulateur et le démodulateur.

En effet, pour le modulateur le train binaire entrant $\{i_k\}$ est facilement divisé en deux trains $\{a_k\}$ et $\{b_k\}$ (voir figure III.9).

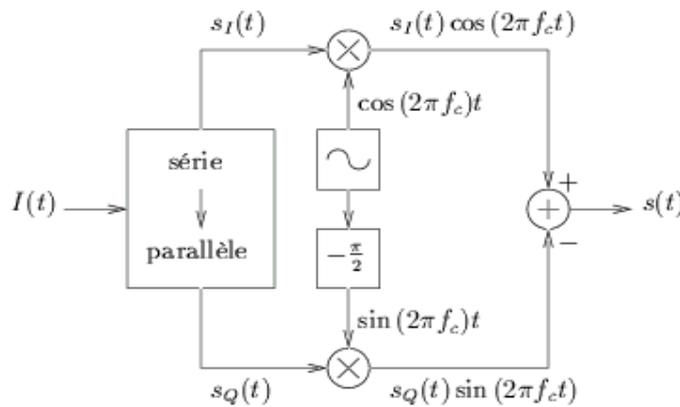


Figure III.8 : Principe d'un modulateur QAM

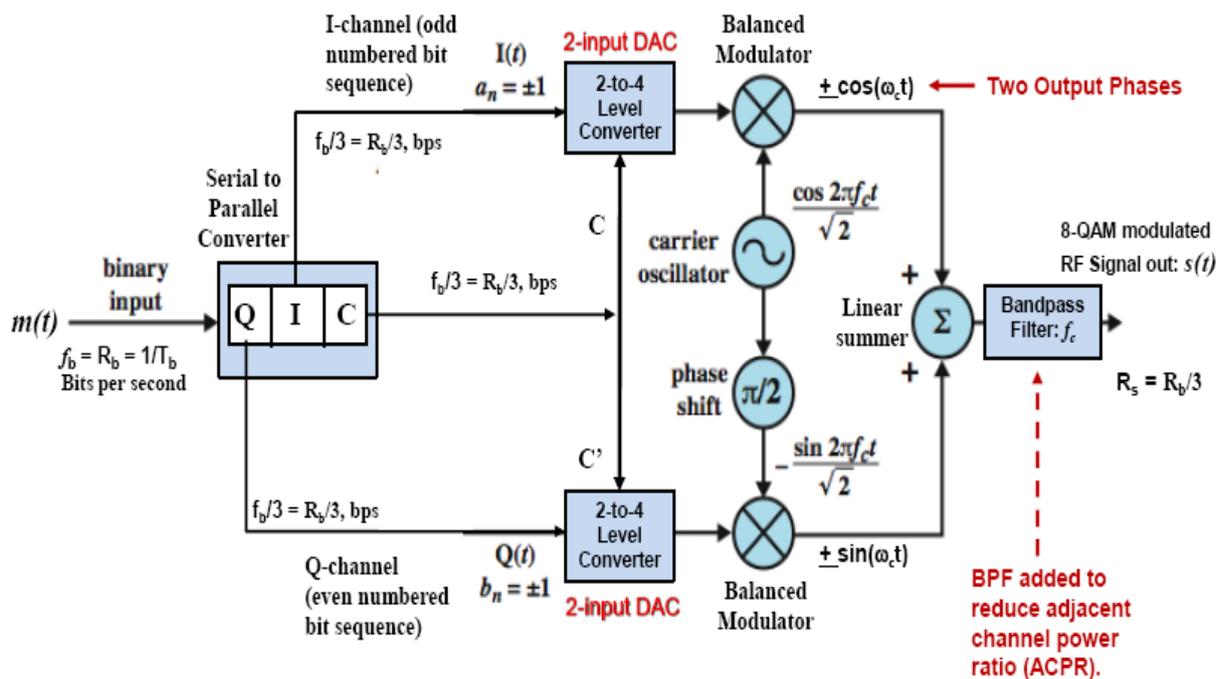


Figure III.9 : Modulateur à 8-QAM

III.2 Démodulateur QAM

Le signal modulé en **QPSK** correspond à la modulation en quadrature de deux signaux numériques en bande de base. La première phase de la démodulation consiste donc à retrouver les composantes en phase et en quadrature du signal modulé. Les deux signaux numériques en bande de base obtenus sont ensuite démodulés grâce au filtre adapté (un pour chaque signal) et recombinaés pour former la séquence binaire de départ. Le schéma du démodulateur **QPSK** est repris sur la figure III.10.

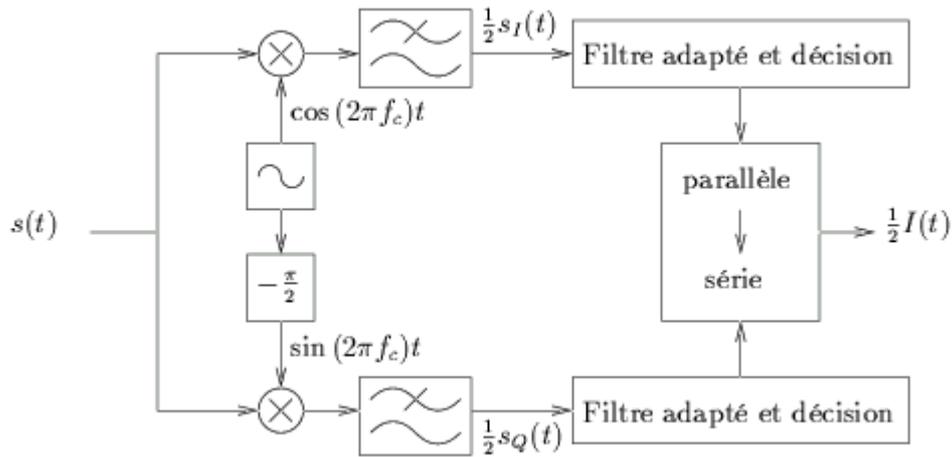


Figure III.10: Démodulateur QAM.

La réception d'un signal MAQ fait appel à une démodulation cohérente et par conséquent nécessite l'extraction d'une porteuse synchronisée en phase et en fréquence avec la porteuse à l'émission. Le signal reçu est démodulé dans deux branches parallèles, sur l'une avec la porteuse en phase et sur l'autre avec la porteuse en quadrature. Les signaux démodulés sont convertis par deux CAN, puis une logique de décodage détermine les symboles et régénère le train de bits reçus. Le synoptique du démodulateur MAQ-M est très voisin de celui proposé pour la démodulation MDP.

Les circuits de modulation et de démodulation QAM sont évidemment assez complexes. Pour l'émission, par exemple, l'équation à réaliser est celle-ci :

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t) \quad \text{III.4}$$

Les modulations précédentes ne constituent pas une solution satisfaisante pour utiliser efficacement l'énergie émise lorsque le nombre de points M est grand. En effet, dans la **MDA** les points de la constellation sont sur une droite, et dans la **MDP** les points sont sur un cercle. Or, la probabilité d'erreurs est fonction de la distance minimale entre les points de la constellation, et la meilleure modulation est celle qui maximise cette distance pour une puissance moyenne donnée. Un choix plus rationnel est alors une modulation qui répartit les points uniformément dans le plan.

Pour ce faire, on écrit le signal modulé $s(t)$ sous la forme suivante :

$$S(t) = a(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \Phi_0) - b(t) \sin(\omega_0 t + \Phi_0) \quad \text{III.5}$$

Où les deux signaux $a(t)$ et $b(t)$ ont pour expression :

$$a(t) = \sum a_k g(t - KT)$$

$$a(t)=\sum a_k G(t-kT) \text{ et } b(t)=\sum b_k G(t-kT) \quad III.6$$

Le signal modulé $s(t)$ est donc la somme de deux porteuses en quadrature, modulées en amplitude par les deux signaux $a(t)$ et $b(t)$.

On considère généralement que les symboles a_k et b_k prennent respectivement leurs valeurs dans les mêmes alphabets à M éléments donnant ainsi naissance à une modulation possédant $E=M^2$ états. Chaque état est donc représenté par un couple (a_k, b_k) ou ce qui revient au même par un symbole complexe $c_k=a_k+jb_k$. Dans le cas particulier mais très fréquent où M peut s'écrire $M=2^n$, alors les a_k représentent un mot de n bits et les b_k représentent aussi un mot de n bits. Le symbole complexe $c_k=a_k+jb_k$ peut par conséquent représenter un mot de $2n$ bits. L'intérêt de cette configuration est que le signal $c(t)$ est alors obtenu par une combinaison de deux porteuses en quadrature modulées en amplitude par des symboles a_k et b_k indépendants. Cette modulation prend naturellement le nom de modulation d'amplitude en quadrature (MAQ) et si sa constellation comporte E états, on la note MAQ- E .

Par exemple, la MAQ-16 est construite à partir de symboles a_k et b_k qui prennent leurs valeurs dans l'alphabet $\{\pm d, \pm 3d\}$ où d est une constante donnée. La MAQ-16 a été souvent utilisée, notamment pour la transmission sur ligne téléphonique (à 9600bit/s) et pour les faisceaux hertziens à grande capacité (140 Mbit/s) développés dans les années 1980. Plus généralement lorsque les symboles a_k et b_k prennent leurs valeurs dans l'alphabet $\{\pm d, \pm 3d, \pm 5d, \dots, \pm(M-1)d\}$ avec $M=2^n$, on obtient une modulation à 2^{2n} états et une constellation avec un contour carré dont font partie la MAQ-4, la MAQ-16, la MAQ-64 et la MAQ-256.

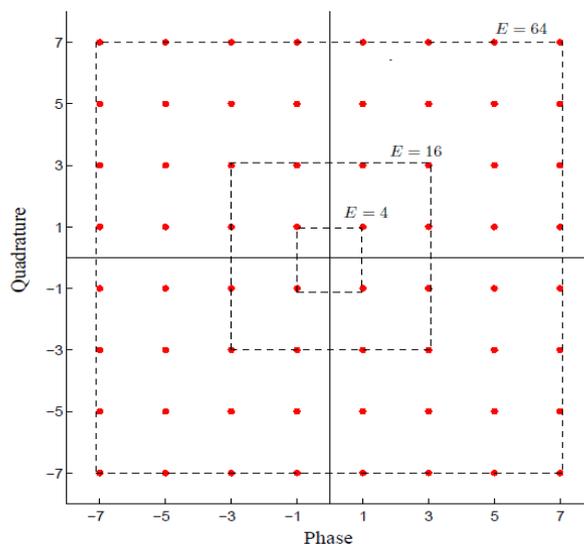


Figure III.11 : Constellation pour la modulation MAQ- E

Lorsque le signal (t) est obtenu par une combinaison de deux porteuses en quadrature modulées en amplitude par des symboles a_k et b_k indépendants, cela simplifie le modulateur et le démodulateur.

La réception d'un signal MAQ fait appel à une démodulation cohérente et par conséquent nécessite l'extraction d'une porteuse synchronisée en phase et en fréquence avec la porteuse à l'émission. Le signal reçu est démodulé dans deux branches parallèles, sur l'une avec la porteuse en phase et sur l'autre avec la porteuse en quadrature. Les signaux démodulés sont convertis par deux convertisseurs analogiques numériques (CAN), puis une logique de décodage détermine les symboles et régénère le train de bits reçus.

III.4 Formes du modulateurs QAM

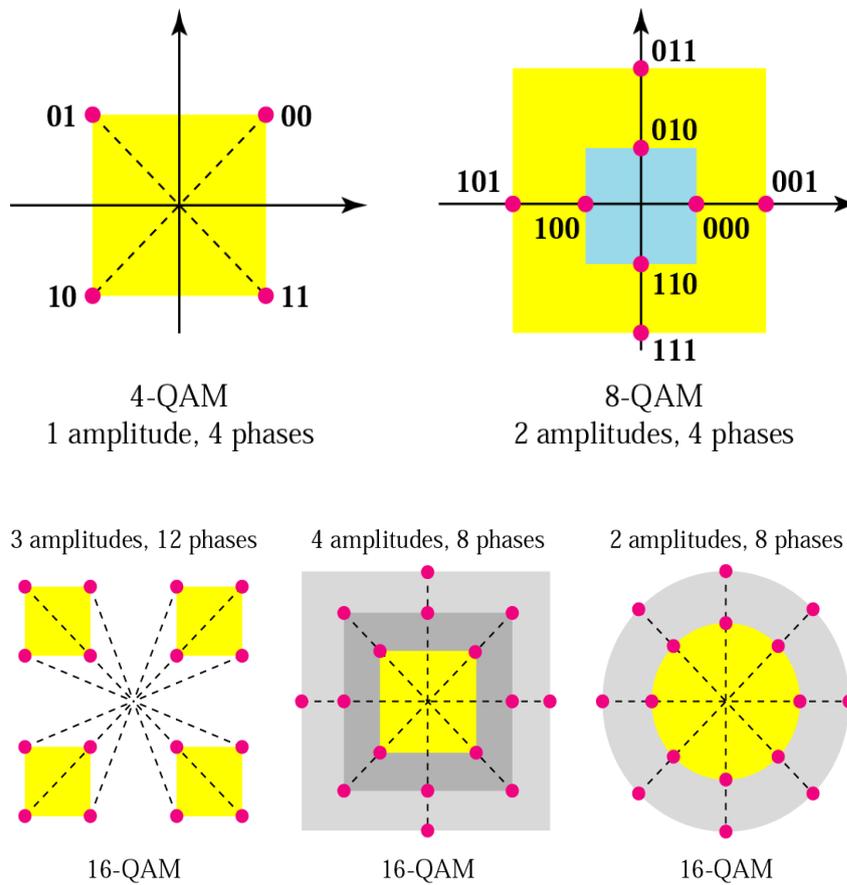


Figure III.12 : Modulation d'amplitude et de phase à plusieurs niveaux (M-aire)

Les touches d'amplitude et de déphasage peuvent être combinées pour transmettre plusieurs bits par symbole.

- ✓ Souvent appelées linéaires, elles nécessitent une amplification linéaire.
- ✓ Plus efficace en bande passante, mais plus sensible au bruit.

Pour $M = 4$, 16QAM a la plus grande distance entre les points, mais nécessite une amplification très linéaire. 16PSK a des exigences de linéarité moins strictes, mais a moins d'espacement entre les points de constellation, et est donc plus affecté par le bruit.

III.5 Modulation d'amplitude sur deux porteuses en quadratures (MAQ)

La MDA et la MDP ne constituent pas une solution satisfaisante pour utiliser efficacement l'énergie émise lorsque le nombre de points M est grand. En effet, dans la MDA les points de la constellation sont sur une droite, et dans la MDP les points sont sur un cercle. Or, la probabilité d'erreur est fonction de la distance minimale entre les points de la constellation, et la meilleure modulation est celle qui maximise cette distance pour une puissance moyenne donnée. Un choix plus rationnel est alors une modulation qui répartit les points uniformément dans le plan.[8]

Le signal modulé $m(t)$ est donc la somme de deux porteuses en quadrature, modulées en amplitude par les deux signaux $a(t)$ et $b(t)$.

III.5.1 Les constellations MAQ-M

Les symboles a_k et b_k prennent respectivement leurs valeurs dans deux alphabets à M éléments (A_1, A_2, \dots, A_M) et (B_1, B_2, \dots, B_M) donnant ainsi naissance à une modulation possédant un nombre.[8]

$E = M^2$ états. Chaque état est donc représenté par un couple (a_k, b_k) ou ce qui revient au même par un symbole complexe $c_k = a_k + j b_k$.

Dans le cas particulier mais très fréquent où M peut s'écrire $M = 2^n$, alors les a_k représentent un mot de n bits et les b_k représentent aussi un mot de n bits.

Le symbole complexe $c_k = a_k + j b_k$ peut par conséquent représenter un mot de $2n$ bits. L'intérêt de cette configuration est que le signal $m(t)$ est alors obtenu par une combinaison de deux porteuses en quadrature modulées en amplitude par des symboles a_k et b_k indépendants. De plus, les symboles a_k et b_k prennent très souvent leurs valeurs dans un même alphabet à M éléments.[8]

Par exemple, la MAQ-16 est construite à partir de symboles a_k et b_k qui prennent leurs valeurs dans l'alphabet $\{\pm d, \pm 3d\}$ où d est une constante donnée. Une représentation de la constellation de cette modulation est donnée figure III.13. La MAQ-16 a été souvent utilisée, notamment pour la transmission sur ligne téléphonique du RTC (à 9600 bit/s) et pour les faisceaux hertziens à grande capacité (140 Mbits/s) développés dans les années 1980.

Plus généralement lorsque les symboles a_k et b_k prennent leurs valeurs dans l'alphabet $\{d, 3d, 5d, \dots, (M-1)d\}$ avec $M = 2^{2n}$, on obtient une modulation à 2^{2n} états et une constellation avec un contour carré dont font partie la MAQ-4, la MAQ-16, la MAQ-64 et la MAQ-256.

Figure III.13. La constellation de la MAQ-16 et de la MAQ-64.[8]

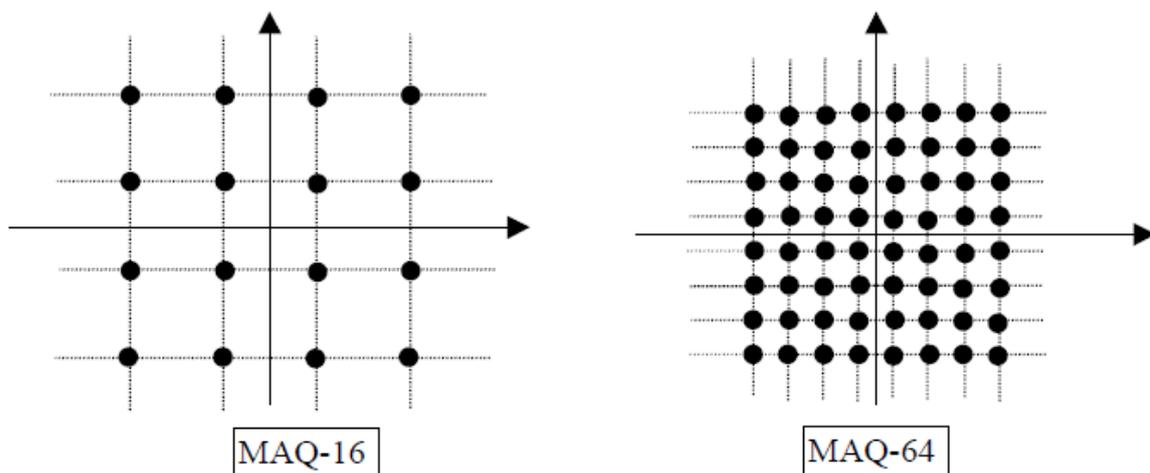


Figure III.13: Constellations MAQ-16 et MAQ-64

II.5.2 Efficacité spectrale

Pour une même rapidité de modulation $R = \frac{1}{T}$, le débit binaire $D = \frac{1}{Tb}$ de la MAQ-M est Multiplié par $n \log_2 M$ par rapport celui de la MAQ-2. Autrement dit, pour une largeur de bande B donnée, l'efficacité spectrale est multiplié par $n \log_2 M$. [9]

| n | M=2 ⁿ | Modulation | Débit Binaire : D | Efficacité Spectrale : η |
|---|------------------|------------|-------------------|--------------------------|
| 1 | 2 | MAQ-2 | D | η |
| 2 | 4 | MAQ-4 | 2.D | 2.η |
| 4 | 16 | MAQ-16 | 4.D | 4.η |
| 6 | 64 | MAQ-64 | 6.D | 6.η |
| 8 | 256 | MAQ-256 | 8.D | 8.η |

Tableau III.2

Le tableau ci-dessus montre le gain obtenu sur le débit binaire et sur l'efficacité spectrale pour diverses modulations MAQ-M, ceci pour une même rapidité de modulation. L'intérêt d'augmenter M, même au prix d'une complexité accrue, est évident.[9]

II.5.3 Probabilité d'erreur M-QAM

$$P_{be,MQAM} = 4 \left(\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M \log_2 M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{2E_{min}}{N_0}} \right) = 4 \left(\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M \log_2 M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3E_{avg}}{(M-1)N_0}} \right) = 2 \left(\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M \log_2 M}} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M E_b}{2(M-1)N_0}} \right)$$

III.7

| | | 4QAM | 8QAM | 16QAM | 32QAM | 64QAM | 128QAM | 256QAM | 512QAM | 1024QAM |
|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| k, bits/ symbol = | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| M signal levels = | | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 | 1024 |
| E _b /N ₀ , dB | E _b /N ₀ | Probability of Bit Error: | | P _{be,MQAM} | | | | | | |
| 0 | 1.0000 | 0.0786 | 0.1107 | 0.1392 | 0.1603 | 0.1730 | 0.1782 | 0.1779 | 0.1738 | 0.1674 |
| 2 | 1.5849 | 0.0375 | 0.0661 | 0.0976 | 0.1255 | 0.1461 | 0.1585 | 0.1639 | 0.1640 | 0.1607 |
| 4 | 2.5119 | 0.0125 | 0.0312 | 0.0586 | 0.0890 | 0.1158 | 0.1352 | 0.1469 | 0.1520 | 0.1523 |
| 6 | 3.9811 | 0.0024 | 0.0102 | 0.0279 | 0.0544 | 0.0835 | 0.1087 | 0.1267 | 0.1373 | 0.1419 |
| 7 | 5.0119 | 7.73E-04 | 0.0048 | 0.0170 | 0.0393 | 0.0675 | 0.0945 | 0.1154 | 0.1289 | 0.1359 |
| 8 | 6.3096 | 1.91E-04 | 0.0019 | 0.0092 | 0.0265 | 0.0523 | 0.0800 | 0.1033 | 0.1197 | 0.1292 |
| 9 | 7.9433 | 3.36E-05 | 6.01E-04 | 0.0044 | 0.0164 | 0.0385 | 0.0656 | 0.0908 | 0.1098 | 0.1219 |
| 10 | 10.0000 | 3.87E-06 | 1.45E-04 | 0.0018 | 0.0092 | 0.0265 | 0.0517 | 0.0778 | 0.0993 | 0.1140 |
| 11 | 12.5893 | 2.61E-07 | 2.47E-05 | 5.65E-04 | 0.0045 | 0.0169 | 0.0388 | 0.0648 | 0.0881 | 0.1053 |
| 12 | 15.8489 | 9.01E-09 | 2.74E-06 | 1.39E-04 | 0.0019 | 0.0097 | 0.0275 | 0.0520 | 0.0765 | 0.0960 |
| 13 | 19.9526 | 1.33E-10 | 1.76E-07 | 2.42E-05 | 6.22E-04 | 0.0049 | 0.0181 | 0.0400 | 0.0647 | 0.0861 |
| 14 | 25.1189 | 6.81E-13 | 5.71E-09 | 2.76E-06 | 1.61E-04 | 0.0022 | 0.0108 | 0.0291 | 0.0530 | 0.0757 |
| 15 | 31.6228 | 8.88E-16 | 7.82E-11 | 1.84E-07 | 3.02E-05 | 7.72E-04 | 0.0058 | 0.0198 | 0.0417 | 0.0650 |
| 16 | 39.8107 | 0.0E+00 | 3.62E-13 | 6.25E-09 | 3.75E-06 | 2.17E-04 | 0.0027 | 0.0124 | 0.0312 | 0.0542 |
| 17 | 50.1187 | 0.0E+00 | 4.31E-16 | 9.07E-11 | 2.78E-07 | 4.50E-05 | 1.04E-03 | 0.0070 | 0.0220 | 0.0437 |
| 18 | 63.0957 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 4.52E-13 | 1.08E-08 | 6.35E-06 | 3.22E-04 | 0.0035 | 0.0144 | 0.0337 |
| 19 | 79.4328 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 5.83E-16 | 1.86E-10 | 5.54E-07 | 7.55E-05 | 0.0015 | 0.0086 | 0.0246 |
| 20 | 100.000 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 1.15E-12 | 2.63E-08 | 1.24E-05 | 5.05E-04 | 0.0046 | 0.0168 |
| 21 | 125.893 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 1.97E-15 | 5.85E-10 | 1.32E-06 | 1.35E-04 | 0.0021 | 0.0106 |
| 22 | 158.489 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 4.97E-12 | 7.99E-08 | 2.63E-05 | 8.08E-04 | 0.0060 |
| 23 | 199.526 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 1.27E-14 | 2.41E-09 | 3.44E-06 | 2.48E-04 | 0.0030 |
| 24 | 251.189 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 3.02E-11 | 2.72E-07 | 5.72E-05 | 0.0013 |
| 25 | 316.228 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 1.25E-13 | 1.14E-08 | 9.26E-06 | 4.50E-04 |

Tableau III.4[9]

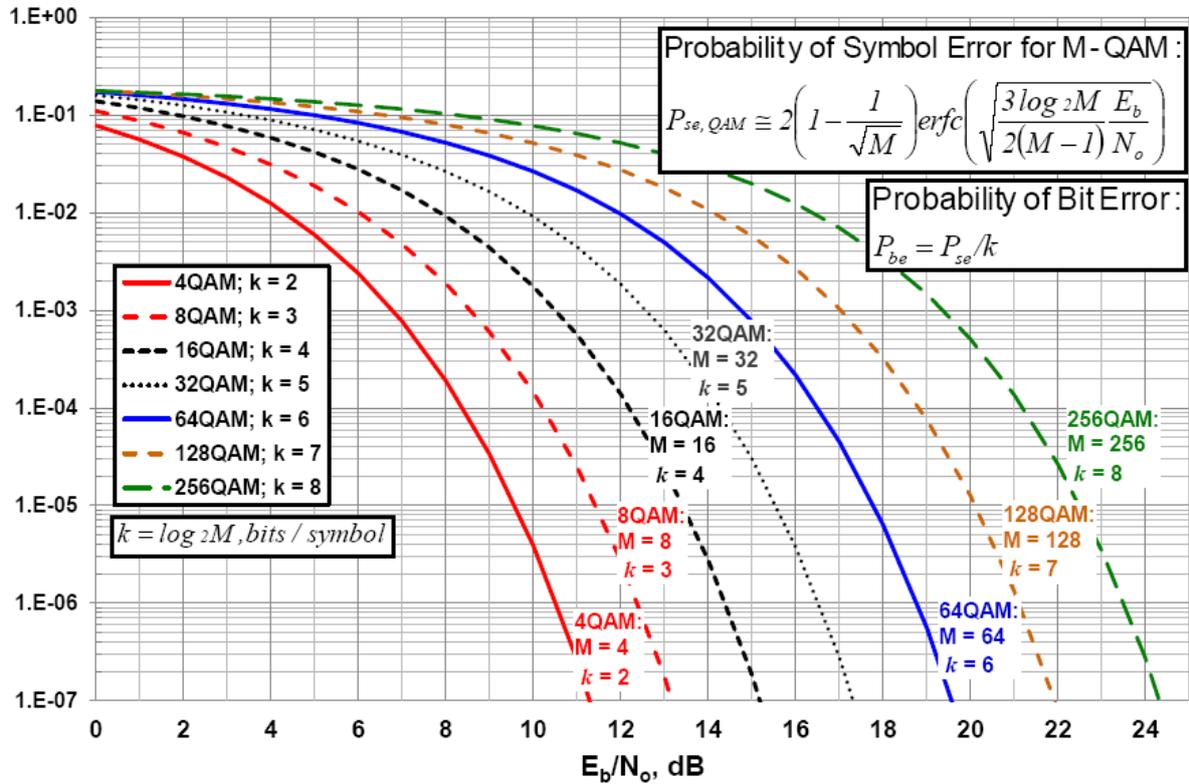


Figure III.14 : Représentation des probabilité d'erreur de symbole pour M-QAM

II.5.4 Densité spectrale de puissance

La densité spectrale de puissance est la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation. La densité spectrale de puissance est quadratique c'est-à-dire qu'elle est indépendante de la phase du signal. De plus elle est toujours réelle et positive.[10]

$$P_{QAM}(f) = \frac{E_s}{2} \left[\left(\frac{\sin \pi(f-f_c)T_b}{\pi(f-f_c)T_b} \right)^2 + \left(\frac{\sin \pi(-f-f_c)T_s}{\pi(-f-f_c)T_s} \right)^2 \right] \quad \text{III.8}$$

III. Comparaison entre QAM, 16 PSK and APSK : diagramme de constellation

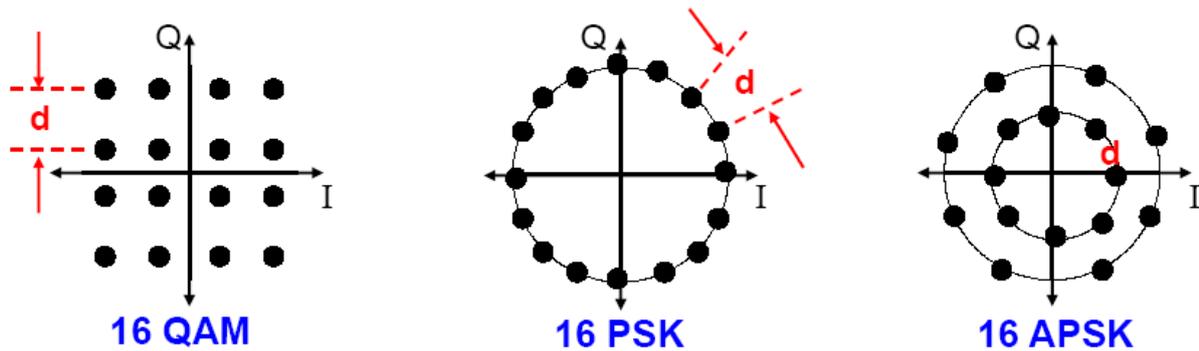


Figure III.15 : diagramme de constellation,(Comparaison entre QAM, 16 PSK and APSK)

1. La modulation 16-PSK et 16 APSK peuvent être combinés pour transmettre plusieurs bits/Symbol.
 - A. Toujours considéré comme une modulation linéaire, qui exige une amplification linéaire.
 - B. Large bande passante qui signifie d'être beaucoup affecté par le bruit.
2. Pour la modulation 16-QAM possède une large distance entre les points de constellation, mais exige une amplification linéaire. 16 PSK possède une distance petite entre les points dans le diagramme de constellation mais beaucoup affecté par le bruit.[11]

CHAPITRE IV

SIMULATION ET COMPARAISON DES RESULTAT

I. Introduction :

Ce chapitre propose une description de logiciel de simulation *Optisystem*, destinée à faciliter la connaissance et la maîtrise du simulateur par les futurs utilisateurs. Nous aborderons ensuite à la liaison DPSK et QAM, puis on va définir les éléments qui serviront de critères de qualité pour évaluer la qualité de transmission de notre liaison, on étudiera l'effet de variation des paramètres de la liaison sur la qualité de transmission, la puissance émise et le débit, on y exposera ainsi les résultats obtenus avec des interprétations.

I.1 Présentation du logiciel de simulation

La conception et l'analyse des systèmes de communications, comprennent des dispositifs non-linéaires et des sources de bruit non gaussiennes qui sont très complexes et coûteuses en temps, il en résulte que ces tâches ne peuvent désormais être effectuées rapidement et efficacement qu'avec l'aide de nouveaux outils logiciel.

Dans notre travail nous avons opté pour un logiciel de simulation des systèmes de communications électrique et optique innovants qui conçoit, teste et optimise pratiquement n'importe quel type de liaison optique dans la couche physique d'un large éventail de réseaux de communication, il s'agit d'*Optisystem* qui est un simulateur basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communications électriques et optiques.

Sa vaste bibliothèque de composants actifs et passifs comprend des paramètres réalistes, ces capacités peuvent être étendu facilement avec l'ajout des composants et peuvent être reliés à un large éventail d'outils figure IV.1, une interface complète d'utilisateur graphique (GUI) contrôle la disposition des composants. Les modèles et ces présentations graphiques figure IV.2.

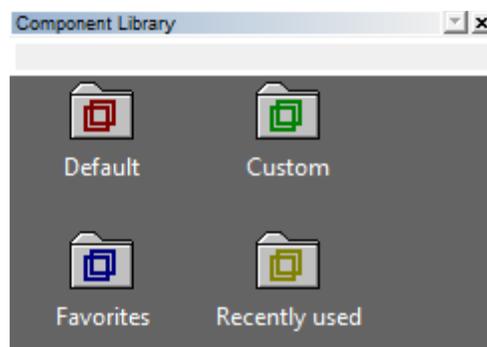


Figure IV.1 : Bibliothèque des composants.

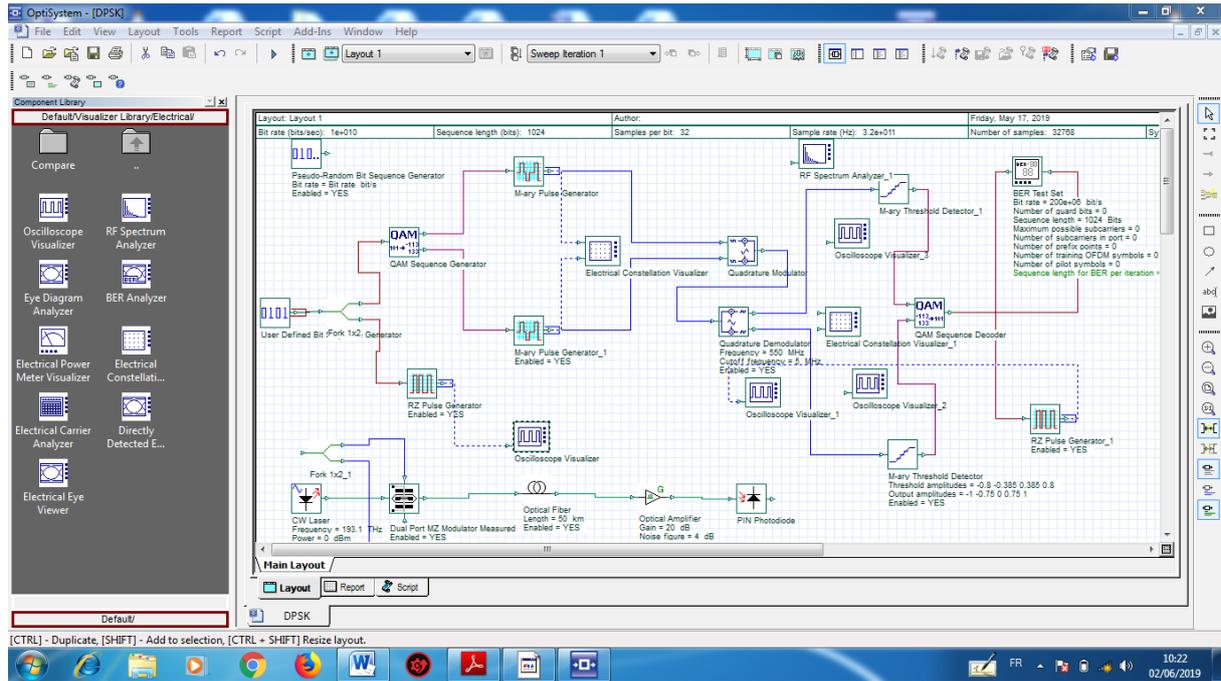


Figure IV.2 : Interface d'utilisateur graphique (GUI)

I.2 Applications d'Optisystem

Parmi les diverses applications d'Optisystem nous allons citer les plus utilisées :

- La conception du système de communication optique du composant au niveau de la couche physique.
- Le calcul du taux d'erreur binaire (BER) et le calcul du bilan de liaison.
- La conception des réseaux TDM/WDM et optiques passifs (PON).
- L'espace libre pour les systèmes optique (OSA).
- La conception d'anneau SONET/SDH.
- La conception d'émetteur de canal et d'amplificateur.

I.3 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem :

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la Bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- La bibliothèque des composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, il s'intègre aux équipements de test et de mesurer des différents fournisseurs.

- Les outils de visualisation avancée produisent le signal sonore, les diagrammes de l'œil, l'état de la polarisation, les schémas de constellation.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire de moniteurs au même port. L'état de l'art et le calcul de flux de données.

I.4 Avantage du logiciel OptiSystem

Les avantages du logiciel OptiSystem sont :

- Obtenir un aperçu de performances du système de transmission.
- Fournir un accès direct à des ensembles de données de caractérisation du système.
- Présentation virtuelle des options de conceptions.

II. Support de transmission

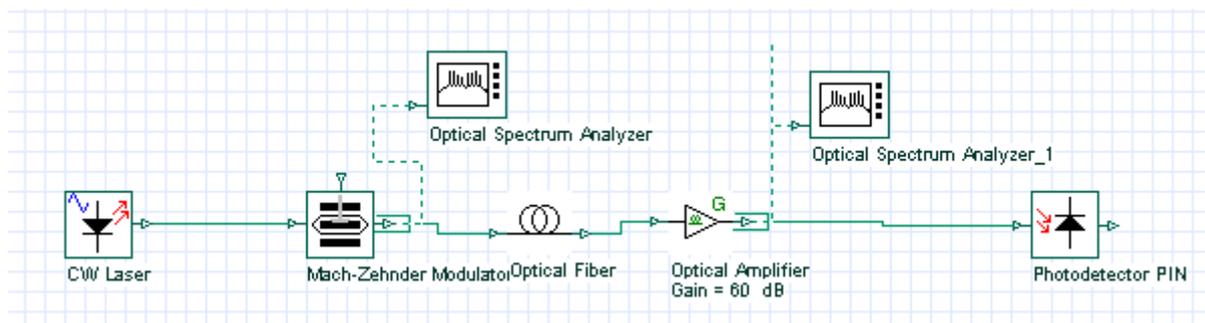


Figure IV.3 : support de transmission optique

La fibre optique est un élément principal dans les systèmes de communication optique ; c'est le canal de transmission des signaux lumineux porteurs de l'information et par suite les caractéristiques d'une fibre jouent des rôles importants dans la détermination du système tout entier.

II.1 la fibre optique

Une fibre optique est un guide d'onde diélectrique, en forme d'un cylindre plein de section circulaire de très petit diamètre a ; constitué par un matériau transparent comme le verre ou le quartz d'indice de réfraction n_1 ; c'est la couche cœur et elle est entourée par une couche d'indice $n_2 < n_1$ et de diamètre $b > a$ c'est la gaine (figure IV.4.a). La fibre peut être aussi encapsulée par une troisième couche, généralement d'un matériau élastique, qui protège la fibre (figure IV.4.b).

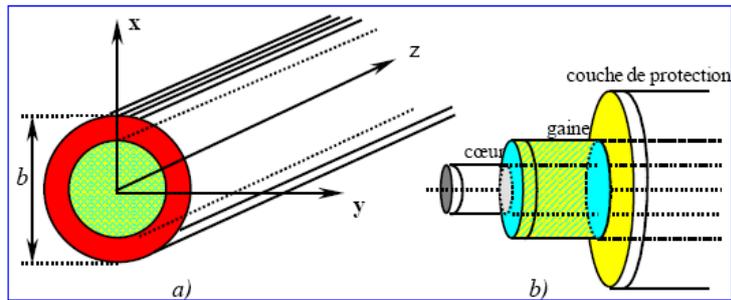


Fig. IV.4: Anatomie d'une fibre optique

Nous distinguerons deux grands types de fibres, les fibres multimodes (à saut ou à gradient d'indice) et les fibres monomodes.

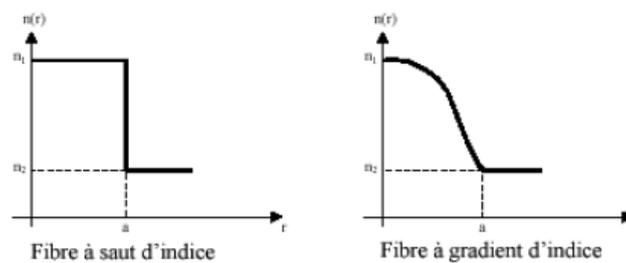


Figure IV.5 : Exemple de deux types de profil d'indice.

Les fibres multimodes sont des fibres utilisées pour des applications « bas de gamme » (courte distance), tandis que les fibres monomodes sont surtout utilisées pour des applications télécoms et donc sur de longues distances.

II.2 Diode électroluminescente (DEL)

C'est le composant le plus simple, qui réalise directement l'émission de photons par recombinaison des porteurs dans une hétérojonction polarisée en direct (figure IV.6). La puissance lumineuse émise est alors pratiquement proportionnelle au courant injecté, avec un rendement externe médiocre ; en particulier, seule une faible partie peut être couplée dans une fibre optique à cause de la forte divergence. Le spectre, typique de l'émission spontanée, est continu et assez large (d'où forte sensibilité à la dispersion chromatique).

Ce composant de performances limitées (notamment en rapidité) est cependant intéressant et très utilisé grâce à son faible coût, son bruit très bas, et son excellente fiabilité.

Figure IV.6. Diodes électroluminescentes Dans la structure représentée, une encoche pratiquée à la surface du composant a pour but d'améliorer le couplage dans une fibre optique, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une lentille.[12]

II.3 Diodes laser

Leur structure est beaucoup plus complexe (figure IV.6). D'une part, la lumière y est guidée dans la couche active, celle-ci ayant un indice de réfraction supérieur à celui des couches de confinement. La lumière sort par conséquent aux deux extrémités du guide

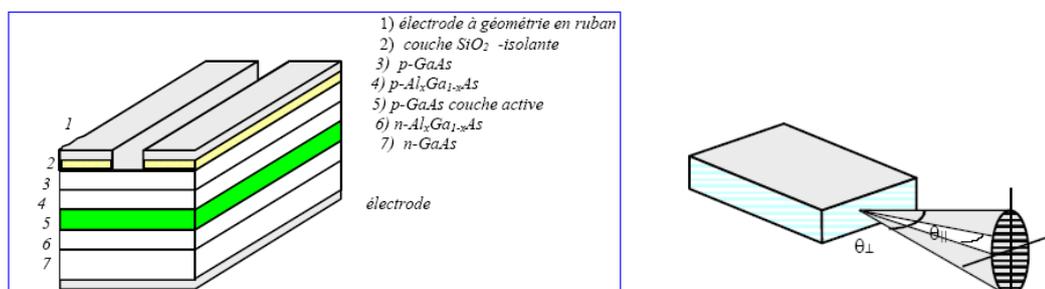


Figure IV.6 : Diode laser

. Cette structure est d'ailleurs utilisée dans les DEL à émission par la tranche, de rapidité et de rendement meilleurs que les DEL classiques, mais fonctionnant sur le même principe. Au contraire, la diode laser doit en plus remplir les deux fonctions de l'oscillateur optique qu'est tout laser [13]

II.4 Photodiode

Un détecteur optique est un dispositif qui fait transformer l'énergie optique en énergie électrique ou autrement dit-il convertit un signal optique en signal électrique. La tension à la sortie est proportionnelle à la puissance optique incidente ; c'est donc un détecteur d'enveloppe ou détecteur quadratique.

Le récepteur d'un système de communication optique doit comporter un détecteur optique. Tel détecteur doit avoir :

- . Une grande sensibilité à la longueur d'onde du signal incident.
- . Une grande bande passante (ou grande vitesse de réponse) et réponse en fréquence linéaire pour conserver la forme du signal d'entrée.
- . Un faible bruit additionnel donc haute fidélité de conversion.
- . Stabilité de caractéristique flux-courant, sans influence des conditions extérieures.
- . Haute capacité quantique.
- . Faibles dimensions pour la capacité de couplage avec la fibre.

Deux types de dispositifs à semi-conducteur répondent à ces conditions : les photo-diodes PIN et à avalanche (PDA).[14]

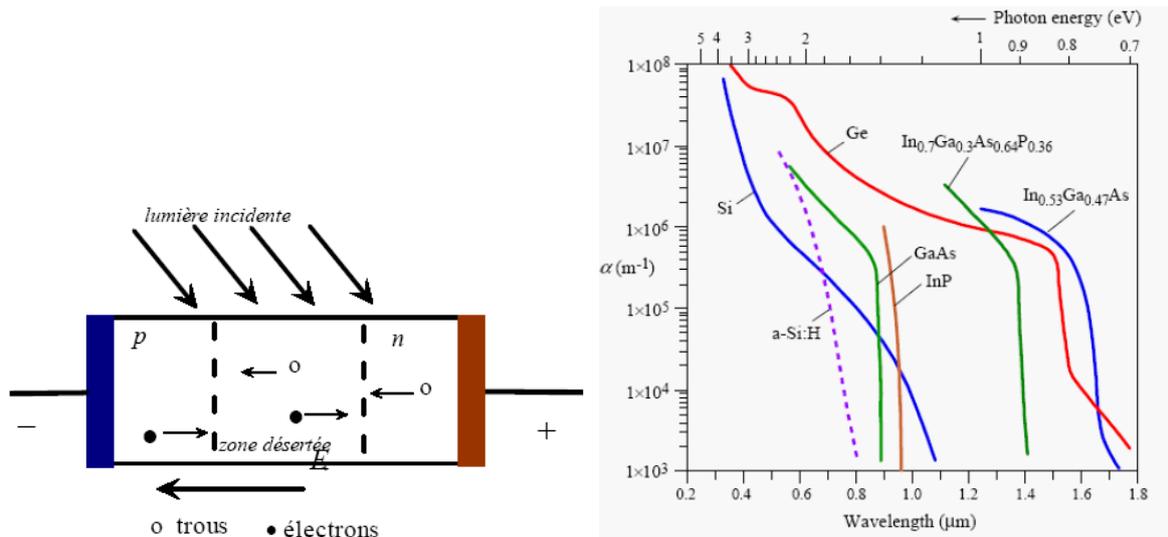


Figure IV.7: Jonction PN polarisée en inverse

II.5 Modulation de la lumière

La modulation électrooptique de la lumière se fait à l'aide des cristaux où l'effet électrooptique a lieu.

II.5.1 L'effet électrooptique

L'effet électrooptique a une large définition : c'est la variation des propriétés optiques du milieu (généralement anisotrope), en particulier l'indice de réfraction, sous l'action d'un champ électrique externe appliqué sur le cristal. Cet effet est linéaire (*effet Pockels*) si la variation de l'indice est proportionnelle à l'amplitude du champ, en outre, l'effet est non linéaire (*effet Kerr*) si la variation de l'indice est proportionnelle au carré du champ.

La propagation de la lumière dans un milieu anisotrope peut être décrite à l'aide de l'ellipsoïde des indices de réfraction. Suivant la théorie quantique des solides, l'indicatrice optique dépend de la répartition des charges dans le cristal. L'application du champ électrique détermine une redistribution des charges liées et une faible déformation du réseau ionique, ce

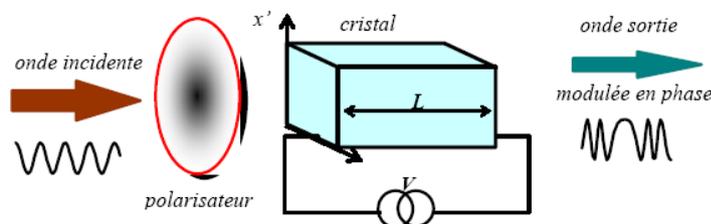


Figure IV.8: Modulation électrooptique de phase

qui entraîne une variation du tenseur de permittivité diélectrique et par suite l'indice de réfraction.[15]

II.6 L'amplificateur optique dopé à l'erbium

Les amplificateurs à fibre dopée ont été introduits dès 1964 et commercialisés au début des années 1990. Il s'agit de morceaux de fibres optiques de longueur variant de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres dans le cœur desquelles ont été ajoutés des ions de terre rare à une concentration de 0.1 % environ. Le dopant le plus utilisé est l'erbium qui permet d'obtenir du gain sur la fenêtre spectrale «C» qui couvre les longueurs d'onde de 1528 à 1563 nm. Lorsqu'un signal laser de longueur d'onde plus faible (980 ou 1480 nm) dit signal de pompe est envoyé dans la fibre, les dopants passent dans un état de plus haute énergie (approximativement 1.27 eV) dit excité. Le passage d'un photon dans la bande de gain stimule les ions excités à relâcher des photons de même longueur d'onde, même phase, même état de polarisation, et même directivité spatiale que le photon incident.[16]

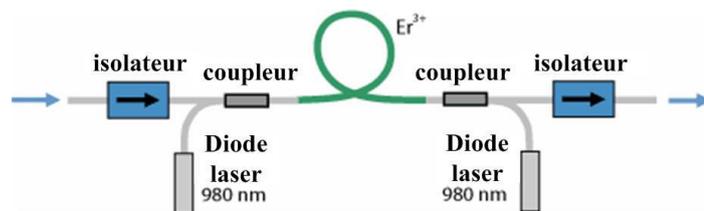


Figure IV.9 : structure de l'amplificateur à fibre optique dopé en erbium

Dans la partie émission : Un générateur de séquence de bits qui permet de Générer une séquence de bits définie par l'utilisateur. Un Générateur de séquence pour le codage (DPSK ou QAM) qui permet de Générer deux séquences de symboles M-aires parallèles à partir de signaux binaires à l'aide de la modulation DPSK ou QAM. Le générateur d'impulsions M-aire qui permet de Générer des impulsions à plusieurs niveaux en fonction de l'entrée du signal M-aire. [16]

III. Simulation pour la modulation DPSK

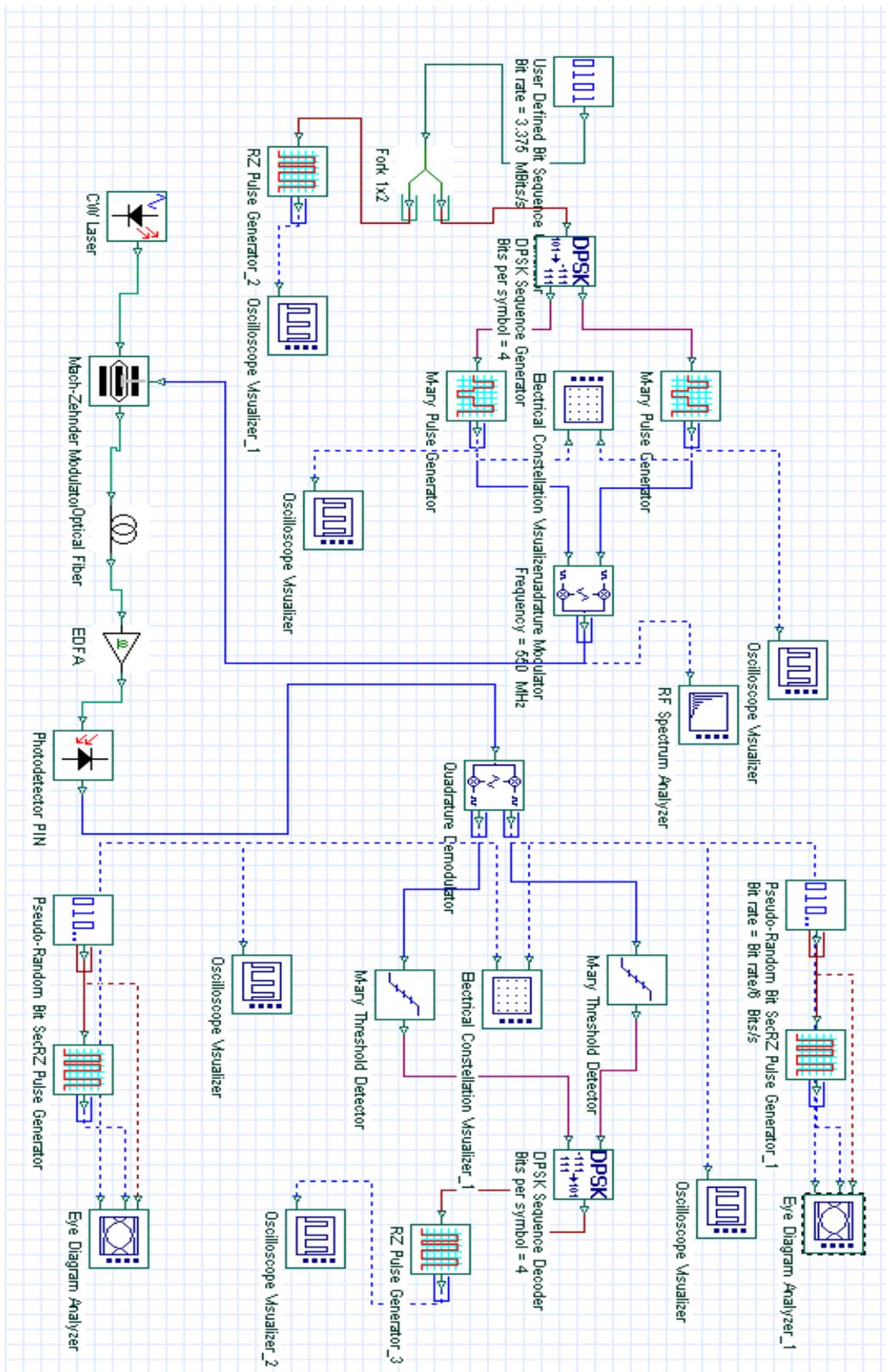


Figure IV.10 : Schéma d'un émetteur/récepteur à base d'un modulateur/démodulateur DPSK

III.1 Modulation DPSK (2bit/Symbol)

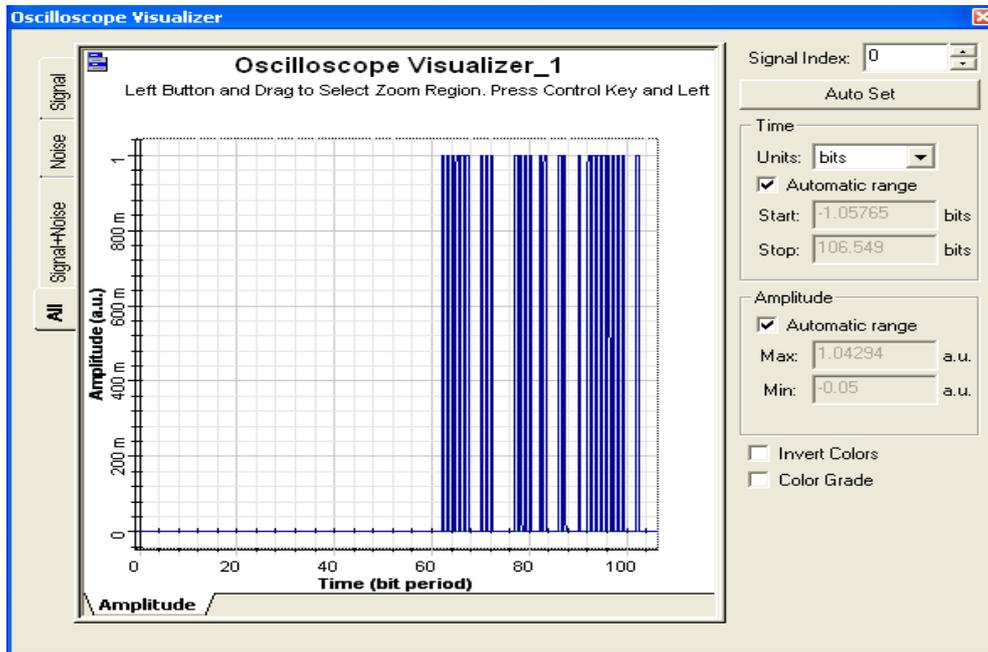


Figure IV.11 : Débit binaire à l'émission

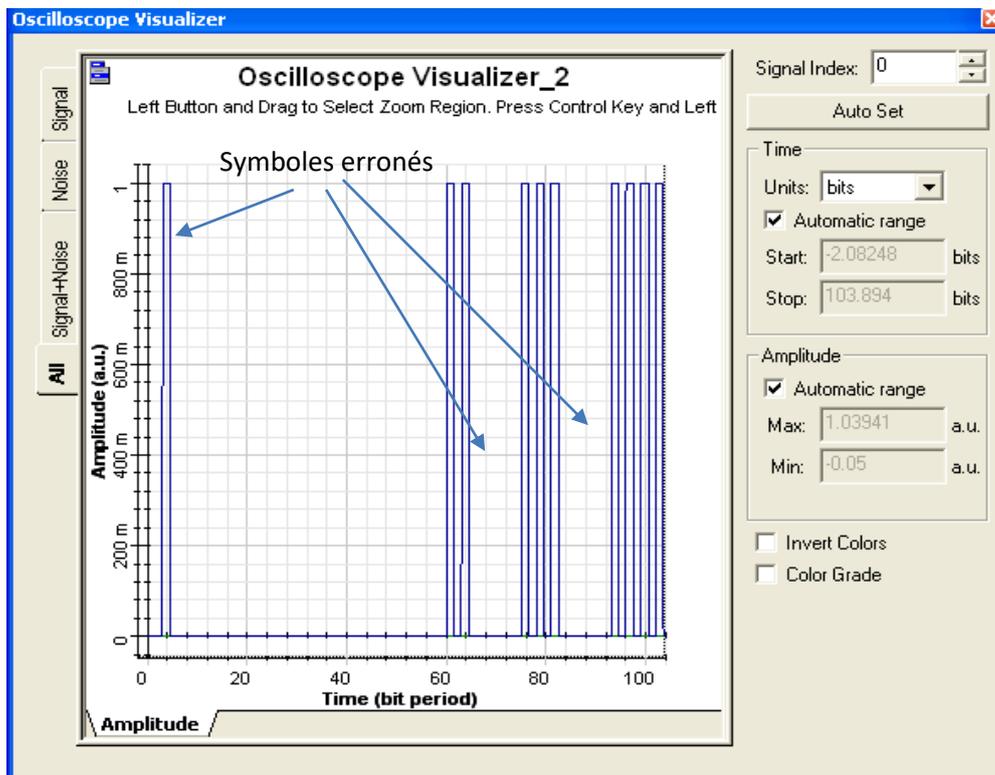


Figure IV.12 : Débit binaire à la réception

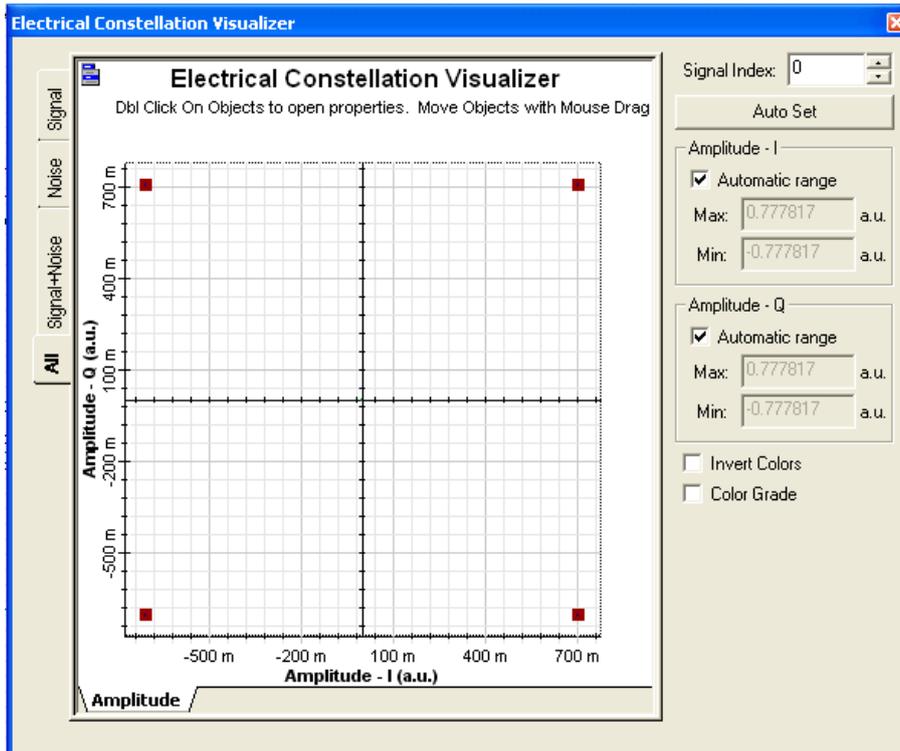


Figure IV.13 : Diagramme de Constellation après modulation

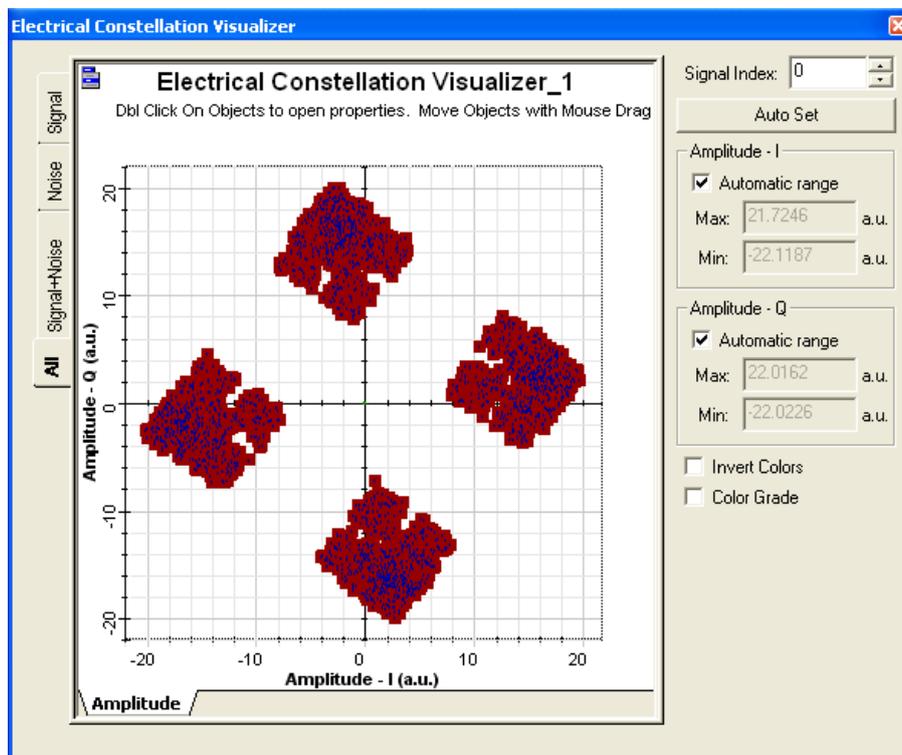


Figure IV.14 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite

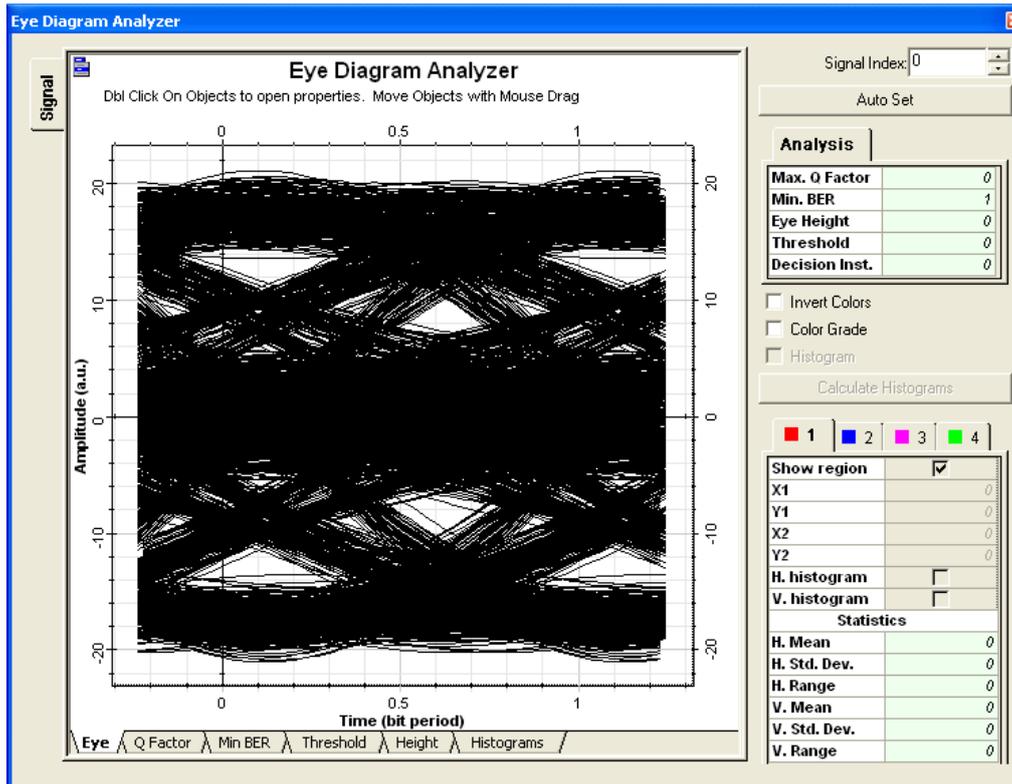


Figure IV.15 : Diagramme de L'œil à la réception

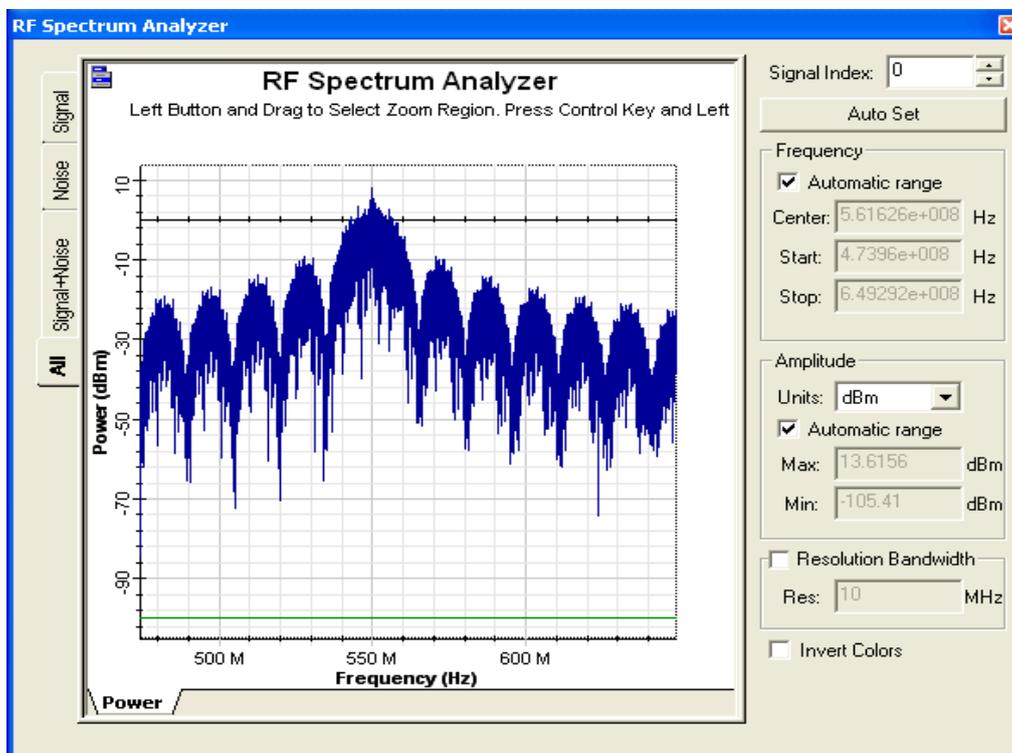


Figure IV.16: Densité Spectrale de Puissance

III.2 Modulation DPSK (4bits/Symbol)

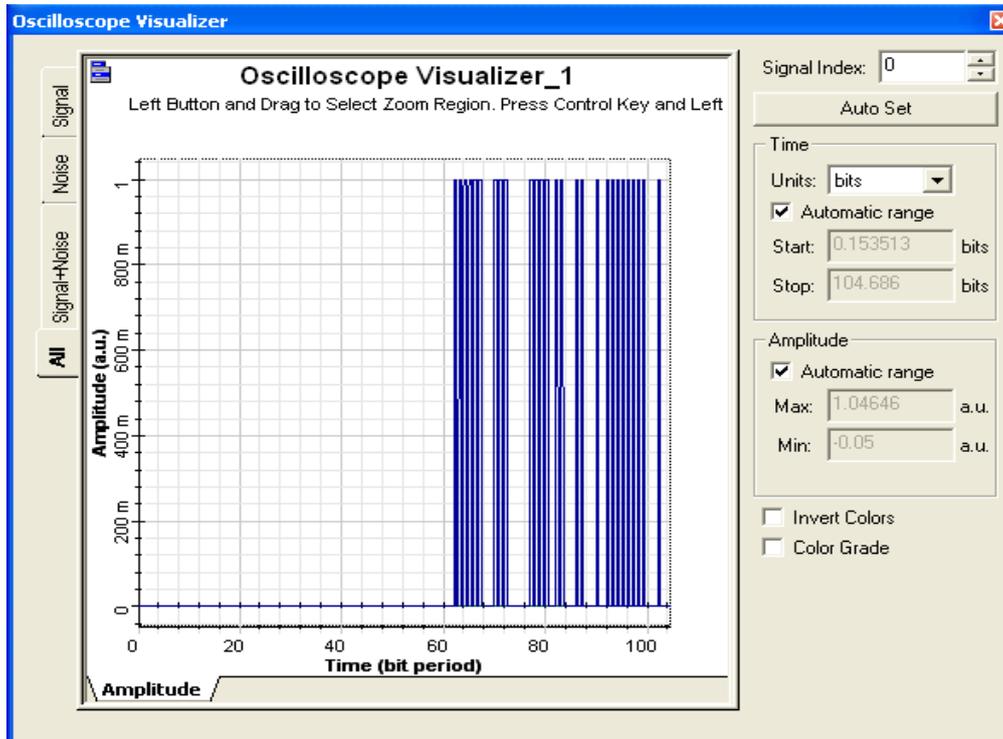


Figure IV.17 : Débit binaire à l'émission

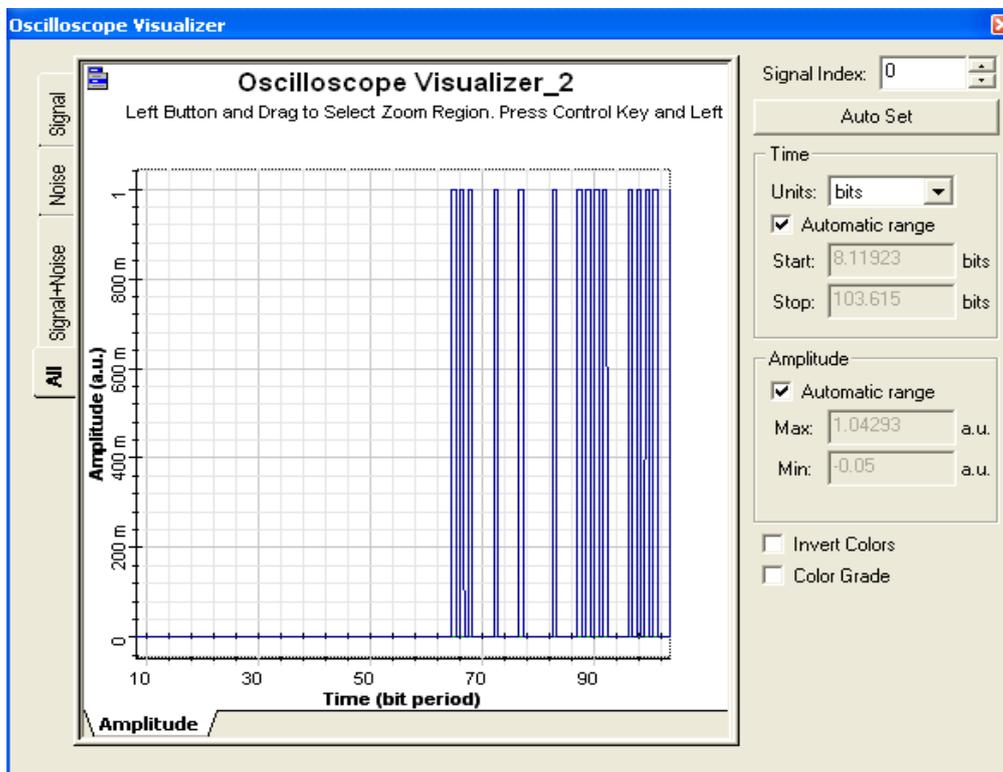


Figure IV.18 : Débit binaire à la réception

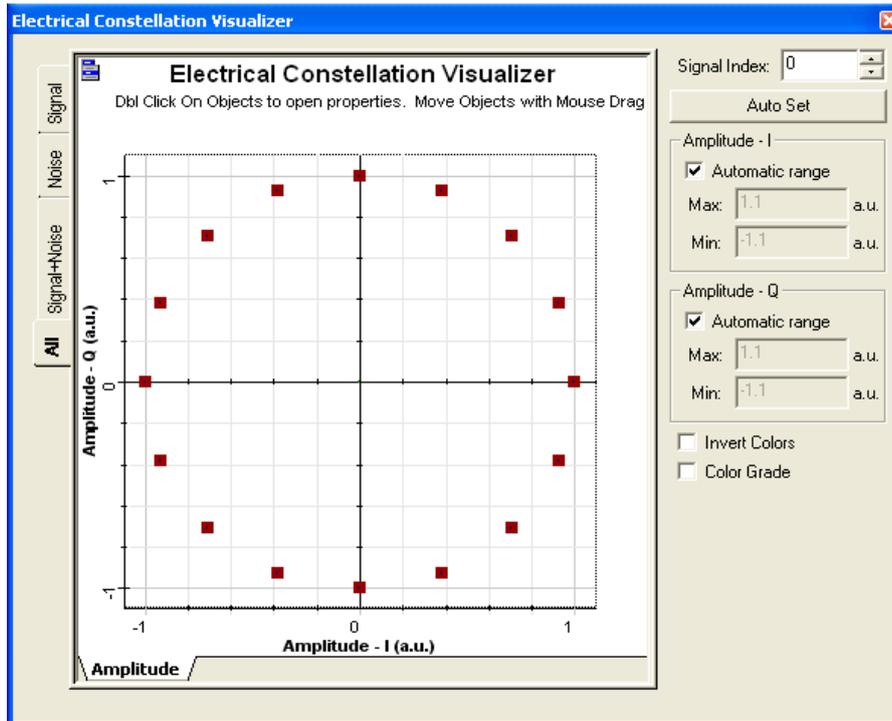


Figure IV.19 : Diagramme de Constellation après modulation

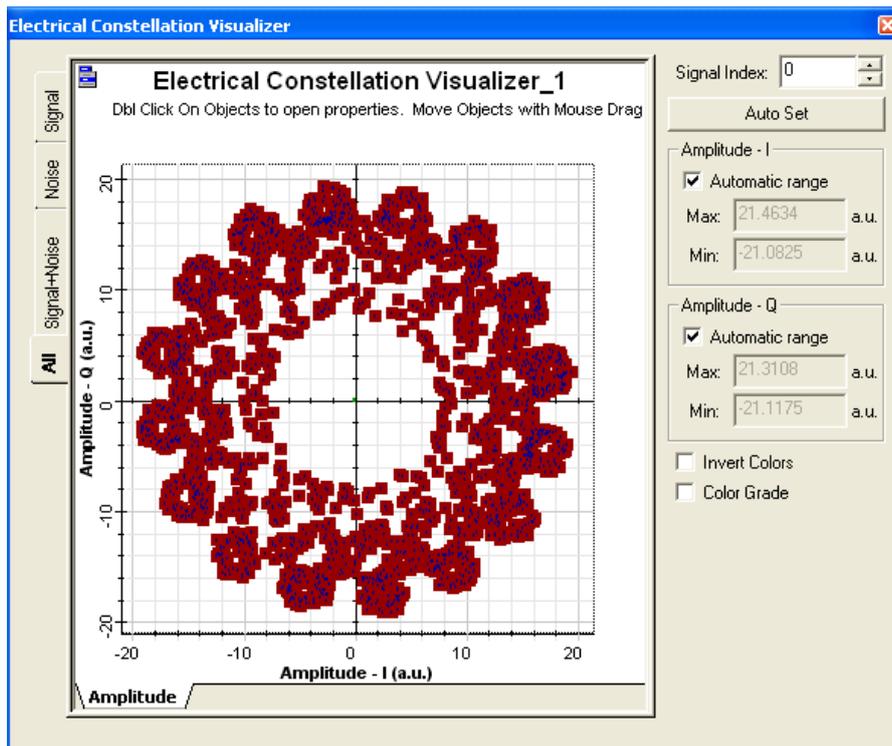


Figure IV.20 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite

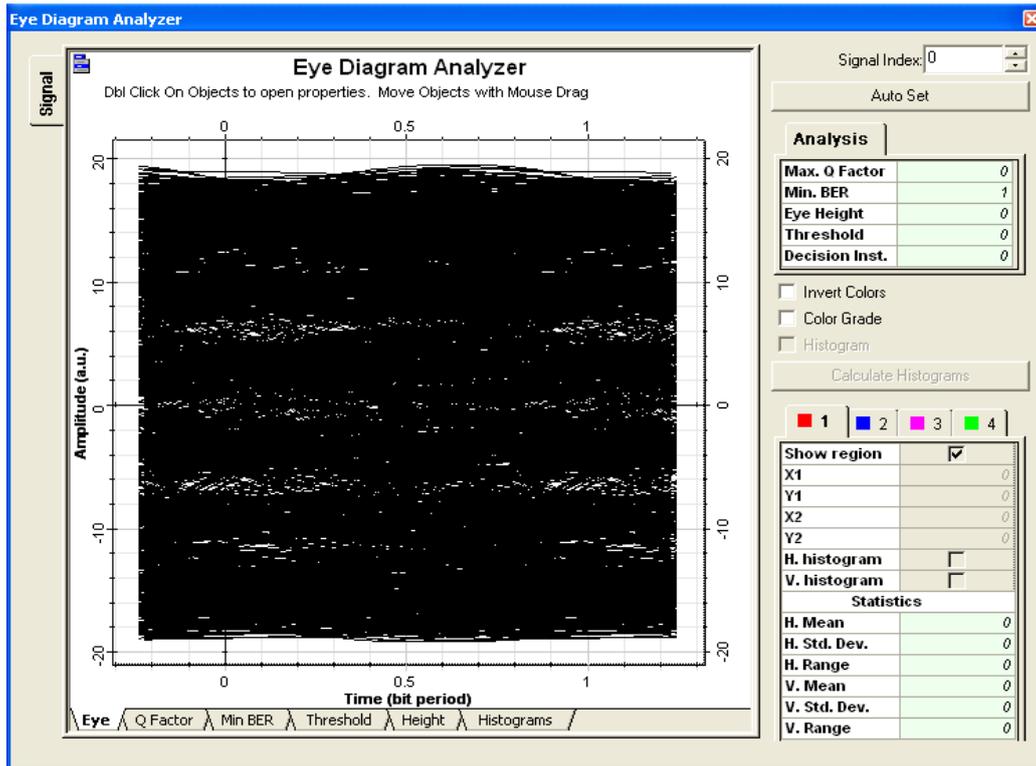


Figure IV.21 : Diagramme de L'œil à la réception

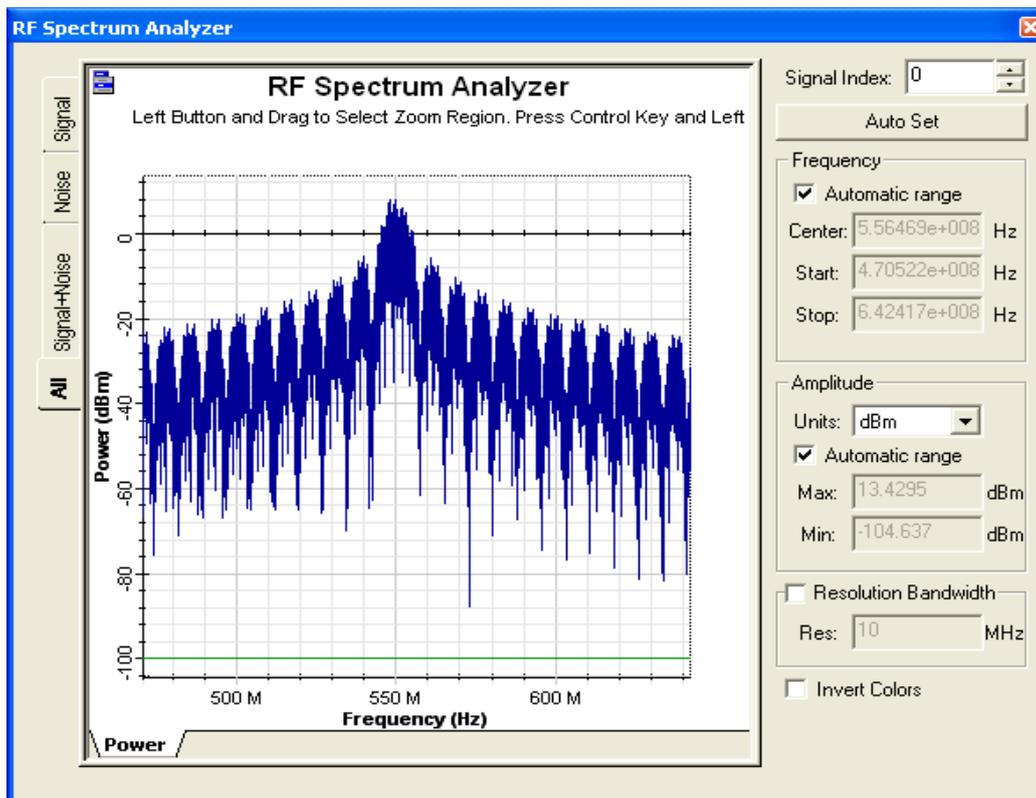


Figure IV.22: Densité Spectrale de Puissance

III.3 Modulation DPSK (6 bit/Symbol)

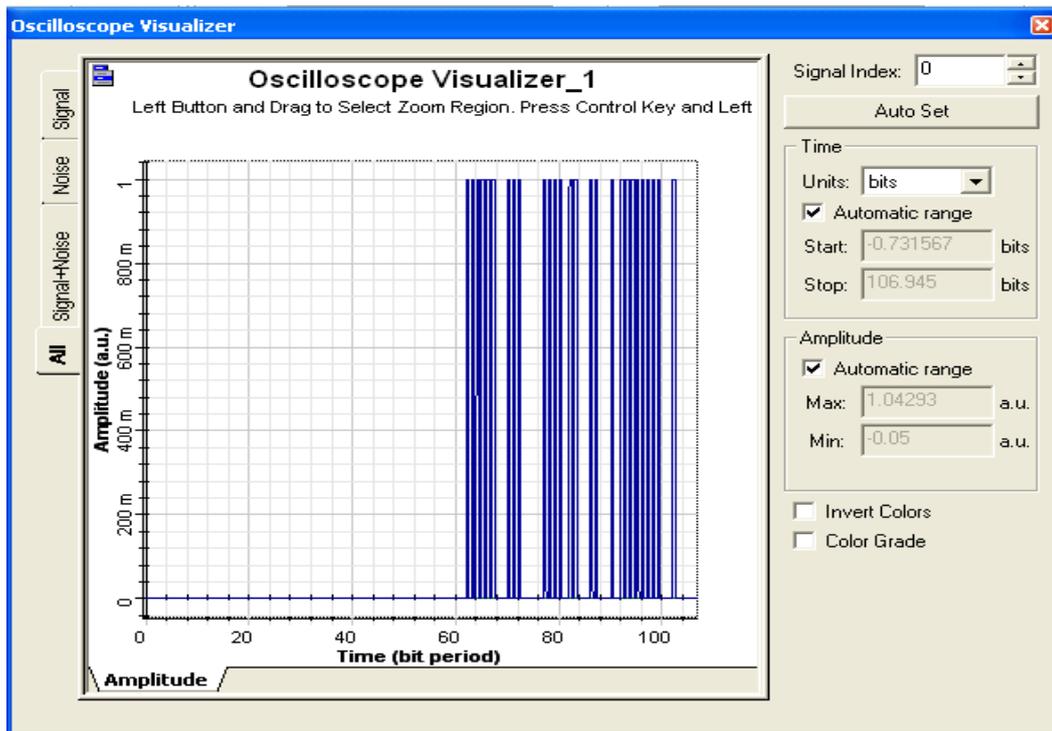


Figure IV.23 : Débit binaire à l'émission

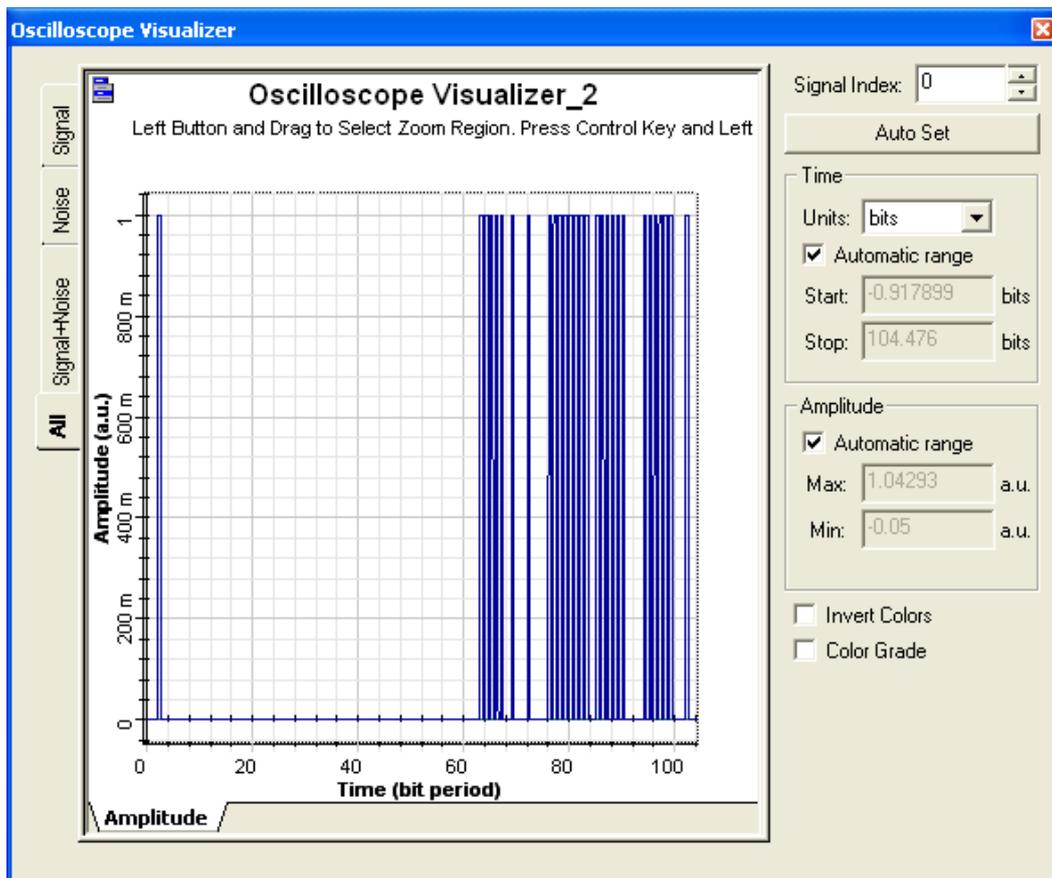


Figure IV.24 : Débit binaire à la réception

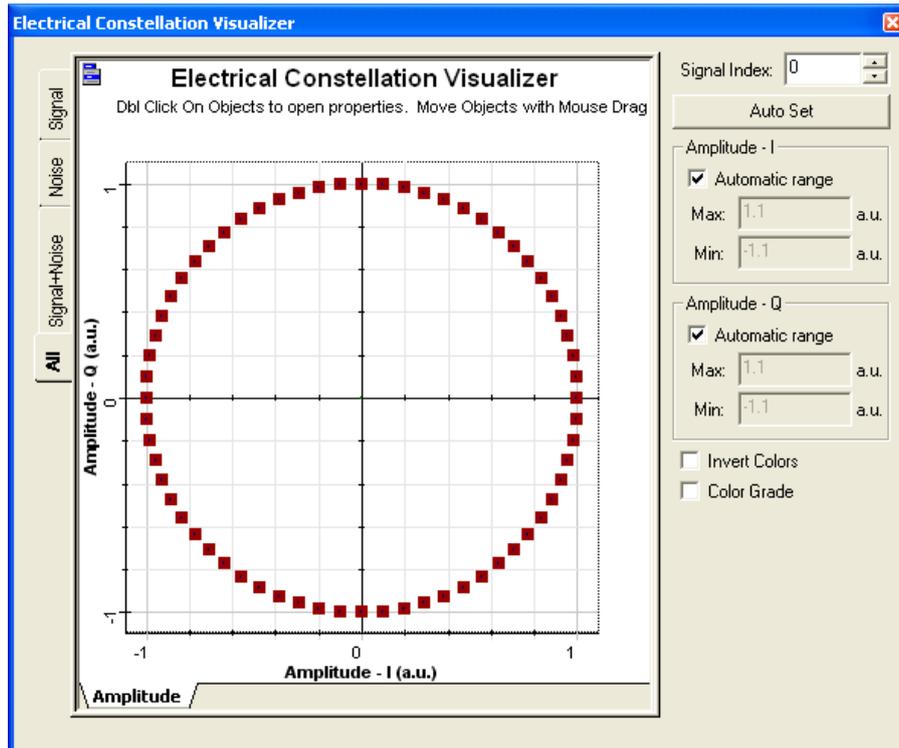


Figure IV.25 : Diagramme de Constellation après modulation

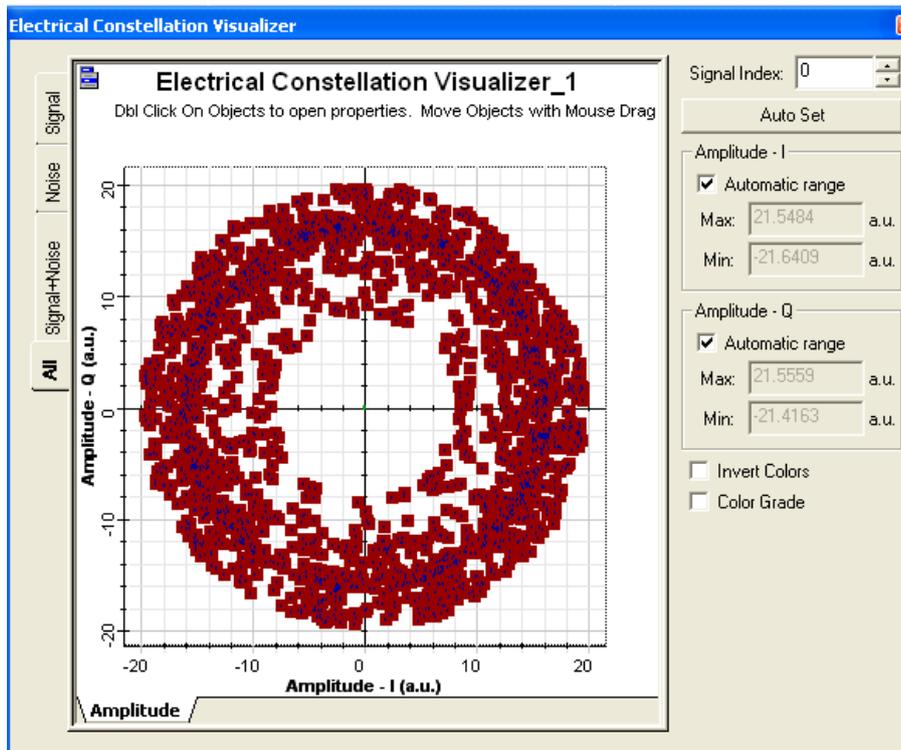


Figure IV.26 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite

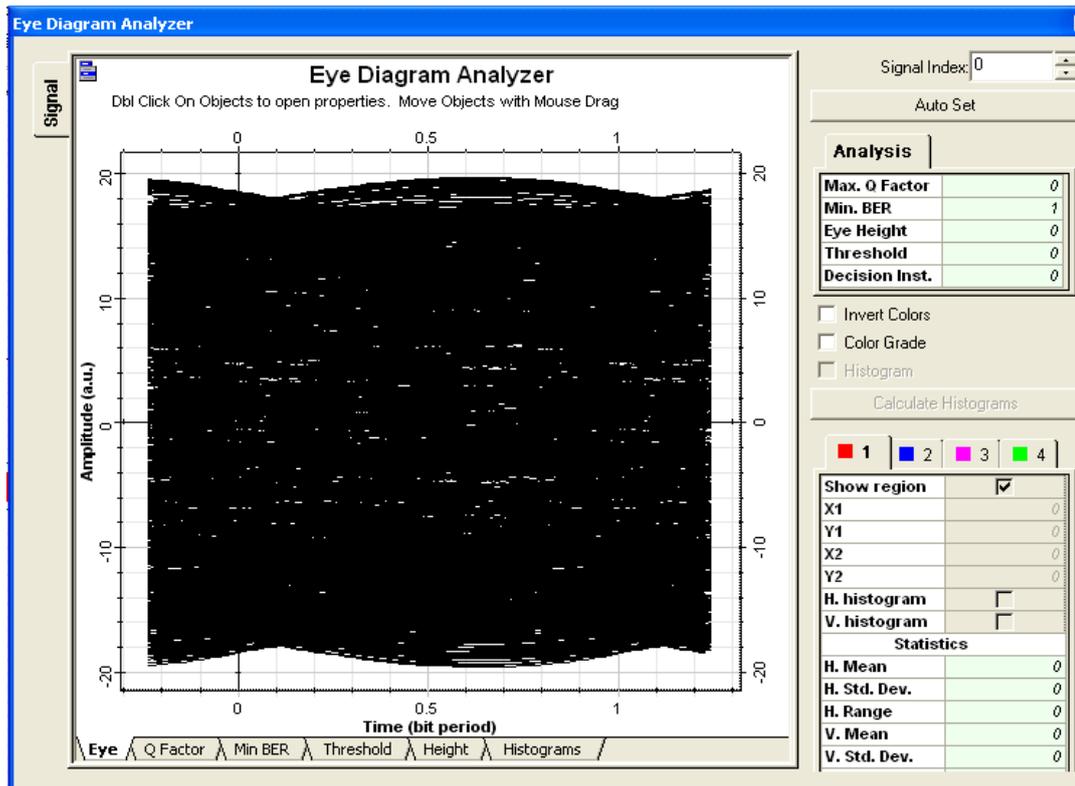


Figure IV.27 : Diagramme de L'œil à la réception

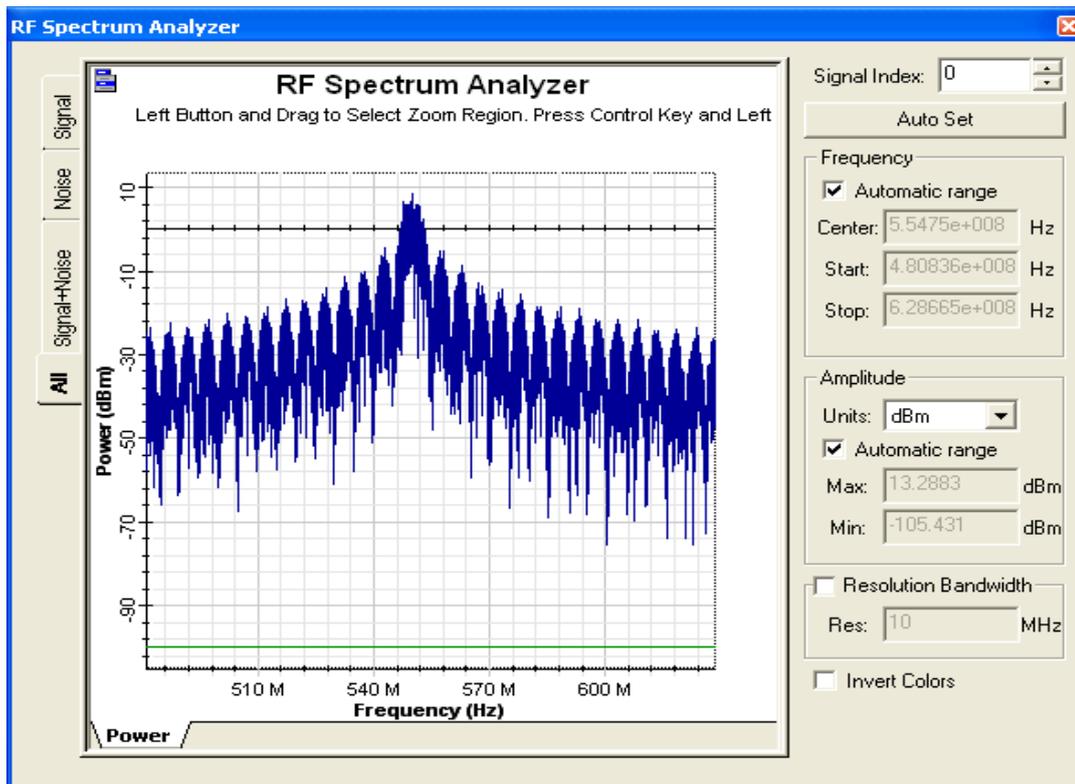


Figure IV.28: Densité Spectrale de Puissance

IV. Modulation QAM

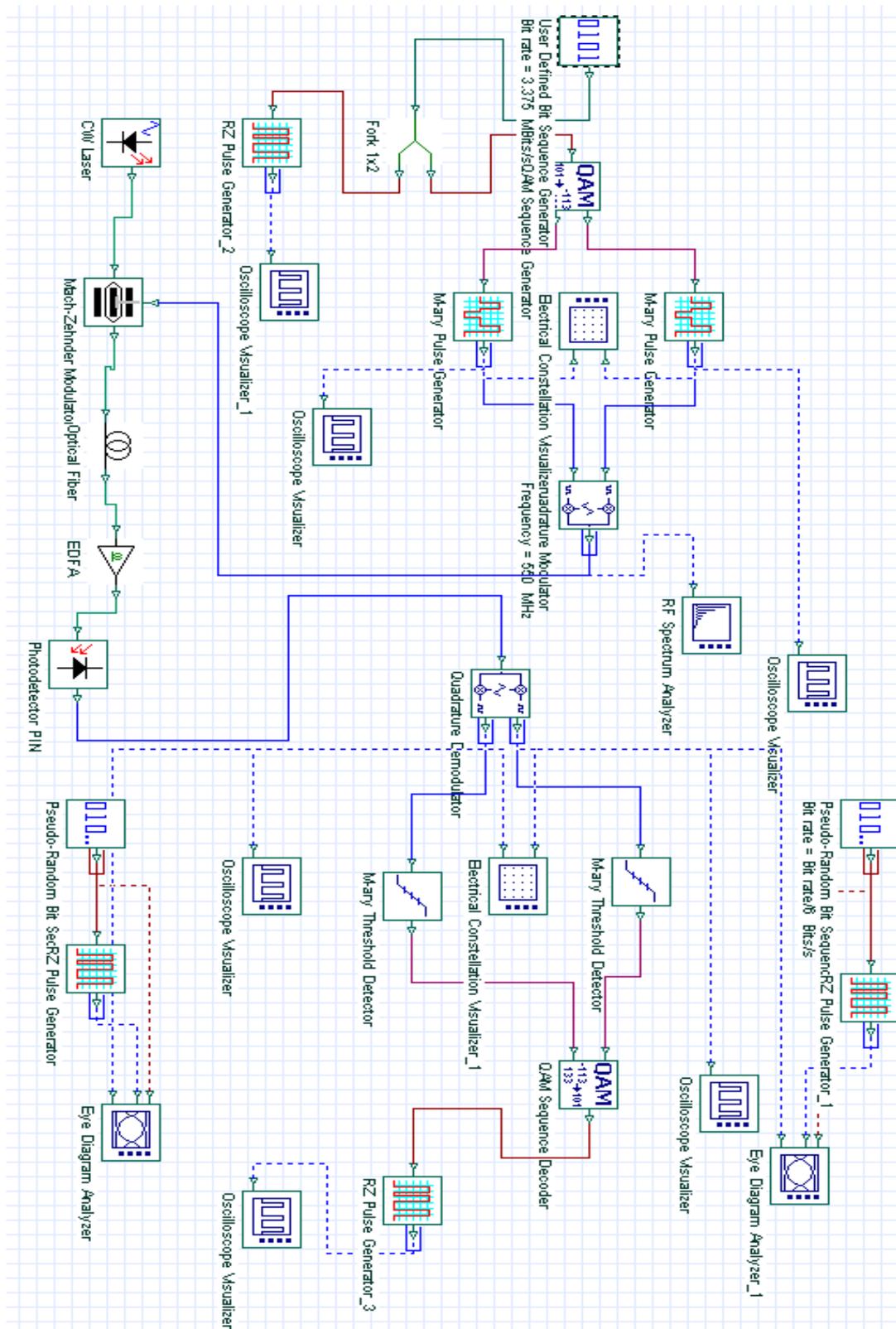


Figure IV.29 : Schéma d'un émetteur/récepteur à base
d'un modulateur/démodulateur QAM

IV.1 Modulation QAM (2bit/Symbol)

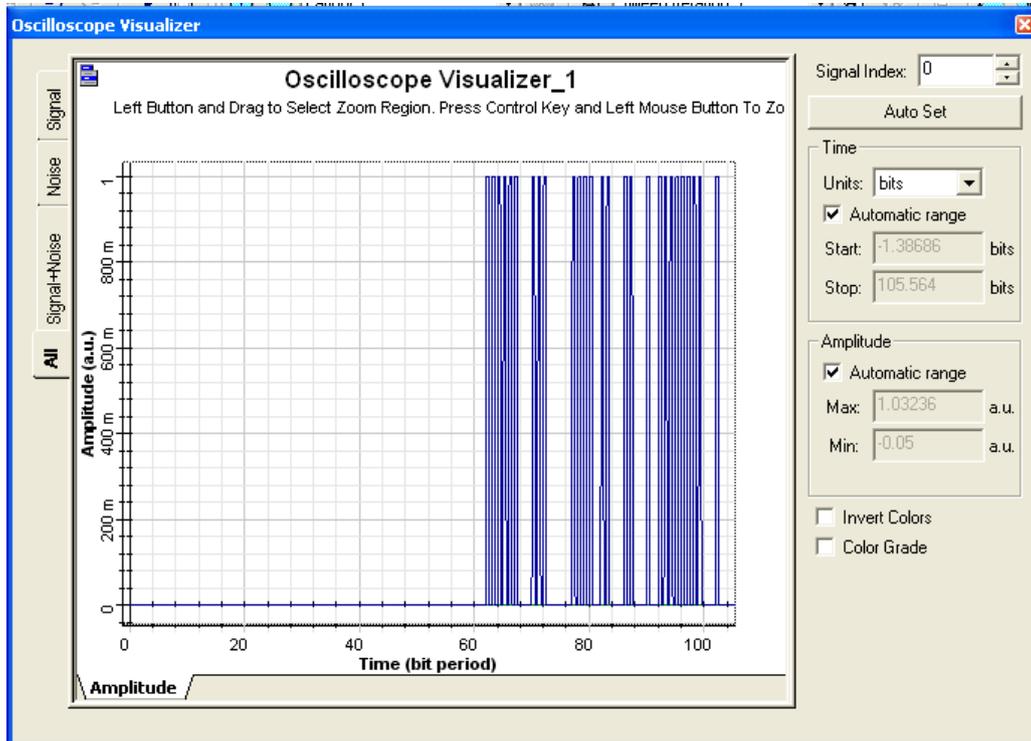


Figure IV.30 : Débit binaire à l'émission

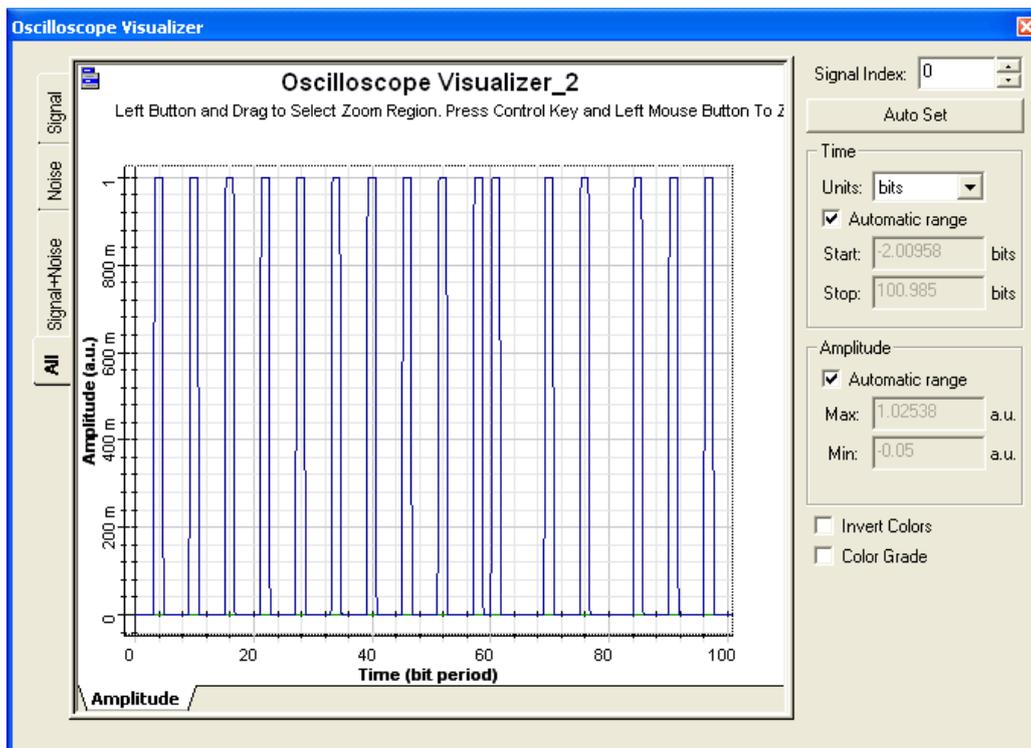


Figure IV.31 : Débit binaire à la réception

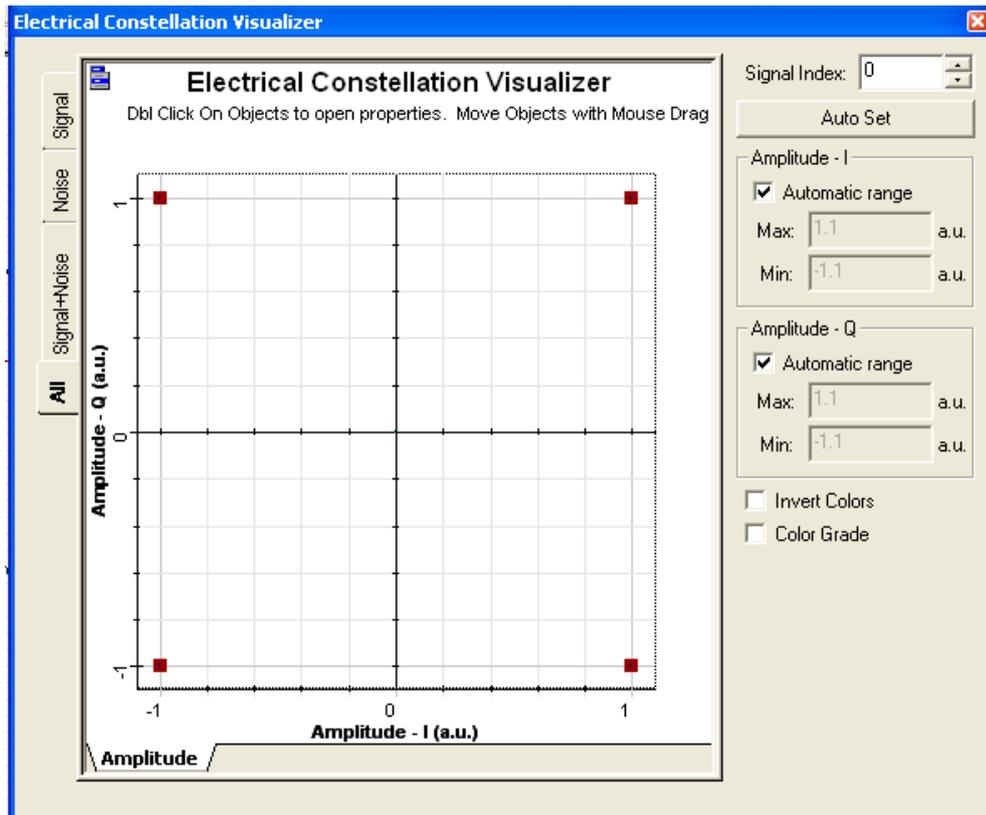


Figure IV.32 : Diagramme de Constellation après modulation

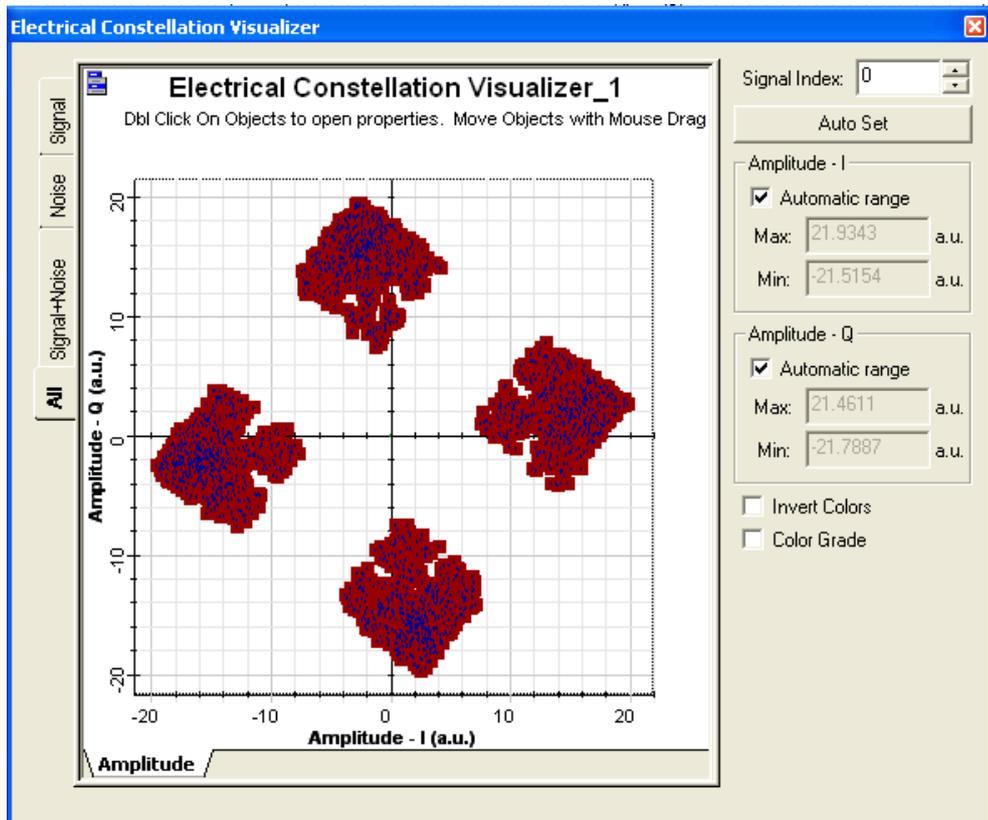


Figure IV.33 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite

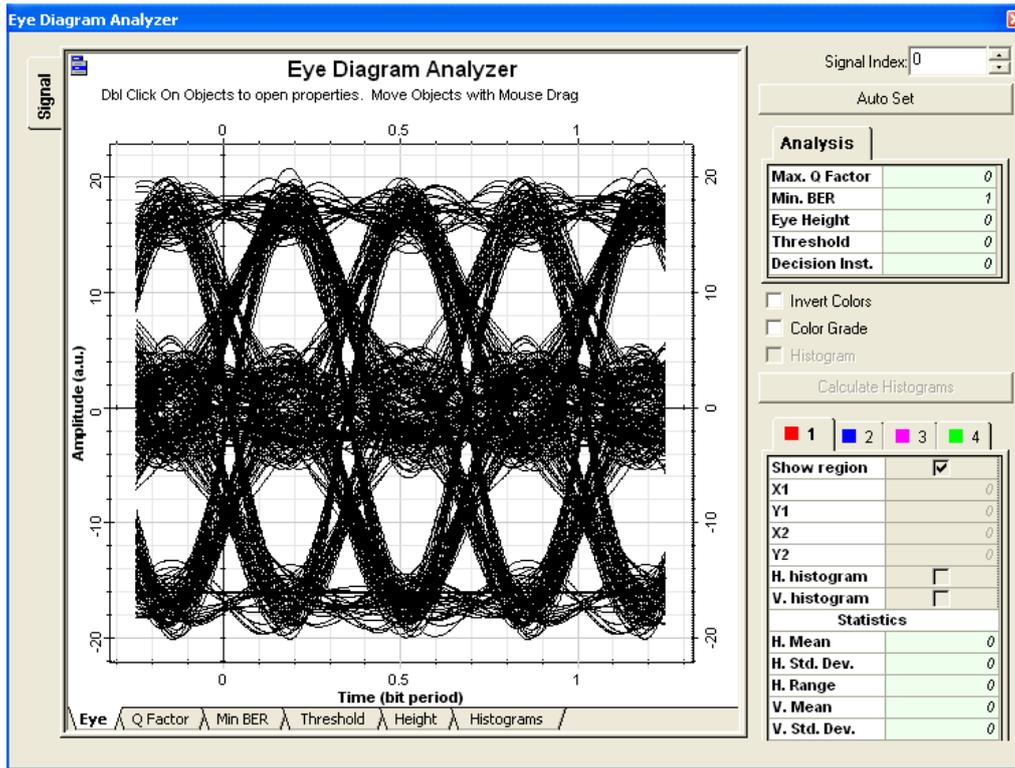


Figure IV.34 : Diagramme de L'œil à la réception

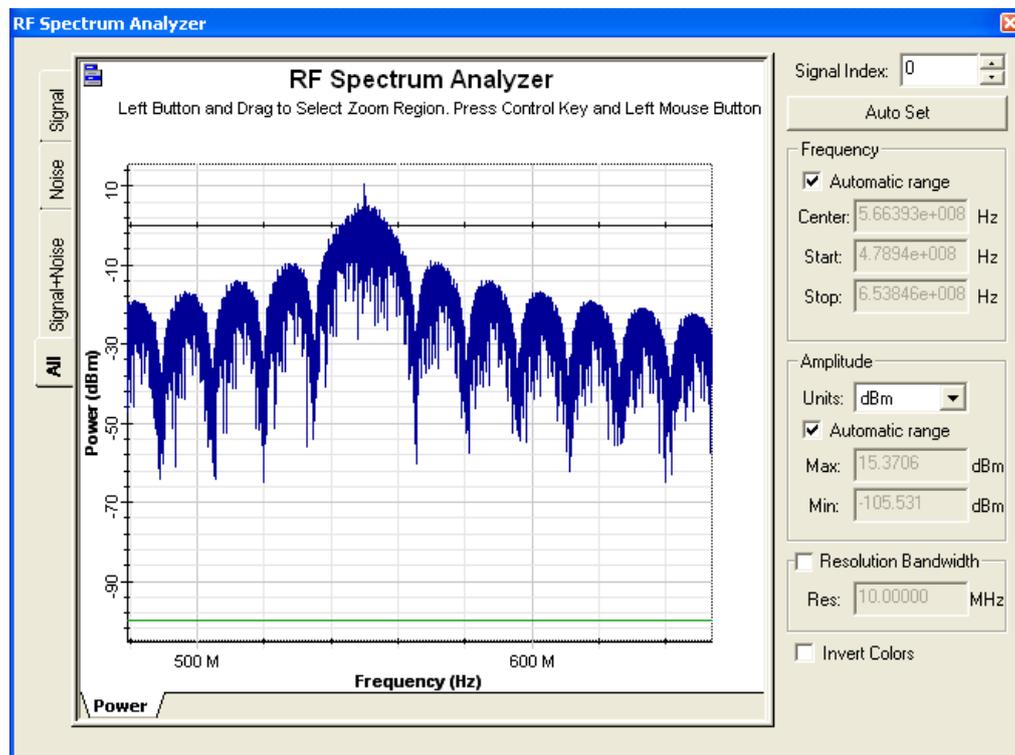


Figure IV.35: Densité Spectrale de Puissance

IV.2 Modulation QAM (4 bits/Symbol)

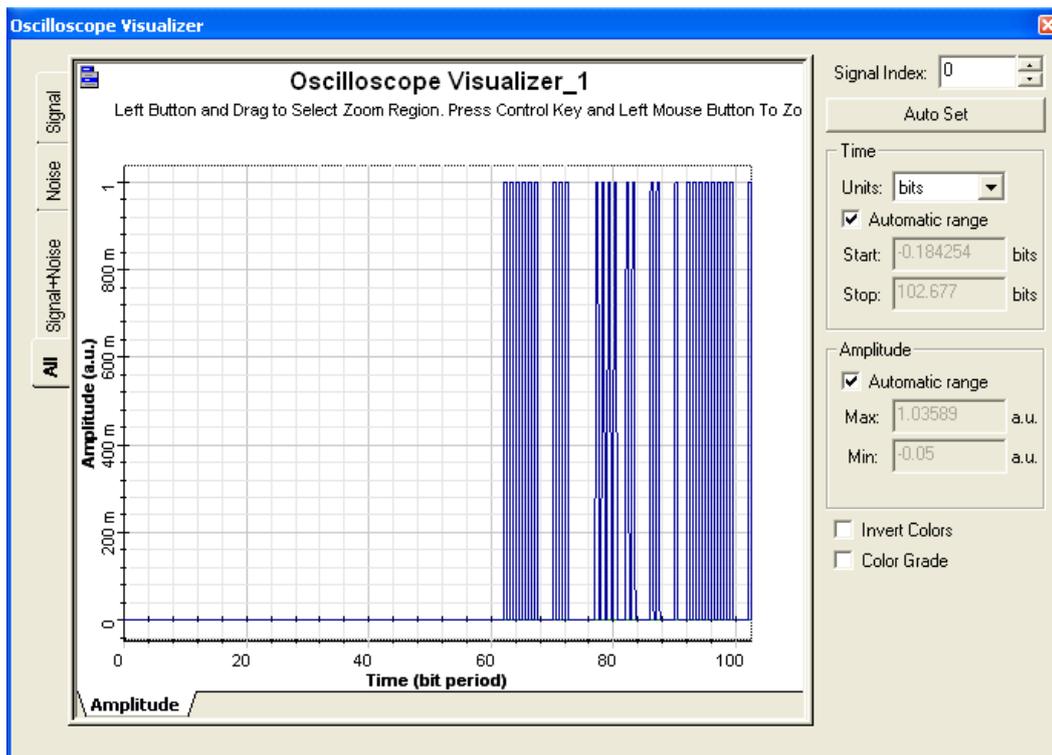


Figure IV.36 : Débit binaire à l'émission

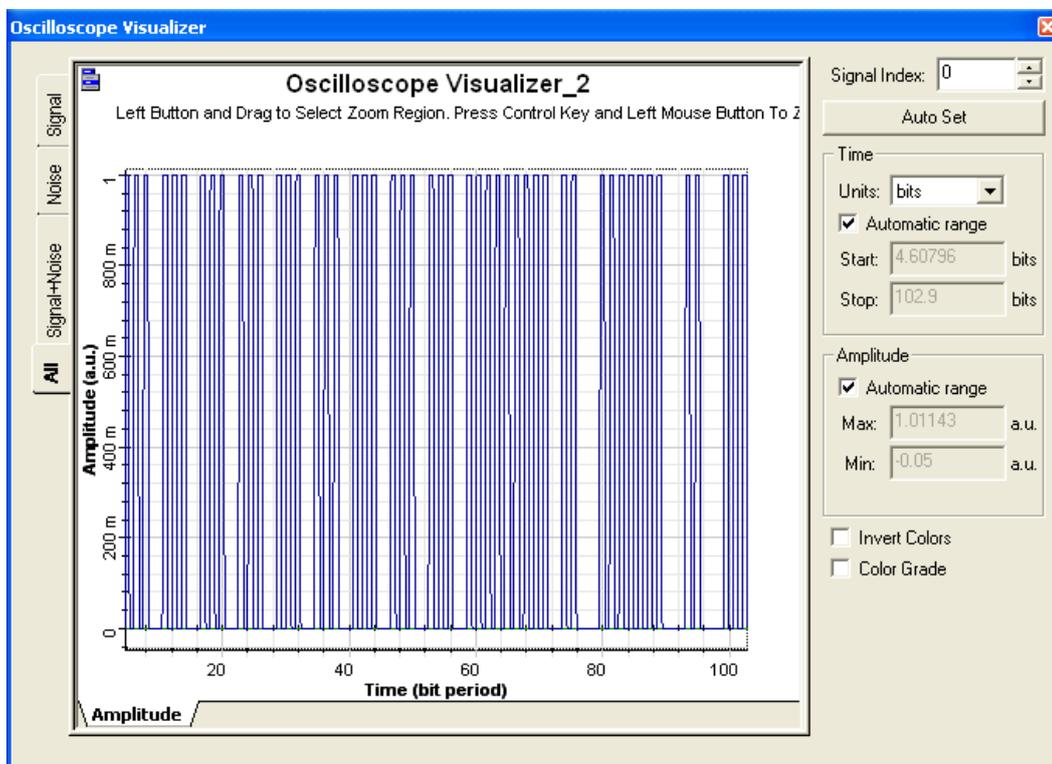


Figure IV.37 : Débit binaire à la réception

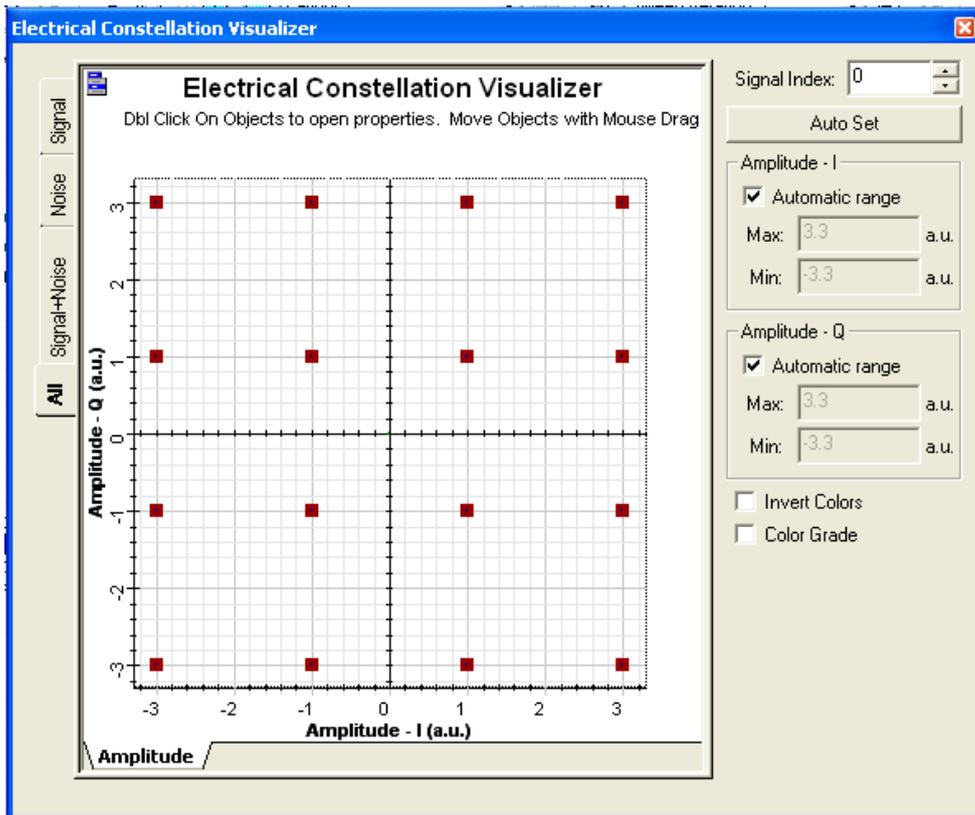


Figure IV.38 : Diagramme de Constellation après modulation

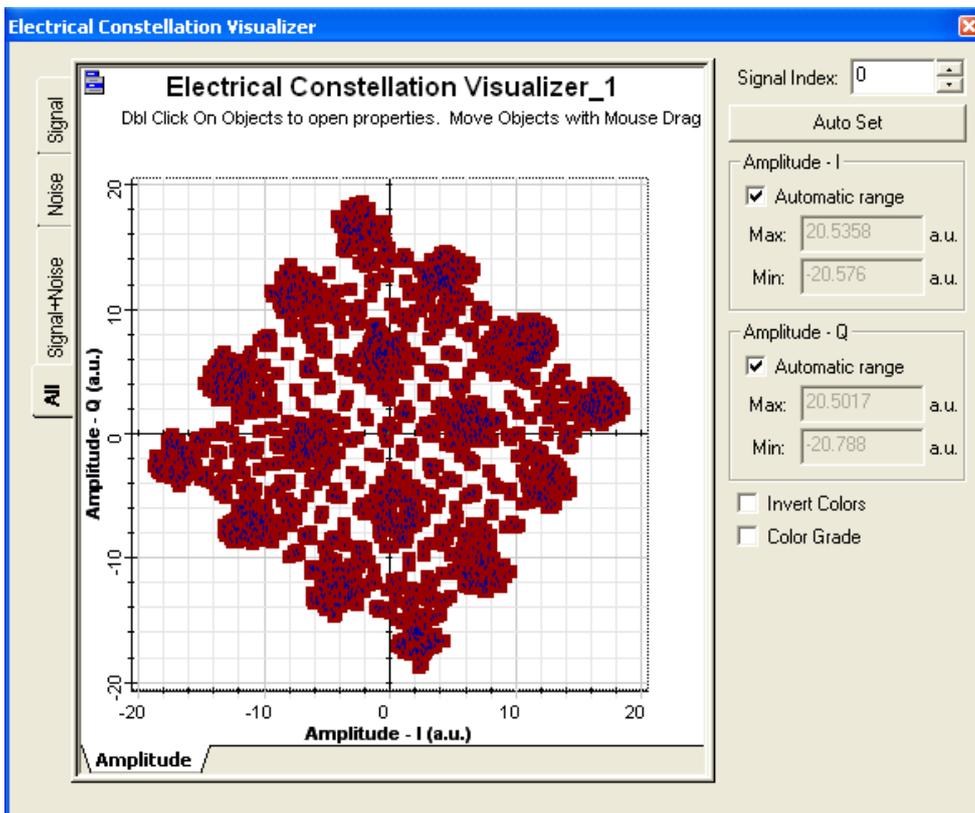


Figure IV.39 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite

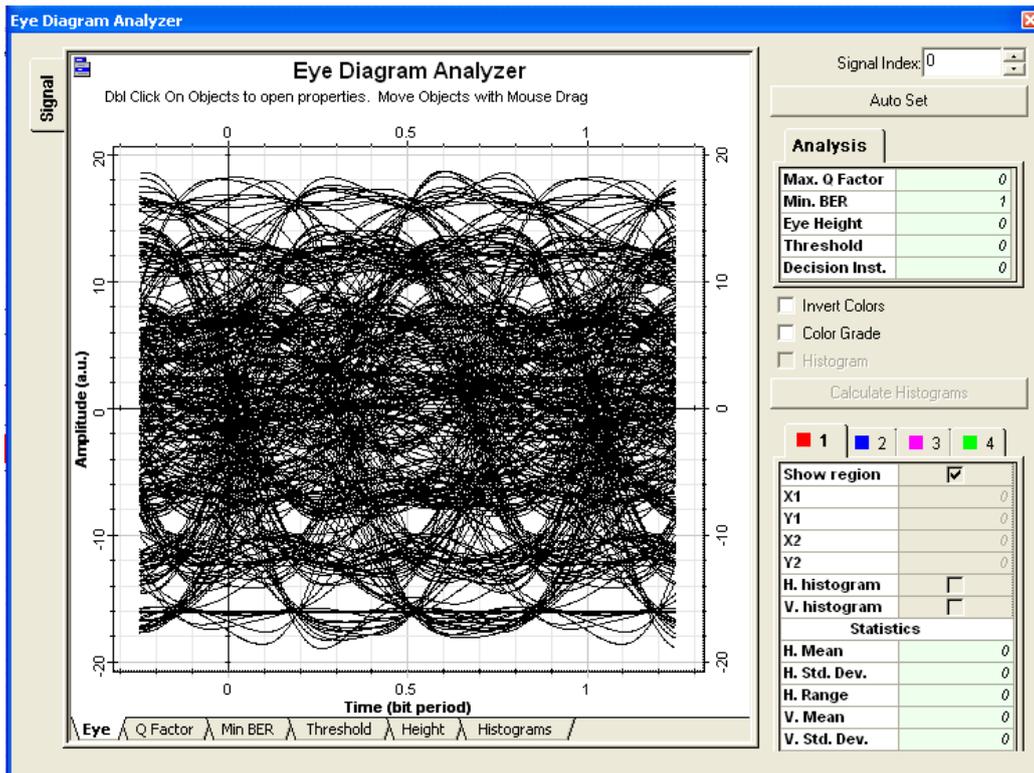


Figure IV.40 : Diagramme de L'œil à la réception

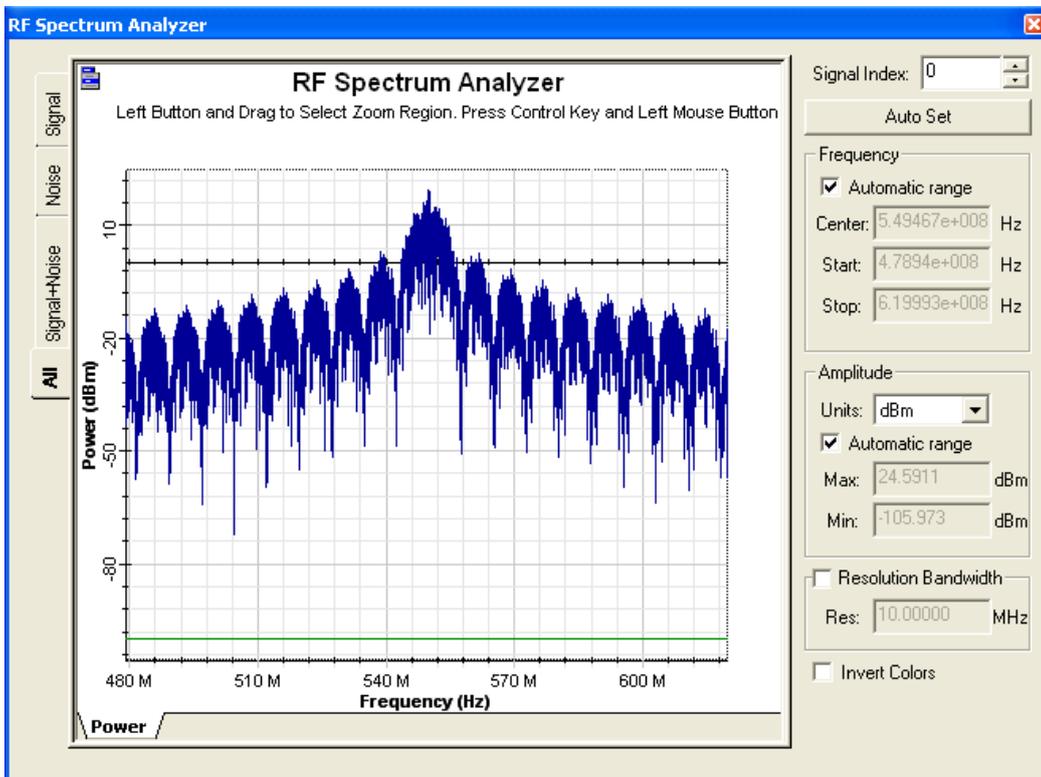


Figure IV.41: Densité Spectrale de Puissance

IV.3 Modulation QAM (6 bits/Symbol)

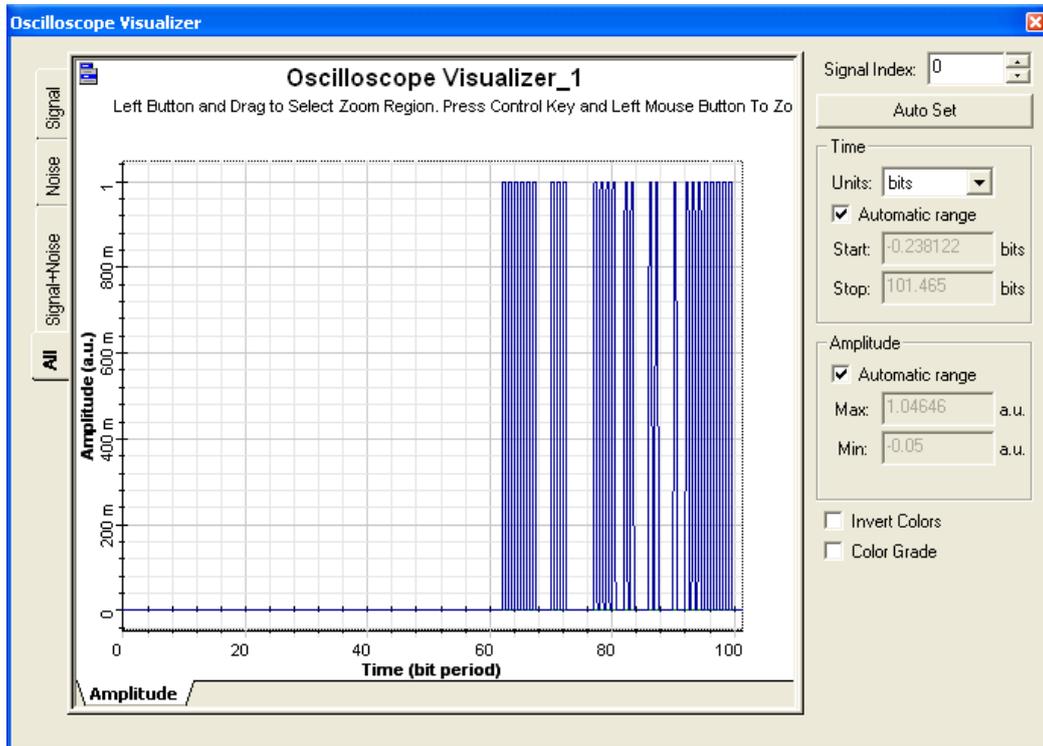


Figure IV.42 : Débit binaire à l'émission

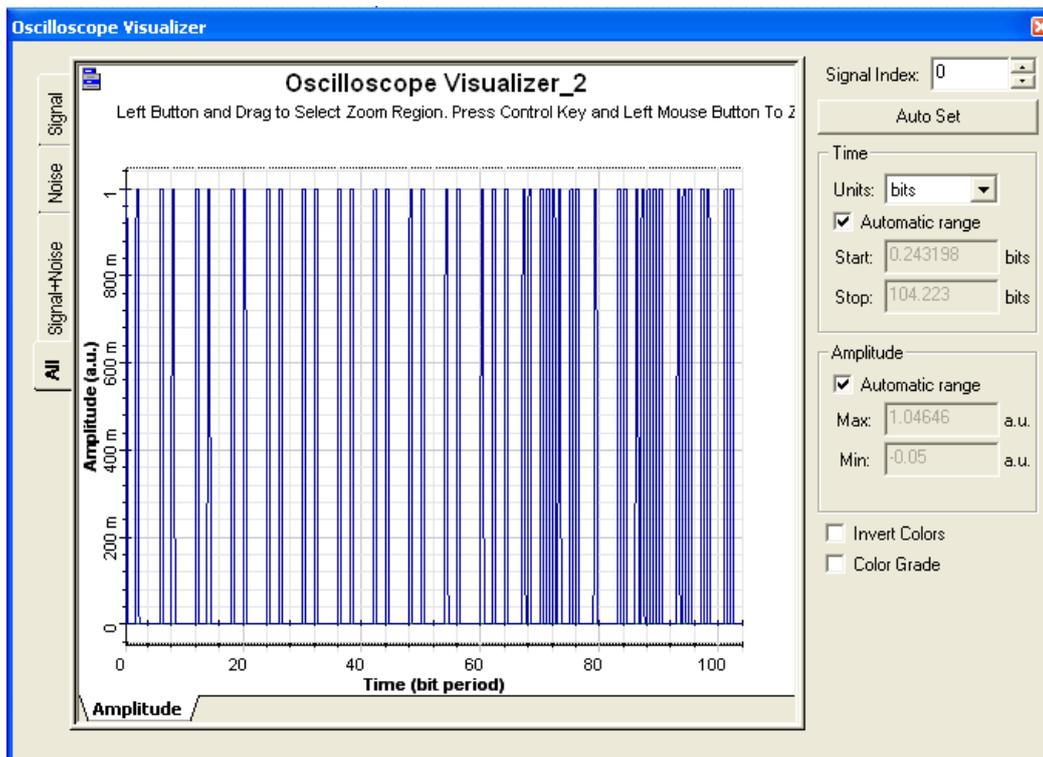


Figure IV.43 : Débit binaire à la réception

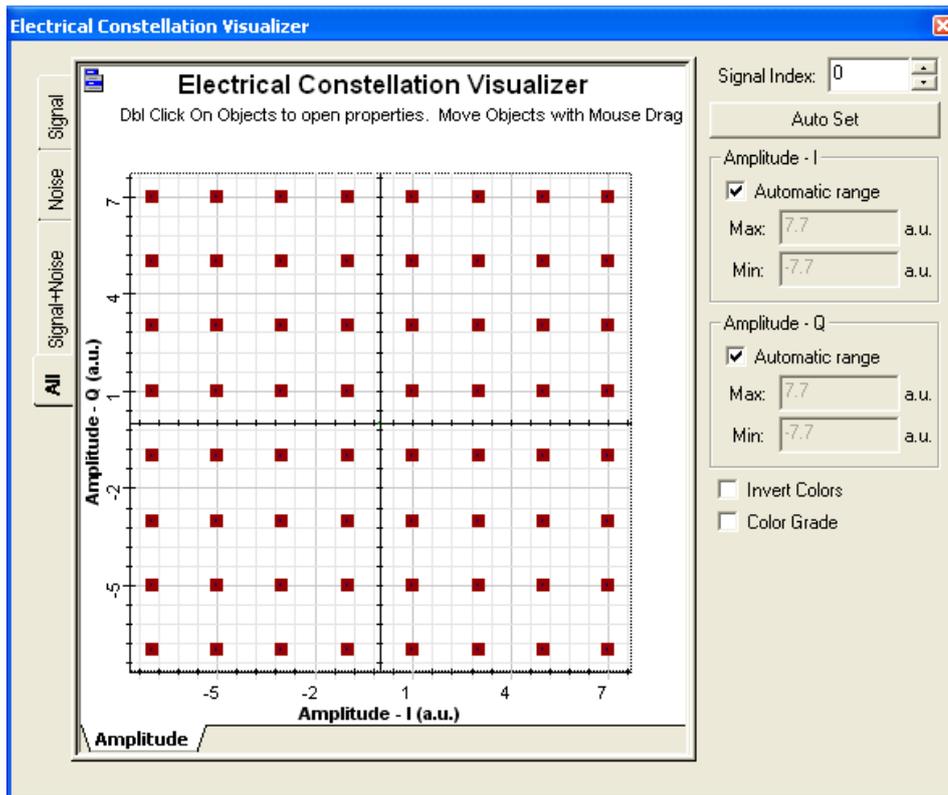


Figure IV.44 : Diagramme de Constellation après modulation

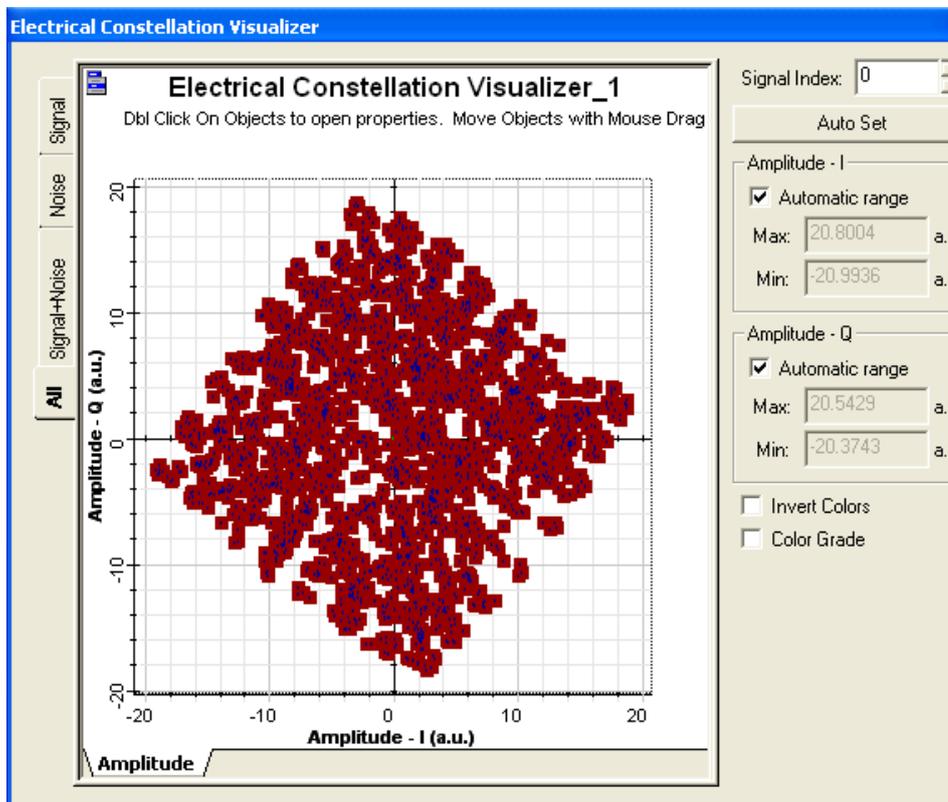


Figure IV.45 : Diagramme de Constellation après démodulation à droite

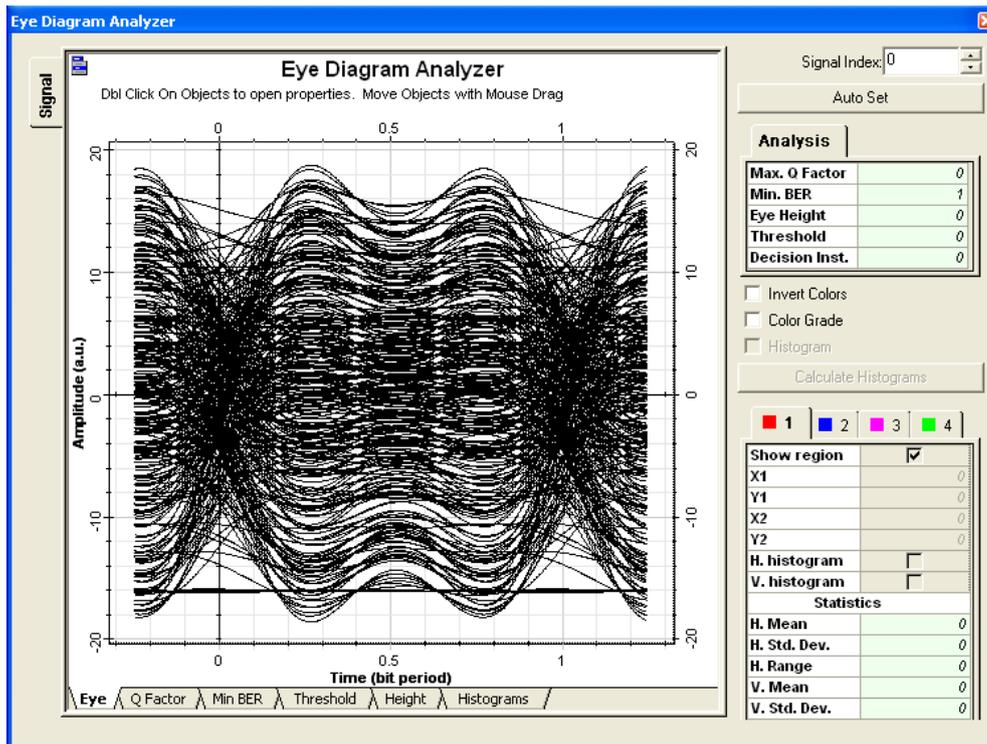


Figure IV.46 : Diagramme de L'œil à la réception

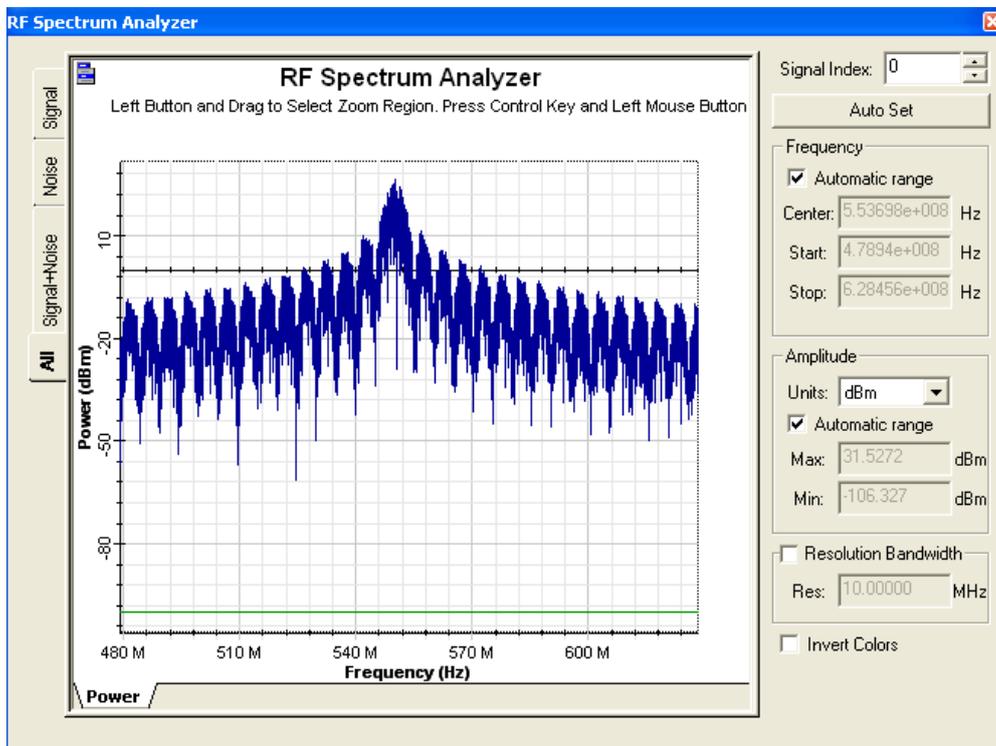


Figure IV.47: Densité Spectrale de Puissance

V. Discussion

❖ Paramètres de simulation

Toutes les simulations ont été faites par

Débit binaire $D = 30.375$ Mbit/s

Fibre optique de longueur : $L = 80$ km

Atténuation est de : 0.2 dB/km

Dispersion est de -16.75 Ps/nm.km

Modulateur optique est de type Mach-Zehnder :

La photodiode est de type PIN :

Amplificateur optique est de type EDFA :

❖ Modulation DPSK

- Débit binaire : avec 6 bits/Symbol le débit à la réception est proche au débit à l'émission par rapport au cas de 2 et 4 bits/Symbol. C'est-à-dire moins d'erreur par rapport à 2 et 4 bits/Symbol.
- Diagramme de constellation : avec 6 bits/Symbol est beaucoup influencé par les interférences et les distorsions par rapport aux cas de 2 et 4 bits/Symbol. C'est-à-dire la détection des bits serait complexe dans le cas de 6 bits/Symbol.
- Diagramme de l'œil : avec 6 bits/Symbol est beaucoup influencé par les interférences et distorsions par rapport aux cas de 2 et 4 bits/Symbol. Le diagramme est complètement fermé pour 6 bits/Symbol.
- Densité spectrale de puissance : avec 6 bits/Symbol la densité spectrale de puissance présente une bonne répartition par rapport à 2 et 4 bits/Symbol. Le lobe principal est étroit avec une puissance de l'ordre 8 dBm à la fréquence centrale. Cependant pour 2 bits/Symbol le lobe principal est large avec une valeur de l'ordre de $2 - 5$ dBm à la fréquence centrale $f_c = 550$ MHz

❖ Modulation QAM

- Débit binaire : le débit à la réception est présente beaucoup d'erreur pour les trois cas 6 , 4 et 2 bits/Symbol.
- Diagramme de constellation : avec 6 bits/Symbol est beaucoup influencé par les interférences et les distorsions par rapport aux cas de 2 et 4 bits/Symbol.

C'est-à-dire la détection des bits serait complexe dans le cas de 6 *bits/Symbol*.

- Diagramme de l'œil : avec 6 *bits/Symbol* est beaucoup influencé par les interférences et distorsions par rapport aux cas de 2 et 4 *bits/Symbol*. Le diagramme est complètement fermé pour 6 *bits/Symbol*.
- Densité spectrale de puissance : avec 6 *bits/Symbol* la densité spectrale de puissance présente une bonne répartition par rapport à 2 et 4 *bits/Symbol*. Le lobe principal est étroit avec une puissance de l'ordre 25 dBm à la fréquence centrale $f_c=550$ MhZ. Cependant pour 2 *bits/Symbol* le lobe principal est large avec une valeur de l'ordre de 5 dBm à la fréquence centrale $f_c= 550$ MhZ.

Remarque

- En augmentant le nombre de bits par symboles la probabilité d'erreur augmente. Cela est bien représenté sur le diagramme de constellation de la figure IV.20 où il y a un chevauchement entre les symboles à la réception. Sur le diagramme de l'œil de la figure IV.21 les ouvertures ont totalement disparu, IES très importante.
- On peut clairement voir qu'après démodulation il y a des erreurs (figure IV.12, cela est dû à une mauvaise estimation du symbole à la réception. Le diagramme de constellation de la figure IV.14 illustre parfaitement ces erreurs avec des symboles reçus qui ne sont pas tout à fait sur les points d'origine ce qui donne une certaine probabilité d'erreur.
- Le diagramme de l'œil reflète les remarques précédentes avec des ouvertures très fines, donc beaucoup d'interférences entre symboles
- La DSP nous informe sur l'occupation spectrale des symboles émis (**voire la bande du lobe principale**).
- La remarque la plus importante sur le diagramme de constellation est qu'il y a une certaine rotation des points de constellation à la réception, ce qui engendre forcément les erreurs d'estimation. Cette rotation est dû à une erreur de phase qu'il faut compenser à la réception.
- En augmentant le nombre de bits par symboles la probabilité d'erreur augmente. Cela est bien représenté sur le diagramme de constellation de la figure IV.20 où il y a un

chevauchement entre les symboles à la réception. Sur le diagramme de l'œil de la figure IV.21 les ouvertures ont totalement disparu, IES très importante.

Ces remarques peuvent être reportées sur toutes les modulations.

En conclusion, il faut introduire une compensation de la phase à la réception par une égalisation par exemple pour réduire le nombre d'erreurs.

CONCLUSION GENERALE

L'importance d'une modulation est de pouvoir transmettre avec une qualité appréciable d'un signal analogique. La modulation devra s'adapter au canal de transmission. Le choix de la modulation portera sur le type de modulation à prendre en fonction de l'application et le canal dédié. A titre d'exemple, une transmission à longue distance va être fortement atténuée et très parasitée, par conséquent le signal arrivant au démodulateur aura une amplitude très fluctuante. Le choix d'une modulation AM est donc à proscrire.

De plus, le signal subit différents traitements (modulation, amplification, démodulation) qui vont entraîner des déformations. Il est d'usage de caractériser le bruit par sa puissance. De ce fait, l'influence du bruit sur un signal est donnée par le rapport signal sur bruit qui est le rapport de la puissance du signal non bruité sur la puissance de bruit (SNR : Signal to Noise Ratio). Cette quantité est fréquemment exprimée en décibels. Plus le SNR dB est élevé, meilleure sera la qualité du signal reçu.

La position et le rôle des modulateurs et des démodulateurs dans une chaîne de transmission a été explicité, ainsi que les difficultés d'implantation posées aux architectures numériques par la transmission d'un signal numérique en bande transposée. Deux exemples d'architectures de modulation et de démodulation de signaux DPSK et QAM nous ont permis de mettre en lumière les éléments fonctionnels de ces architectures qui empêchent leur transcription directe sur un circuit numérique. C'est pour cette raison qu'une nouvelle méthodologie de conception est proposée pour la conception de systèmes numériques pour la transmission de signaux à haut débit. Elle propose de transcrire dans le domaine numérique les fonctionnalités nécessaires à la modulation ou la démodulation, plutôt que de transcrire les architectures analogiques existantes, trop complexes et mal adaptées au numérique.

À la réception, on retrouve le démodulateur numérique qui est idéalement le traitement inverse du modulateur. Cette section peut devenir très élaborée car le signal reçu est très différent de ce qui a été transmis. C'est d'ailleurs au niveau de ce bloc que la majorité des recherches s'effectuent de nos jours.

En particulier pour les modulations complexes, comme la QAM qui contrôle à la fois la phase et l'amplitude du signal considéré, il faut faire face à plusieurs difficultés afin de produire un échantillon binaire de signal modulé. Le premier se trouve dans le calcul du cosinus de la phase de l'échantillon considéré, le second dans la multiplication par le coefficient d'amplitude.

La structure du démodulateur est beaucoup plus complexe que celle du modulateur QAM, en particulier parce que le spectre des signaux modulés QAM ne contient aucune raie à la fréquence de l'onde porteuse. Elle est composée de deux multiplieurs, d'un additionneur, d'un filtre et d'un oscillateur contrôlé en tension (*VCO*). La sinusoïde en phase correspondant à l'onde porteuse est reconstituée par interpolation et corrections successives à partir des valeurs numériques produites par les deux blocs de décision. Deux filtres passe-bas placés en amont de ces blocs de décision permettent de supprimer les composantes à fréquence élevées qui subsistent après la multiplication.

Les résultats obtenus ne sont pas très satisfaisants à cause de plusieurs paramètres citons : le support de transmission avec leurs différents blocs comme la diode laser, le modulateur, l'amplificateur optique et la photodiode. Dans notre travail on n'a pas pris en considération tous ces composants Electro-optiques et optiques. Nous souhaitons que notre travail sera compléter ultérieurement par nos collègues surtout sur la partie support de transmission.

Bibliographie

- [1] «Modulations-Numériques » <http://claude.lahache.free.fr/mapage2/modulations-numeriques.pdf>. [Accès mai 2019].
- [2] Chevillard desmoiliere «Modulation_Et_PLL »
http://xcotton.pagespersoorange.fr/electron/dossier_modulation_et_pll_chevillard_desmuere.pdf. [Accès mai 2019].
- [3] Pascal-Clerc, Pascal-Xavier «Principes Fondamentaux Des Télécommunications», Edition Elipses/Maeketing S.A, 1998, ISBN : 2-7298-6864-x,
- [4] Pascal-Xavier « traitement du signal analogique » Edition Elipses/Maeketing S.A, 1999, ISBN : 2-7298-7866-x ,
- [5] Akram Dridi « Modulation Des Signaux »,
<https://fr.scribd.com/doc/12622808/Presentation-Pfe-Modulation-des-signaux>, mai 2019.
- [6] El Arbi Abdellaoui Alaoui «PFE : Reconnaissance de système de communication »,
<https://fr.scribd.com/doc/194680328/PFE-final-33-1>, mai 2019.
- [7] Patrice KADIONIK «Base de transmission numérique ».
Ecole nationale superieure d'électronique informatique et radio communication .
kadionik@enseirb.fr.<http://www.enseirb.fr/~kadionik>, Accès mai 2019.
- [8] Mehassoul Mustapha «MEMOIRE de MAGISTER, « Application de la technologie mimo a la 4G du mobile », Université Ferhat Abbas –Setif1,2009
- [9] « Introduction aux Transmissions Numériques »
https://www.google.com/url/trans_num_f5adr_aram34.pdf&usg=AOvVaw0vqJkyPRX6taRcgBx5oDtL, Accès mai 2019.
- [10] « digital communication »
www.tutorialspoint.com/digital_communication/digital_communication_differential_phase_shift_keying.htm&usg, Accès mai 2019.
- [11] « Communications Perhubungan », <http://eprints.usm.my/30857/1/EEE377.pdf>.
Accès mai 2019.
- [12] Patrice KADIONIK , «BASES DE TRANSMISSIONS NUMERIQUES », Ecole nationale superieure electronique.informatique et radio communication,
<http://www.enseirb.fr/~kadionik>.

- [13] Gabriel Charlet , « Etude des formats de modulation et des méthodes de détection pour les transmissions multiplexées en longueur d'onde sur fibre optique », Thèse de doctorat spécialité physique , UNIV LILLE-France
- [14] BENGHALEM F. Z, BENHAMED F.Z «Etude d'un système WDM DPSK-NRZ», « Mémoire de MASTER en Télécommunication, Université de tlemcen, 2014.
- [15] Digital Modulation part 3, www.AtlantaRF.com, july 2013.

Résumé : Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible. La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis.

Notre travail sera emporté sur l'étude et la comparaison de la modulation DPSK et QAM en utilisant *le logiciel Optisystem*.

Mots clés : Modulation, Démodulation, Diagramme de constellation, Diagramme de L'œil, séquence binaire.



Abstract : Digital transmission systems convey information between a emitter and a receiver by using a physical medium such as cable, optical fiber or propagation over a radio channel. The signals transported can be either directly of digital origin, as in the data networks, or of analog origin (speech, image ...) but converted into a digital form. The task of the transmission system is to convey information from the emitter to the receiver as reliably as possible. The role of the modulation is to adapt the signal spectrum to the channel (physical environment) on which it will be emitted.

Our work will be focused on the study and comparison of DPSK and QAM modulation using *Optisystem software*.

Key words : Modulation, Demodulation, Constellation Diagram, Eye Diagram, Binary Sequence.