



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA  
Fitiavana – Tanindrazana – Fandrosoana

-----  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

-----  
UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

-----  
INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR D'ANTSIRABE – VAKINANKARATRA  
-----



## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**En vue de l'obtention du diplôme de**

**LICENCE**

*Parcours* : Radiocommunication (RC)

*Par* : RAKOTONDRAHASY Hantaniaina Felana Christelle

## **ETUDE DE LA PERFORMANCE D'UNE TRANSMISSION DVB-T**

Soutenu le **12 Avril 2017** devant les membres du jury :

Président :

Monsieur RAJAONARISON Eddie Franck

Examineurs :

Madame RALAIBOZAKA Tahina Nancy Muriel

Monsieur RAKOTORAHALAHY Tahiry Valisoa

Encadreur :

Monsieur RANDRIANANDRASANA Marie Emile



## REMERCIEMENTS

« Je veux dire merci au Seigneur! » Psaumes 104 :1. Mon Dieu qui m'a accordé par sa miséricorde des innombrables bénédictions.

J'adresse mes sincères reconnaissances à Monsieur RAMANOELINA Panja, Président de l'Université d'Antananarivo qui m'a offert l'opportunité d'accéder à mes études universitaires.

Je tiens à remercier Monsieur RAJAONARISON Eddie Franck, Maître de Conférences, Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra, de m'avoir accueilli au sein de son établissement, et m'a fait l'honneur de bien vouloir présider les membres du jury de ce mémoire.

Je remercie également Madame RANAIVOSOA Mamitiana Olivette, Assistante d'Enseignement et de recherche, Responsable de la mention Automatismes Electronique Informatique Industrielle, pour la richesse et la qualité de la formation qui m'a été offerte durant mes études.

Mes sincères remerciements s'adressent également à Monsieur RAKOTOMALALA Mamy Alain, Maître de Conférences, Responsable de la mention Télécommunication au sein de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui a accepté le partenariat avec la mention Automatismes Electronique Informatique Industrielle de l'IES-AV.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur RANDRIANANDRASANA Marie Emile, Assistant d'Enseignement et de recherche, Responsable de parcours, qui, en dépit de ses lourdes tâches, m'a inspiré le sujet de ce mémoire, l'a dirigé avec beaucoup de compréhension et de patience.

Je remercie chaleureusement tous les membres du jury d'avoir bien voulu apporter leur soutien pour examiner et améliorer l'ensemble de ce travail :

- Mme RALAIBOZAKA Tahina Nancy Muriel, Assistante d'Enseignement et de recherche
- M. RAKOTORAHALAHY Tahiry Valisoa, Assistant d'Enseignement et de recherche

Enfin, j'adresse mes chaleureux remerciements à ma famille qui m'a soutenu au cours de mes études. Que tous ceux qui est de loin ou de près, m'ont particulièrement aidé dans la réalisation de ce mémoire reçoivent ici mes vifs remerciements.

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	i
TABLE DES MATIERES .....	ii
NOTATIONS ET ABREVIATIONS .....	v
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX.....	vii
INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE 1 CONCEPTS DE BASE DES SYSTEMES DE COMMUNICATION NUMERIQUE ..	2
1.1 Introduction .....	2
1.2 Critères d'analyse de performance des systèmes de communication numérique.....	2
1.2.1 Rapport signal sur bruit .....	2
1.2.2 Taux d'erreur binaire.....	3
1.2.3 Probabilité de coupure .....	3
1.3 Chaîne de transmission numérique.....	3
1.3.2 Numérisation .....	4
1.3.3 Codage source.....	6
1.3.4 Codage canal .....	6
1.3.5 Canal de transmission .....	7
1.3.6 Transmission .....	10
1.4 Techniques de modulation numérique.....	12
1.4.2 Modulation par déplacement d'amplitude (ASK) .....	12
1.4.3 Modulation par déplacement de fréquence (FSK) .....	14
1.4.4 Modulation par déplacement de phase (PSK) .....	16
1.4.5 Modulation Numérique QAM.....	17
1.5 Conclusion .....	19
CHAPITRE 2 SYSTEME DVB-T .....	20
2.1 Introduction .....	20
2.2 Synoptique et principe de fonctionnement .....	20
2.3 Caractéristiques du spectre .....	21
2.4 Paramètres techniques .....	22

<b>2.5 Modulation multi-porteuses OFDM .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.1 Introduction.....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.2 Principe de l'OFDM.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.3 Un système de communication OFDM.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.4 Paramètres techniques .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.5 Limitations.....</b>	<b>28</b>
<b>2.6 Méthodes de compression de données.....</b>	<b>29</b>
<b>2.6.2 Compression Vidéo MPEG2 .....</b>	<b>30</b>
<b>2.6.3 Compression Audio MPEG1-L2.....</b>	<b>32</b>
<b>2.7 Correction d'erreur .....</b>	<b>32</b>
<b>2.7.1 Code de Viterbi .....</b>	<b>32</b>
<b>2.7.2 Codage Reed Solomon.....</b>	<b>33</b>
<b>2.8 Application .....</b>	<b>33</b>
<b>2.9 Avantages .....</b>	<b>34</b>
<b>2.10 Evolutions .....</b>	<b>35</b>
<b>2.11 Conclusion .....</b>	<b>35</b>
<b>CHAPITRE 3 SIMULATION DU SYSTEME DVB-T .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1 Introduction .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2 Présentation des interfaces graphiques .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.1 Interface d'accueil.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2 Interface de simulation .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3 Caractéristiques de la transmission .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.1 Mode de transmission.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.2 Canal de transmission AWGN .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.3 Modulation x-QAM.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.4 Intervalle de garde.....</b>	<b>39</b>
<b>3.3.5 Conclusion.....</b>	<b>39</b>
<b>3.4 Résultats de la simulation .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.1 Influence du mode de transmission.....</b>	<b>40</b>

<i>3.4.2 Influence de la modulation</i> .....	40
<i>3.4.3 Influence de l'intervalle de garde</i> .....	41
<b>3.5 Conclusion</b> .....	42
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	43
<b>ANNEXES</b> .....	ix
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	xi
<b>PAGE DE RENSEIGNEMENT</b> .....	xii

## NOTATIONS ET ABREVIATIONS

### 1. Minuscules latines

- q** Pas de quantification  
**d** Distance entre les deux antennes

### 2. Majuscules latines

- $E_b$**  Energie véhiculée par un bit  
 **$G_e$**  Gain de l'antenne d'émission  
 **$G_r$**  Gain de l'antenne de réception  
 **$N_0$**  Répartition de puissance en fonction de la fréquence du bruit  
 **$N_{be}$**  Nombre de bit erroné  
 **$N_{bt}$**  Nombre de bit transmis  
 **$P_e$**  Puissance de l'antenne d'émission  
 **$P_n$**  Puissance du bruit qui affecte la transmission  
 **$P_{out}$**  Probabilité de coupure  
 **$P_r$**  Puissance de l'antenne de réception  
 **$P_s$**  Puissance du signal émis

### 3. Minuscules grecques

- $\eta$**  Efficacité spectrale  
 **$\lambda$**  Longueur d'onde du signal

### 4. Abréviations

- AAC** Advanced Audio Coding  
**ADSL** Asymmetric Digital Subscriber Line  
**ASK** Amplitude Shift Keying  
**AWGN** Additive white Gaussian noise  
**BF** Basse Fréquence  
**CAN** Convertisseur Analogique Numérique  
**DCT** Discrete Cosine Transform  
**DVB** Digital Video Broadcasting  
**DVB-S** DVB-Satellite

<b>DVB-T</b>	DVB-Terrestrial
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standart Institut
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>FSK</b>	Frequence Shift Keying
<b>HP</b>	High Priority bit stream
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform
<b>MPEG</b>	Motion Picture Expert Groupe
<b>OEM</b>	Onde Electromagnétique
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OOK</b>	On Off Keying
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying
<b>PT</b>	Paire Torsadée
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QPSK</b>	Quaternary Phase Shift Keying
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>STP</b>	Shielded Twisted Pair
<b>TEB</b>	Taux d'Erreur Binaire
<b>TFD</b>	Transformée de Fourier Discrète
<b>TNT</b>	Télévision Numérique Terrestre
<b>TPS</b>	Transmission Parameter Signalling
<b>UTP</b>	Unshielded Twisted Pair

## LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

<b>Figure 1.01 :</b>	De l’analogique au numérique [1].....	2
<b>Figure 1.02 :</b>	Architecture de base d’un système de communication numérique .....	4
<b>Figure 1.03 :</b>	Echantillonnage [1] .....	5
<b>Figure 1.04 :</b>	Quantification du signal échantillonné [1] .....	5
<b>Figure 1.05 :</b>	Câble à paire torsadée .....	8
<b>Figure 1.06 :</b>	Câble coaxial .....	8
<b>Figure 1.07 :</b>	Fibre optique .....	9
<b>Figure 1.08 :</b>	Synoptique d’une transmission par faisceau hertzien .....	10
<b>Figure 1.09 :</b>	Constellation d’un signal [1] .....	12
<b>Figure 1.10 :</b>	Exemple de transmission numérique [4] .....	12
<b>Figure 1.11 :</b>	Production d’un signal ASK [5] .....	13
<b>Figure 1.12 :</b>	Allure temporelle d’un signal ASK [5] .....	13
<b>Figure 1.13 :</b>	Constellation à 4 points [1] .....	13
<b>Figure 1.14 :</b>	Allure temporelle d’un signal modulé FSK [5] .....	14
<b>Figure 1.15 :</b>	Spectre d’un signal FSK modulé par un signal numérique non filtré [5] .....	14
<b>Figure 1.16 :</b>	Relevé du spectre d’un signal FSK [5] .....	15
<b>Figure 1.17 :</b>	Constellation de 8-PSK [1] .....	17
<b>Figure 1.18 :</b>	Amplitudes et phases possibles de la 16-QAM [1] .....	18
<b>Figure 1.19 :</b>	Constellation de la 64-QAM [1] .....	18
<b>Figure 1.20 :</b>	Les combinaisons d’amplitudes et de phases (64-QAM) [6] .....	19
<b>Figure 2.01 :</b>	Schéma à blocs fonctionnels du standard DVB-T [1] .....	21
<b>Figure 2.02 :</b>	Spectre théorique du signal d’émission DVB [8] .....	22
<b>Figure 2.03 :</b>	La modulation multi-porteuses [3] .....	24
<b>Figure 2.04 :</b>	Construction du spectre d’un signal modulé avec plusieurs porteuses [5] .....	24
<b>Figure 2.05 :</b>	Spectre d’un signal OFDM [5] .....	25
<b>Figure 2.06 :</b>	Spectres de quatre porteuses orthogonales [9] .....	26
<b>Figure 2.07 :</b>	Diagramme bloc d’un système OFDM [10] .....	27
<b>Figure 2.08 :</b>	Répartition de différentes normes mondiales de TNT [13] .....	34
<b>Figure 2.09 :</b>	Infrastructure TNT à Nosy Be .....	34
<b>Figure 3.01 :</b>	Interface d’accueil .....	36
<b>Figure 3.02 :</b>	Interface de simulation .....	37
<b>Figure 3.03 :</b>	Mode 2k avec une modulation 16-QAM et un intervalle de garde 1/4 .....	40

<b>Figure 3.04 :</b>	Mode 8k avec une modulation 16-QAM et un intervalle de garde 1/4.....	40
<b>Figure 3.05 :</b>	Mode 8k avec une modulation 64-QAM et un intervalle de garde 1/4.....	41
<b>Figure 3.06 :</b>	Mode 8k avec une modulation 64-QAM et un intervalle de garde 1/8.....	41
<b>Figure 3.07 :</b>	Mode 8k avec une modulation 64-QAM et un intervalle de garde 1/16.....	42
<b>Figure 3.08 :</b>	Mode 8k avec une modulation 64-QAM et un intervalle de garde 1/32.....	42
<b>Tableau 1.01:</b>	Les amplitudes possibles de la 4-ASK [1].....	14
<b>Tableau 1.02:</b>	Représentation spatiale des phases [4] .....	16
<b>Tableau 1.03:</b>	L'efficacité spectrale et le débit binaire de la modulation x-QAM.....	19
<b>Tableau 2.01:</b>	Mode 2k [1] .....	23
<b>Tableau 2.02:</b>	Mode 8k [1] .....	23
<b>Tableau 2.03:</b>	Débits normalisés [11].....	30
<b>Tableau 2.04:</b>	Années de parution des documents et contenu à propos du MPEG2 [12] .....	31
<b>Tableau 3.01:</b>	Comparatif du débit binaire en changeant l'intervalle de garde.....	39
<b>Tableau 3.02:</b>	Influence des paramètres de modulation sur le débit utile et la robustesse de la transmission .....	39

## INTRODUCTION GENERALE

Le rôle d'un système de télécommunication est de transmettre à distance des informations d'un émetteur à un ou plusieurs récepteurs à travers un canal de manière fiable et à coût réduit. La transmission de l'information peut se faire de différentes manières. L'aspect physique de la transmission se différencie selon la technique de transmission de l'information mais également du canal de propagation.

Les deux principaux types de transmission sont ceux utilisant la technologie analogique et ceux utilisant la numérique. Pour la première, le signal à transmettre est émis en son intégralité à travers une grandeur physique continue tandis que pour la deuxième, une suite finie de symboles représente l'information à transmettre. Cette dernière est transmise dans le canal de propagation par un signal analogique.

La transmission DVB-T est classée parmi les techniques de transmission numérique. La première application de ce système est la télévision numérique terrestre ou TNT, qui est une technologie qui ne cesse d'évoluer. C'est l'une des raisons qui m'a poussé à choisir ce thème : « Etude de la performance d'une transmission DVB-T ».

Premièrement, il est nécessaire de maîtriser les concepts de base des systèmes de communication numérique tels que les critères d'analyses de performance d'une communication numérique, les divers composants d'une chaîne de transmission numérique ainsi que les techniques de modulation numérique. Ensuite, nous allons aborder le terme DVB-T, en mettant en évidence la modulation multi-porteuses OFDM. Enfin, nous présentons la simulation d'une transmission DVB-T sous Matlab, en jouant sur les paramètres techniques du système tels que le mode de transmission, la modulation et l'intervalle de garde.

# CHAPITRE 1 CONCEPTS DE BASE DES SYSTEMES DE COMMUNICATION NUMERIQUE

## 1.1 Introduction

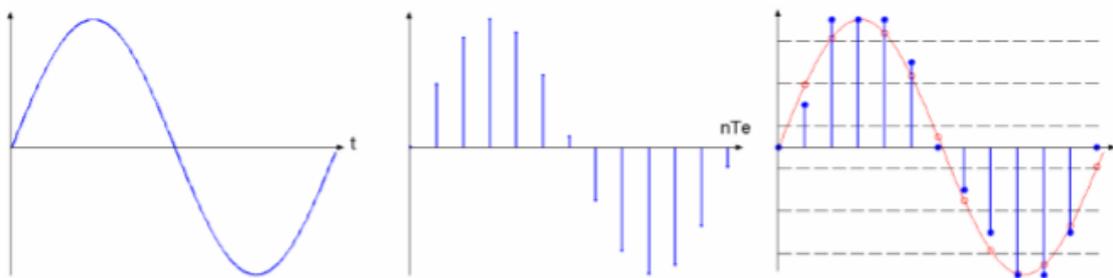
Un signal est un support physique d'une information, il s'agit d'une fonction à une seule variable.

Exemple: le son est une fonction du temps; sa valeur correspond à une pression acoustique.

De nombreuses grandeurs physiques (température, pression, ...) sont des fonctions analogiques. Pour traiter ces informations sur un ordinateur, il faut que leur forme soit numérique. La numérisation d'un signal s'effectue par trois étapes: l'échantillonnage, la quantification et le codage binaire.

Une donnée numérique est donc une information échantillonnée et quantifiée à partir d'une information analogique à temps et amplitudes continus. La figure suivante résume les étapes de la numérisation.

La première courbe représente un signal analogique, la seconde représente le signal échantillonné et la dernière représente le signal quantifié.



**Figure 1.01 :** *De l'analogique au numérique [1]*

## 1.2 Critères d'analyse de performance des systèmes de communication numérique

Les critères de performance des systèmes de transmission varient suivant le fait que l'on est en présence d'un signal analogique ou numérique. Concernant le signal numérique, on rencontre le rapport signal sur bruit, le taux d'erreur binaire et la probabilité de coupure.

### 1.2.1 Rapport signal sur bruit

Le rapport signal sur bruit ou SNR est une mesure de la performance d'une transmission obtenue à travers le niveau du rapport signal sur bruit reçu à la réception.

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} \quad (1.01)$$

Où  $P_s$  est la puissance du signal émis et  $P_n$  la puissance du bruit qui affecte la transmission. Notons que le SNR par bit représente le rapport entre l'énergie véhiculée par un bit notée  $E_b$  et  $N_0$  correspondant respectivement à la répartition de puissance en fonction de la fréquence du bruit.

$$\gamma = \frac{E_b}{N_0} \quad (1.02)$$

### 1.2.2 Taux d'erreur binaire

Au cours d'une transmission numérique, le nombre de bit erroné reçu à la réception sur un nombre fini de bit transmis se reflète à travers du taux d'erreur binaire. En général, sans la connaissance de ce nombre total de bit transmis, on a recours à la probabilité d'erreur binaire. La qualité d'un signal numérique ne sera réduite que si les effets négatifs du canal conduisent le récepteur à confondre plusieurs bits. Afin de spécifier la qualité qu'on doit atteindre une transmission numérique, on a recours au taux d'erreur binaire ou TEB. Le TEB exprime le rapport entre le nombre de bit erroné et le nombre de bit transmis.

$$TEB = \frac{N_{be}}{N_{bt}} \quad (1.03)$$

Où  $N_{be}$  est le nombre de bit erroné et  $N_{bt}$  le nombre de bit transmis.

### 1.2.3 Probabilité de coupure

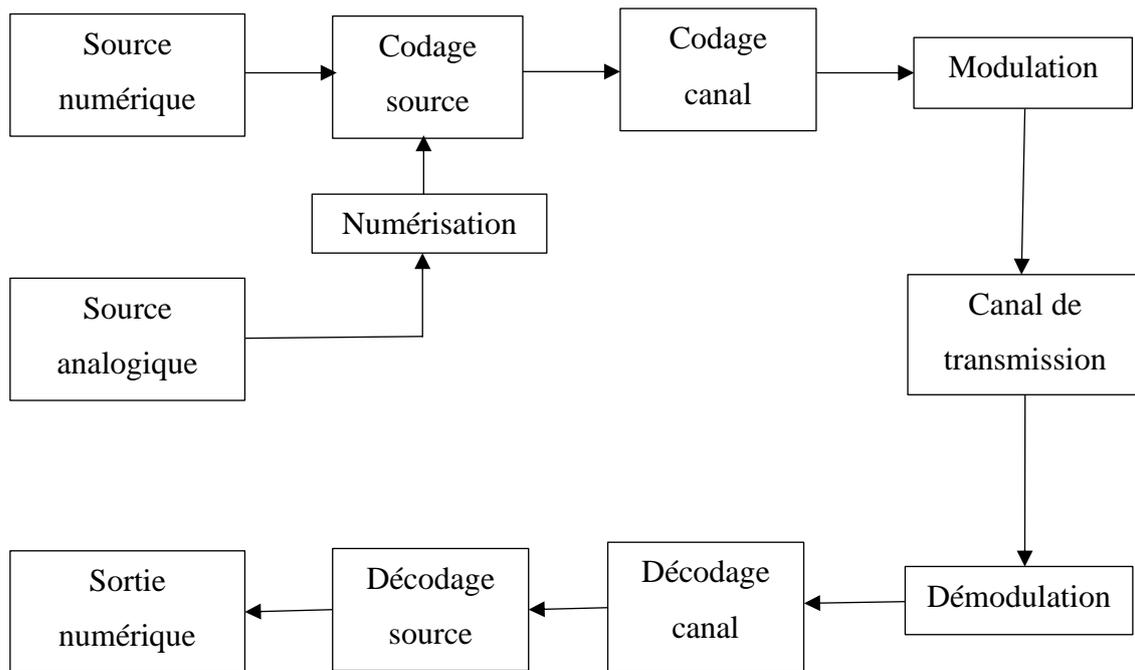
La probabilité de coupure ou Outage Probability ou encore la probabilité de non fonctionnement exprime la probabilité qu'un lien radio se trouve dans un état où le SNR par bit est en dessous d'une valeur seuil fixée notée  $\gamma_{th}$  à l'avance tel que la transmission ne soit plus possible. De ce fait, la probabilité de coupure est définie par :

$$P_{out} = P(\gamma \leq \gamma_{th}) \quad (1.04)$$

## 1.3 Chaîne de transmission numérique

Dans la technique numérique lorsque le message produit par la source est de type analogique, alors l'information à transmettre est tout d'abord traitée en donnée binaire ou numérisée à travers des étapes successives d'échantillonnage, de quantification et de codage binaire. Une fois numérisée, ces données binaires doivent subir un certain nombre de transformation avant d'être transmises à savoir le codage source et le codage canal.

Une chaîne de transmission numérique est basée sur l'architecture suivante :



**Figure 1.02 :** Architecture de base d'un système de communication numérique

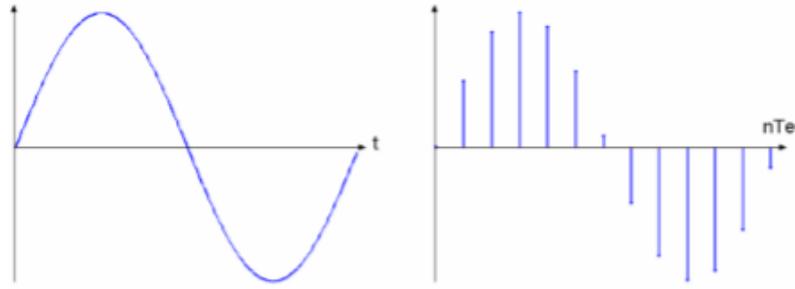
Pour augmenter l'efficacité de la transmission, un codeur source compresse les données en éliminant les redondances qui sont des éléments non significatifs. Ensuite, le signal est soumis à un codage canal qui contrairement au codage source ajoute des redondances pour le rendre plus robuste aux bruits dans le canal de transmission.

### 1.3.2 Numérisation

La numérisation consiste à représenter un signal analogique en une suite de donnée binaire. Elle est réalisée à travers un convertisseur analogique-numérique ou CAN. Cette numérisation se fait en trois étapes à savoir l'échantillonnage qui est la discrétisation de l'axe des abscisses, la quantification qui est la discrétisation de l'axe des ordonnées et le codage binaire qui est la conversion des réels en binaire.

#### 1.3.2.1 Echantillonnage

Il consiste à transformer une fonction  $e(t)$  à valeur continu en une fonction  $e^*(t)$  échantillonnée discrète constituée par la suite de valeur de  $e(t)$  aux instants de l'échantillonnage  $t = \dots, kT_e, (k + 1)T_e, \dots$ , que la Figure 1.03 nous montre.



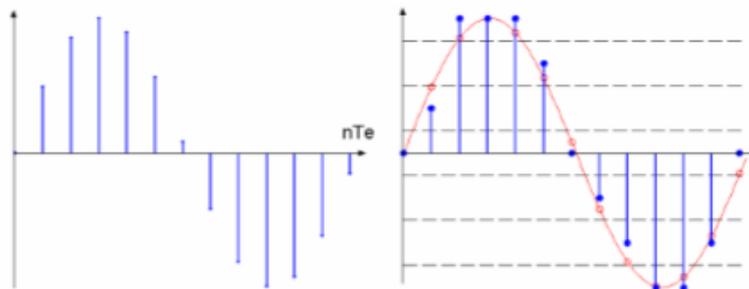
**Figure 1.03 :** *Echantillonnage [1]*

La question fondamentale est de savoir s’il est possible de reconstruire le signal analogique  $e(t)$  à travers des échantillons. A première vue, il existe une infinité de fonction qui passe par les valeurs échantillonnées aux instants  $kT_e$ . Toutefois, le théorème d’échantillonnage montre que pour les signaux à bande limitée, la reconstruction est possible.

### 1.3.2.2 Quantification

La quantification consiste à arrondir l’amplitude des échantillons sur  $N$ -valeur appelé échelle de quantification (voir figure 1.04). Pour cela, chaque niveau de tension est associé à une valeur binaire codée sur  $n$ -bit tel que :

$$N = 2^n \tag{1.05}$$



**Figure 1.04 :** *Quantification du signal échantillonné [1]*

La distance entre deux niveaux est appelé « pas de quantification », définie par :

$$q = \frac{2V_{max}}{2^n} \tag{1.06}$$

Le SNR qui évalue la qualité du signal transmis diminue, si l’amplitude du signal à transmettre diminue.

### 1.3.2.3 Codage binaire

La troisième étape de la numérisation est le codage binaire. Les  $2^n$  niveaux quantifiés sont représentés par des valeurs numériques codées par une suite de  $n$ -bits. Ainsi ce n'est pas la valeur des échantillons qui est transmise aux récepteurs mais la valeur codée du niveau quantifié le plus proche de lui.

Exemple : Pour la téléphonie le débit des échantillons étant de 8000 échantillons/seconde et chaque échantillon, étant codé sur  $n=8$  bits d'où le débit binaire  $D=64$  kbits/s

### 1.3.3 Codage source

Le codage permet de supprimer toute redondance sur certains éléments binaires ou peu significatif dans le message issu de la source d'information : c'est la technique de compression. Après codage source, le message est représenté à l'aide d'un nombre minimal de symbole.

Exemple : Pour une vidéo de 243 Mbits/s, si on utilise le codage MPEG-2, on a un débit de 4 Mb/s mais la qualité du signal est moindre.

L'objectif de la compression est de diminuer le nombre de bit transmis en préservant le message original.

On rencontre deux types de compression :

- Le codage sans perte
- Le codage avec perte

Un algorithme de compression sans perte restitue, après les opérations successives de compression et de décompression, une suite de bit strictement identique à l'original. Ils sont utiles pour les documents, les archives, les fichiers exécutables ou les fichiers textes. Avec un algorithme de compression avec perte, la suite de bit obtenue après les opérations de compression et de décompression est différente de l'original mais l'information restituée est en revanche voisine. Ce dernier est utile pour les images, sons et vidéos.

### 1.3.4 Codage canal

Dans la chaîne de communication, le codeur canal est situé avant le modulateur et le décodeur canal après le démodulateur. Le codeur canal procède comme suit : il met en correspondance un vecteur de  $n$ -bit à un vecteur de  $k$ -bit à son entrée, tel que  $k < n$  ; alors le vecteur en sortie du codeur contient une certaine redondance par rapport au vecteur d'entrée.

Le rendement de code  $R_c$  est le rapport qui est défini par :

$$R_c = \frac{k}{n} \quad (1.07)$$

L'objectif du codage canal est de fiabiliser la transmission c'est-à-dire minimiser la probabilité d'erreur ou d'avoir un rendement maximal. Dans ce type de codage appelé également codage détecteur et correcteur d'erreur, le concept consiste à introduire de nouveau de la redondance dans le message issu du codeur source pour pouvoir détecter et corriger les erreurs de transmissions.

On rencontre plusieurs sortes de codage canal tel que :

- Les codes en blocs
- Les codes convolutifs

### **1.3.5 Canal de transmission**

Le choix du canal de propagation est primordial durant la transmission. Il dépend de la qualité de transmission attendue et du coût de la transmission. En effet, si l'émetteur et le récepteur sont distants de plusieurs kilomètres, certains canaux sont adéquats que d'autre. Dans un autre plan, d'autres canaux disposent d'un débit de transmission plus élevé que d'autre. Ainsi plusieurs types de canal de propagation se sont succédés avec chacun ses particularités.

#### **1.3.5.1 Canal de propagation filaire**

C'est un canal où l'information est transmise par un signal électrique sous forme d'une onde électromagnétique se propageant à travers un câble métallique. C'est ce type de canal qui est utilisé en transmission en bande de base. Les trois types de ligne de transmission filaire sont :

- Câble paire torsadée :

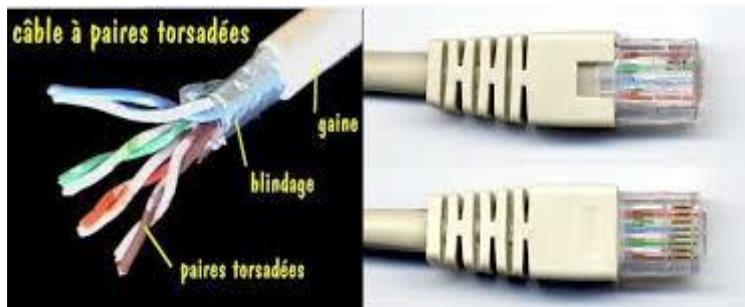
C'est un câble de bande passante faible et qui est réservé pour les transmissions à bas débit. L'enroulement des câbles réduit les conséquences des inductions électromagnétiques parasites dues à l'environnement (Figure 1.05).

L'utilisation courante de la paire torsadée est le raccordement des usagers au central téléphonique ou la boucle locale avec  $D < 2 \text{ Mbits/s}$ .

Son principal inconvénient est l'affaiblissement des courants d'autant plus important que le diamètre du conducteur est faible. Les paires torsadées contiennent à intervalle régulier des répéteurs qui génère les signaux.

Comme catégorie de câble PT, on rencontre les câbles UTP et STP. UTP étant une paire non blindée qui n'est pas entouré d'un blindage protecteur. C'est le type de câblage souvent utilisé

pour le téléphone et certain réseau informatique domestique. STP est une paire entourée d'une couche conductrice de blindage de façon similaire à un câble coaxial. Cela permet une meilleure protection contre les interférences. A part le service téléphonique standard, on peut transmettre les informations supplémentaires sur le réseau téléphonique. C'est le cas de la technologie ADSL qui permet de faire des transmissions à haut débit de l'ordre de 50Mbits/s dans le sens descendant.



**Figure 1.05 :** *Câble à paire torsadée*

– Câble coaxial

C'est un câble qui comparativement au précédent a une bande passante plus importante de 300kHz à 1GHz et permet de réaliser des transmissions avec un débit relativement élevé atteignant 565Mbits/s sur le réseau téléphonique. Elle est représentée par la Figure 1.06.

Son avantage par rapport au câble filaire réside dans le fait qu'il soit blindé et de présenter un milieu de propagation uniforme le long de la ligne.

Le câble coaxial est notamment utilisé pour connecter les centraux téléphoniques entre lequel transite un grand nombre de télécommunication.

Le débit maximal d'un câble coaxial dépend de sa longueur et des caractéristiques physiques des conducteurs. Sur 1km, un débit de plusieurs centaines de mégabit peut être atteint. Sur des distances  $> 10km$ , l'atténuation des signaux réduit considérablement le débit possible. C'est la raison pour laquelle on utilise la fibre optique pour les liaisons à grande distance.

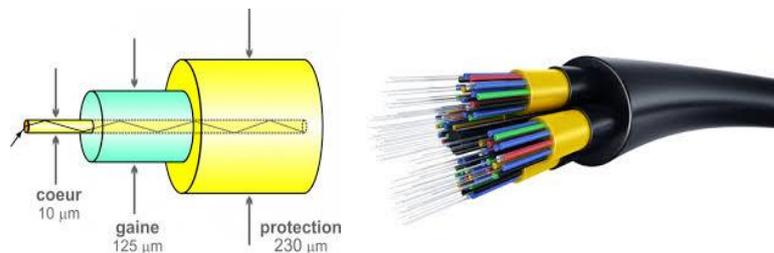


**Figure 1.06 :** *Câble coaxial*

– Fibre optique

La fibre optique supporte un réseau large bande par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision que le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques. La fibre optique dispose d'une bande passante de 30 THz à 1000 THz qui offre des débits de plusieurs dizaines de Gbits/s ainsi que leur faible atténuation qui sont de l'ordre de 0.2 dB/km pour  $\lambda = 1550nm$ . Entre autre, elle présente un diamètre extérieur de l'ordre de 0.1mm et d'un poids de quelques grammes au kilomètre qui la rend facile à utiliser.

Les points de régénération des signaux ne se font qu'à 200 km du fait de l'atténuation moindre de la lumière aux parasites électromagnétiques et aux écarts de température. C'est pourquoi la fibre optique constitue la plupart des artères de réseau de télécommunication et des réseaux locaux à très haut débit. La figure suivante montre les composants d'une fibre optique, à savoir le cœur, la gaine et sa protection.



**Figure 1.07 :** *Fibre optique*

1.3.5.2 Canal de propagation sans fil

– Canal radioélectrique

Ce milieu est généralement réservé aux communications mobiles, dans ce cas le signal y circule à travers une onde électromagnétique dont les lois de propagation sont déterminées par les équations de Maxwell. Les ondes radioélectriques correspondent à des fréquences comprises entre 10 kHz et 2 GHz.

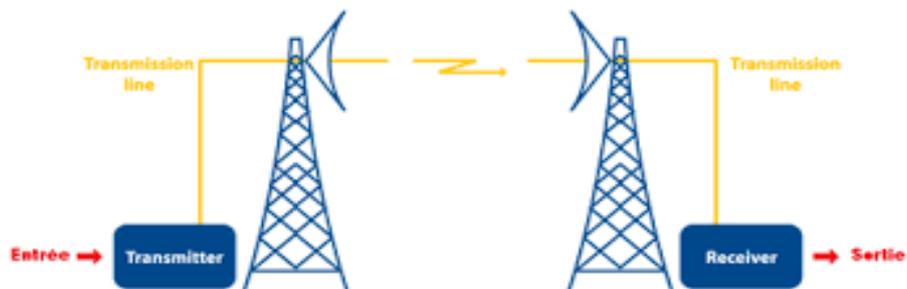
Au cours d'une transmission radio, la puissance reçue par le récepteur est régie par une équation appelé équation de Früs définit par :

$$P_r = P_e G_e G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1.08)$$

Où  $P_e$  est la puissance de l'antenne d'émission et  $G_e$  son gain ;  $P_r$  la puissance de l'antenne de réception et  $G_r$  son gain ;  $d$  la distance entre les deux antennes et  $\lambda$  la longueur d'onde du signal.

– Faisceau hertzien

Les faisceaux hertziens reposent sur l'utilisation des fréquences très élevées de l'ordre de 2GHz à 15GHz et même jusqu'à 40GHz. Ce sont des faisceaux directifs produits par des antennes directionnelles émettant dans une direction donnée. La propagation des ondes est limitée à l'horizon optique. La transmission se fait entre deux stations placées en hauteur c'est-à-dire au sommet d'une colline pour éviter les obstacles dus aux constructions. Les faisceaux s'utilisent pour la transmission par satellite ou pour constituer des artères de transmission longue distance dans les réseaux téléphoniques. Le synoptique d'une transmission par faisceau hertzien est le suivant :



**Figure 1.08 :** *Synoptique d'une transmission par faisceau hertzien*

La Figure 1.08 comprend un destinataire et un récepteur, qui sont les deux acteurs principaux de la transmission. Les OEM passent à travers le canal de transmission aérien pour l'échange d'information et qui s'effectue à vue directe.

### 1.3.6 Transmission

Quel que soit la nature du support, le signal désigne le courant, la lumière ou l'OEM transmise. Certaines caractéristiques du support telles que la bande passante, la sensibilité aux bruits et la limite des débits possibles perturbe la transmission. Leur connaissance est nécessaire pour fabriquer des bons signaux c'est-à-dire les mieux adaptés au support utilisé. Selon les techniques de transmission, un équipement spécifique est placé à chaque extrémité du support ; soit un modem, cet équipement fabrique des données binaires dont les caractéristiques sont adaptées au support de transmission.

#### 1.3.6.1 Valence

On appelle valence le nombre d'état significatif du signal numérique [2]

$$V = 2^n \quad (1.09)$$

Où  $n$  est le nombre de bit par état.

### 1.3.6.2 Débit binaire

Le débit binaire noté  $D$  se définit comme étant le nombre de bits transmis par seconde. Il s'exprime en « bits par seconde » :

$$D = \frac{1}{T_b} \quad (1.10)$$

Où  $T_b$  est la durée d'un bit.

Pour un alphabet, on a la relation fondamentale :

$$T = n \times T_b \quad (1.11)$$

Où  $T$  représente la durée d'un état.

### 1.3.6.3 Efficacité spectrale

L'efficacité spectrale d'une modulation se définit par le paramètre :

$$\eta = \frac{D}{B} \quad (1.12)$$

et s'exprime en « bit/s /Hz » où  $B$  est la largeur de la bande occupée par le signal modulé.

### 1.3.6.4 Rapidité de modulation

La rapidité de modulation ou débit symbolique est le nombre de symboles transmis par unité de temps. Il est mesuré en Bauds et est égal au débit binaire divisé par le nombre de bits représenté par chaque symbole.

$$R = \frac{D}{n} \quad (1.13)$$

Ceci indique qu'une utilisation plus efficace du spectre requiert l'augmentation du nombre de bits par symbole. D'où l'intérêt à utiliser des techniques de modulations numériques à plusieurs niveaux.

### 1.3.6.5 Constellation

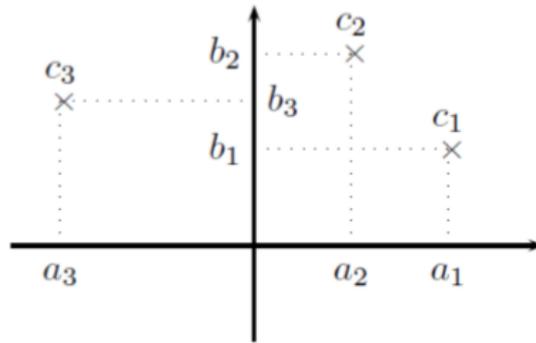
On appelle constellation (Figure 1.09), la représentation dans le plan complexe de chaque signal élémentaire :

$$c_k = a_k + jb_k \quad (1.14)$$

$$d_{i,j} = |c_i - c_j| \quad (1.15)$$

$$d = \min d_{i,j}, (i \neq j) \quad (1.16)$$

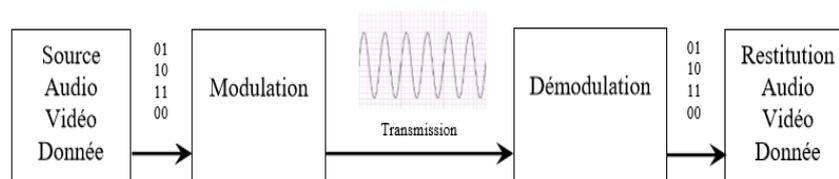
Plus la distance  $d$  est grande plus on assure un meilleur dispense aux erreurs. Plus le point  $c_k$  est proche de l'origine, moins on consomme de l'énergie.



**Figure 1.09 :** Constellation d'un signal [1]

## 1.4 Techniques de modulation numérique

Pour transférer un signal numérique par les ondes, on doit moduler ce signal. L'émetteur module le signal pour pouvoir le transporter. Le récepteur démodule le signal pour restituer le signal d'origine. (Figure 1.10)



**Figure 1.10 :** Exemple de transmission numérique [4]

La modulation consiste à modifier un ou plusieurs paramètres de la porteuse. Ces paramètres modifiables peuvent être :

- L'amplitude pour avoir la modulation par déplacement d'amplitude : ASK
- La fréquence pour avoir la modulation par déplacement de fréquence : FSK
- La phase pour avoir la modulation par déplacement de phase : PSK
- L'amplitude et la phase pour avoir la modulation d'amplitude en quadrature de phase : QAM

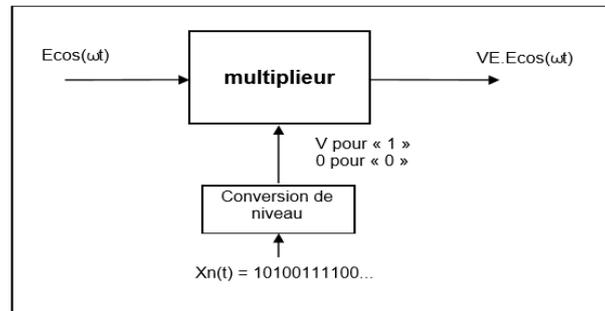
### 1.4.2 Modulation par déplacement d'amplitude (ASK)

#### 1.4.2.1 Principe de l'ASK

C'est la technique la plus simple et la plus naturelle pour moduler une porteuse sinusoïdale  $e(t) = E \cos(\omega t)$  par un signal numérique.

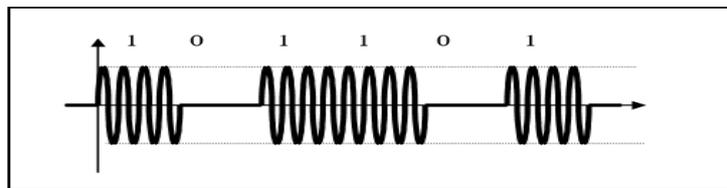
L'indice de modulation est en général 100%, ce qui explique que ce type de modulation s'appelle aussi modulation en tout ou rien (OOK).

La porteuse est simplement multipliée par le signal numérique  $X_n$ :



**Figure 1.11 :** Production d'un signal ASK [5]

Le signal modulé ASK a l'allure suivante :

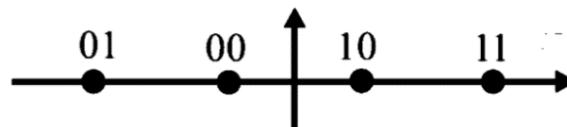


**Figure 1.12 :** Allure temporelle d'un signal ASK [5]

En modulation d'amplitude, le spectre du signal modulé est symétrique par rapport à la raie de la porteuse et les deux bandes latérales ont la même forme que le signal BF.

#### 1.4.2.2 Constellation de l'ASK à quatre états

La Figure 1.10 illustre la constellation d'une modulation par déplacement d'amplitude à quatre états.



**Figure 1.13 :** Constellation à 4 points [1]

C'est une modulation seulement sur l'axe I (en phase), mais avec plusieurs niveaux d'amplitude. Le Tableau 1.01 montre un exemple d'amplitudes possibles pour une modulation 4-ASK. Le premier bit est le signe et le second bit pour l'amplitude.

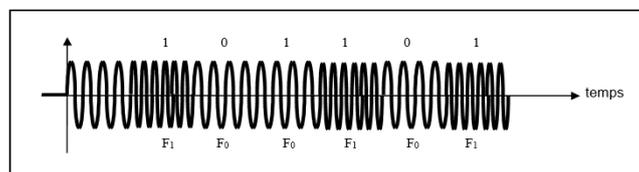
Binaire	Amplitude
00	-0.22
01	-0.66
10	+0.22
11	+0.66

**Tableau 1.01:** Les amplitudes possibles de la 4-ASK [1]

### 1.4.3 Modulation par déplacement de fréquence (FSK)

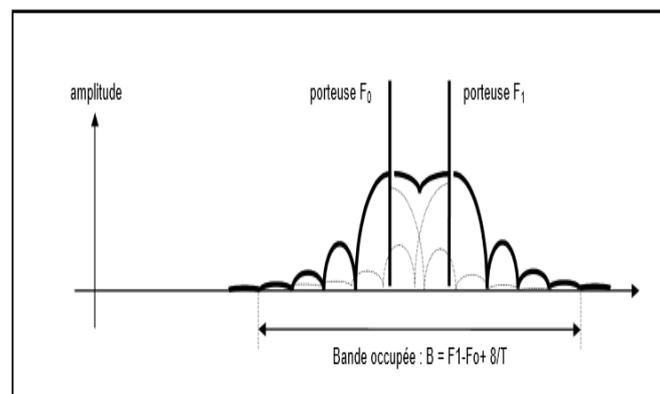
La porteuse est modulée en fréquence par le signal numérique, c'est-à-dire qu'elle saute d'une fréquence  $F_0$  (pour le « 0 ») à une fréquence  $F_1$  (pour le « 1 »).

L'allure est la suivante :



**Figure 1.14 :** Allure temporelle d'un signal modulé FSK [5]

On démontre que le spectre de ce signal modulé est en  $\sin(x)/x$  autour des deux fréquences  $F_0$  et  $F_1$ .



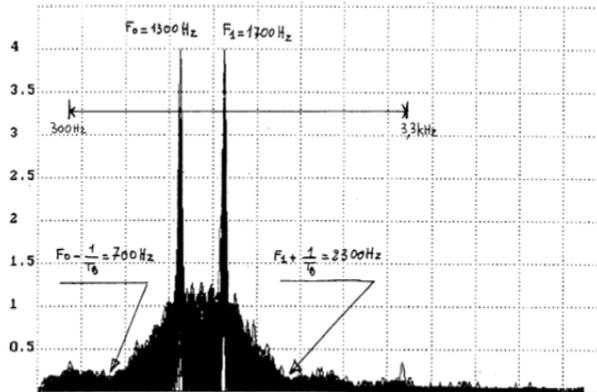
**Figure 1.15 :** Spectre d'un signal FSK modulé par un signal numérique non filtré [5]

Si on filtre le signal numérique pour limiter son spectre au lobe principal, la bande passante nécessaire à la transmission du signal se limitera évidemment à l'intervalle :

$$[F_0 - 1/T; F_1 + 1/T]$$

La modulation FSK est effectivement utilisée dans les modems à moyen débit comme celui du Minitel (standard V23) caractérisé par :

- Canal direct : modulation FSK avec un débit numérique  $D=1200\text{bits/s}$ , porteuse à  $1200\text{Hz}$  pour le « 1 » et à  $2200\text{Hz}$  pour le « 0 », bande occupée de 0 à  $3400\text{Hz}$ .
- Canal retour : porteuse à  $387\text{Hz}$  modulée en ASK avec un débit de  $75\text{bits/s}$ , bande occupée de  $312$  à  $462\text{Hz}$



**Figure 1.16 :** Relevé du spectre d'un signal FSK [5]

En conclusion, on constate que la modulation FSK conduit à un encombrement spectral supérieur à celui de l'ASK.

Ce type de modulation est cependant très utilisé pour des débits moyens à cause de sa bonne immunité aux parasites qui caractérise tous les systèmes fonctionnant en modulation de fréquence.

Mais la modulation FSK, comme d'ailleurs la modulation ASK, ne convient plus si on désire faire transiter des informations numériques avec un débit élevé sur un canal de largeur limitée. Exemple : Un son en stéréo de qualité CD est échantillonné à  $44.1\text{kHz}$  et codé sur 16bits, ce qui donne un débit  $D=1.41\text{Mbits/s}$ .

Le signal numérique est simplement filtré par un passe-bas de fréquence de coupure  $f_c=1.41\text{MHz}$  conservant le lobe principal.

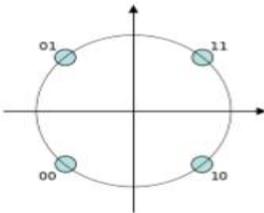
La porteuse modulée en numérique occupe une bande  $B=3.02\text{MHz}$ . Dans la bande FM actuelle qui va de  $88$  à  $108\text{MHz}$ , on pourrait donc loger seulement 6 émetteurs numériques de ce type. Si on veut rajouter le son numérique à un émetteur TV analogique, on dispose entre le haut du spectre de chrominance et la sous-porteuse son, un intervalle de  $500\text{kHz}$  environ, insuffisant pour placer la porteuse numérique définie précédemment.

### 1.4.4 Modulation par déplacement de phase (PSK)

#### 1.4.4.1 Principe de la PSK

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, voir le tableau suivant.

Numérique	Analogique	Phase	Cercle trigonométrique
11		$\frac{\pi}{4} = 45^\circ$	
01		$\frac{3\pi}{4} = 135^\circ$	
00		$\frac{5\pi}{4} = 225^\circ$	
10		$\frac{7\pi}{4} = 315^\circ$	

**Tableau 1.02:** Représentation spatiale des phases [4]

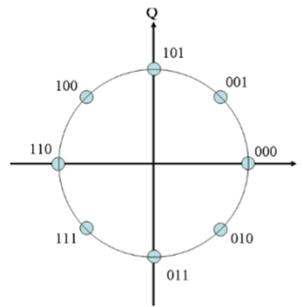
Ce type de modulation donne une porteuse présentant des sauts de phase de  $\pi$  à chaque changement de l'information binaire.

La modulation PSK est extrêmement robuste vis-à-vis des perturbations, est utilisée pour les communications spatiales lointaines telles que les transitions satellites DVB-S. Avec cette modulation on peut coder 2 bits car on a 4 phases différentes  $2^{2bits} = 4 \text{ phases}$ .

#### 1.4.4.2 Exemple de modulation 8-PSK

Les transmissions DVB-S2 permet la diffusion de vidéo en HD. La haute définition est plus gourmande en débit. C'est la modulation 8PSK qui est utilisée dans ce cas. Avec cette modulation on peut coder 3 bits car on a 8 phases différentes :  $2^{3bits} = 8 \text{ phases}$ .

La Figure 1.17 illustre la constellation d'une modulation par déplacement de phase à huit états.



**Figure 1.17 :** Constellation de 8-PSK [1]

### 1.4.5 Modulation Numérique QAM

#### 1.4.5.1 Principe de la QAM

Il est possible de combiner plusieurs types de modulation, c'est le cas du QAM. La modulation QAM combine la modulation d'amplitude et la modulation de phase.

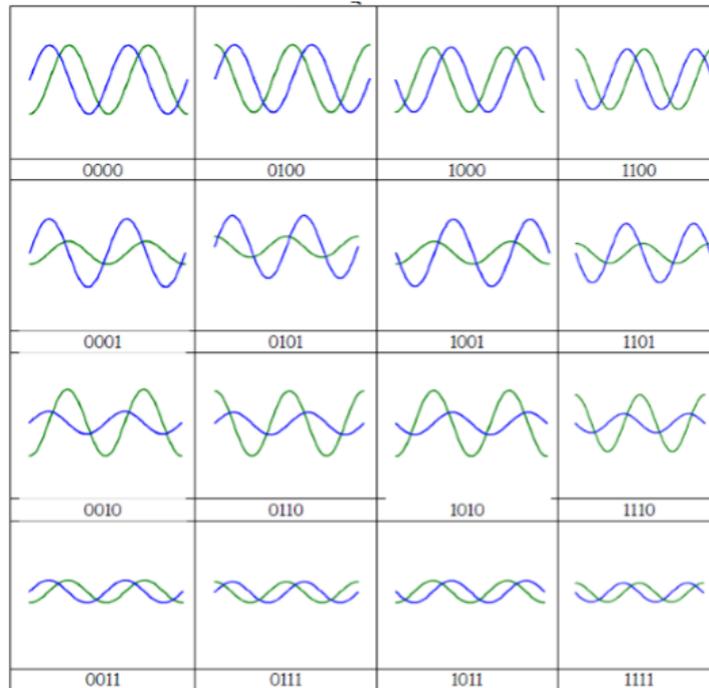
Le signal est modulé par deux porteuses en quadrature. C'est une modulation dite bidimensionnelle. Le signal modulé  $s(t)$  peut s'écrire de la façon suivante :

$$s(t) = i(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - q(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.17)$$

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

#### 1.4.5.2 Modulation 16-QAM

Les combinaisons possibles de la 16-QAM utilisées au niveau du système DVB-T sont décrites au niveau de la Figure 1.18.

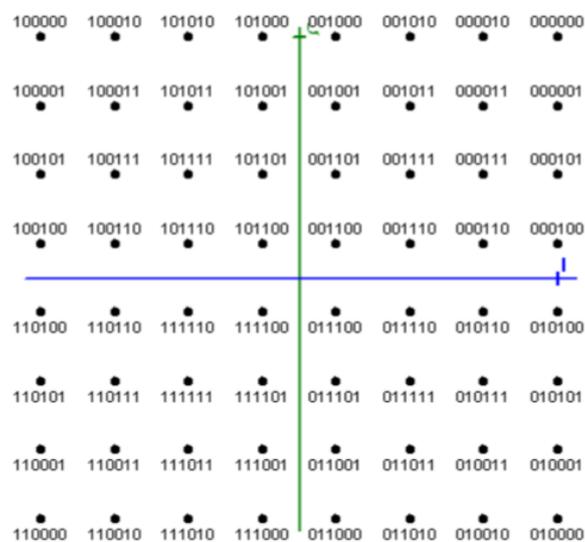


**Figure 1.18 :** Amplitudes et phases possibles de la 16-QAM [1]

### 1.4.5.3 Modulation 64-QAM

En augmentant la taille de la constellation, c'est à dire le nombre de valeurs d'amplitudes et de phases, on peut augmenter le nombre de bits à transporter.

Si on utilise la modulation 64-QAM, on obtient  $2^6 = 64$  combinaisons possibles d'où la constellation 64-QAM (Figure 1.19). Les combinaisons amplitudes phases possibles de la 64-QAM sont données au niveau du Figure 1.20.



**Figure 1.19 :** Constellation de la 64-QAM [1]

Déc	Binaire	Phase	Amplitude												
0	000000	45°	1.4	17	010001	324°	1.2	34	100010	126°	1.2	51	110011	225°	1.0
1	000001	36°	1.2	18	010010	306°	1.2	35	100011	135°	1.0	52	110100	188°	1.0
2	000010	54°	1.2	19	010011	315°	1.0	36	100100	172°	1.0	53	110101	203°	1.1
3	000011	45°	1.0	20	010100	352°	1.0	37	100101	157°	1.1	54	110110	191°	0.7
4	000100	08°	1.0	21	010101	337°	1.1	38	100110	169°	0.7	55	110111	211°	0.8
5	000101	23°	1.1	22	010110	349°	0.7	39	100111	149°	0.8	56	111000	262°	1.0
6	000110	11°	0.7	23	010111	329°	0.8	40	101000	98°	1.0	57	111001	259°	0.7
7	000111	31°	0.8	24	011000	278°	1.0	41	101001	101°	0.7	58	111010	247°	1.1
8	001000	82°	1.0	25	011001	281°	0.7	42	101010	113°	1.1	59	111011	239°	0.8
9	001001	79°	0.7	26	011010	293°	1.1	43	101011	121°	0.8	60	111100	225°	0.2
10	001010	67°	1.1	27	011011	301°	0.8	44	101100	135°	0.2	61	111101	252°	0.5
11	001011	59°	0.8	28	011100	315°	0.2	45	101101	108°	0.5	62	111110	198°	0.5
12	001100	45°	0.2	29	011101	288°	0.5	46	101110	168°	0.5	63	111111	225°	0.6
13	001101	72°	0.5	30	011110	342°	0.5	47	101111	135°	0.6				
14	001110	18°	0.5	31	011111	315°	0.6	48	110000	225°	1.4				
15	001111	45°	0.6	32	100000	135°	1.4	49	110001	216°	1.2				
16	010000	315°	1.4	33	100001	144°	1.2	50	110010	234°	1.2				

**Figure 1.20 :** Les combinaisons d'amplitudes et de phases (64-QAM) [6]

#### 1.4.5.4 Efficacité spectrale et débit binaire

Le Tableau 1.03 montre le gain obtenu sur le débit binaire et sur l'efficacité spectrale pour différents types de modulations x-QAM.

Nombre de symbole	x-MAQ	Débit binaire	Efficacité spectrale
1	2	D	$\eta$
2	4	2D	$2\eta$
4	16	4D	$4\eta$
6	64	6D	$6\eta$
8	256	8D	$8\eta$

**Tableau 1.03:** L'efficacité spectrale et le débit binaire de la modulation x-QAM

Notons que les modulations numériques les plus utilisées par le système DVB-T sont la QPSK, la 16-QAM et la 64-QAM.

## 1.5 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les critères d'analyse et de performance des systèmes de communication numérique tels que le SNR, le TEB et la probabilité de coupure. En plus, l'architecture d'un système de transmission numérique et aussi les quatre types de modulations numériques qui sont la modulation ASK, FSK, PSK et QAM.

## CHAPITRE 2 SYSTEME DVB-T

### 2.1 Introduction

Le DVB-T est la version terrestre du standard DVB utilisant la modulation OFDM pour transmettre un flux de données multiplexé MPEG-2 à travers un canal terrestre. Le signal OFDM est modulé en utilisant la transformée IFFT et démodulé en utilisant la FFT. La taille de la transformée IFFT/FFT est de 2048 pour le mode 2k et de 8192 pour le mode 8k qui représente le nombre maximal de porteuses permis. Le mode 2k est inclus dans le standard pour permettre à DVB-T d'être fonctionnel rapidement. En effet, un processeur FFT de taille 2048 points, pour le mode 2k est plus facile à implémenter que le processeur de taille 8192 points.

### 2.2 Synoptique et principe de fonctionnement

Le système DVB-T a pris les mêmes fréquences que celles utilisées par la télévision analogique dans la bande UHF pour diffuser les émissions de la TNT. A l'origine, cette bande a été divisée en canaux de largeur d'environ 8 MHz pour la TV analogique. Là où une seule chaîne analogique était transmise dans ce canal de 8 MHz, on peut aujourd'hui en diffuser 6 grâce à la numérisation des signaux.

Les signaux vidéo et audio des différentes chaînes sont numérisés, codés et organisés en un flux unique de données : on parle alors de multiplexage (ou multiplex). Un multiplex contient:

- 6 chaînes en définition standard (SD : 720×576 lignes ou 544×576 lignes) [7]
- 3 chaînes en haute définition (HD : 1920×1080 lignes, 1440×1080 lignes ou 1280×720 lignes). [7]

Un multiplex est caractérisé par un numéro de canal numéroté de 21 à 69. La relation qui permet de relier le numéro du canal à la fréquence centrale de la bande est :

$$F[\text{MHz}] = 306 + (8 \times \text{numéro canal}) \quad (3.01)$$

Il convient d'ajouter parfois un décalage de +166 kHz destiné à éviter les perturbations dans le canal voisin analogique.

Par exemple, la fréquence du canal 23 est de 490,166 MHz. Le codage du signal vidéo au format MPEG permet d'avoir pour une chaîne un débit utile de l'ordre de 4 Mbits/s. Un flux multiplex en résolution standard nécessite donc un débit de  $6 \times 4 \text{ Mbits/s} = 24 \text{ Mbits/s}$ .

Afin de diminuer la sensibilité au bruit, il est nécessaire d'introduire dans la trame numérique des codages supplémentaires (codages de Viterbi, Reed Solomon ...) correspondant à une

redondance de données. Ces codages permettent de corriger jusqu'à un certain point, les erreurs introduites par le canal de transmission. Sans entrer dans le détail de ces codes correcteurs d'erreur, cela revient à rajouter 16 octets à une trame de 188 octets d'information utile et à rajouter 1 bit pour 2 bits d'information utile.

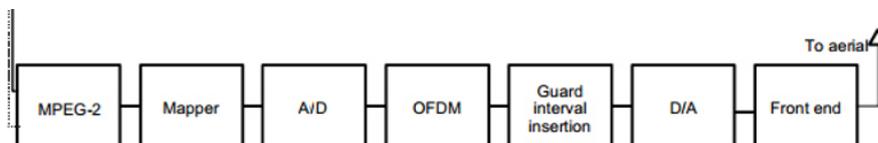
On définit ainsi un taux de  $2/3$  (code rate) qui correspond donc à 2 bits de données pour 3 bits transmis. Le débit passe alors de 24 Mbits/s d'information utile à 39 Mbits/s pour un multiplex. Cette trame numérique est transmise grâce à une modulation multi-porteuses OFDM.

Le nombre de sous-porteuse utilisées dans le canal de 8 MHz est de 6817 porteuses utiles (mode 8k) ou de 1705 porteuses utiles (mode 2k). Pour chaque porteuse, on utilise une modulation de phase et/ou d'amplitude (QPSK, 16-QAM ou 64-QAM, c'est-à-dire 2 à 6 bits par symbole).

Un intervalle de garde, c'est-à-dire une durée pendant laquelle aucun signal n'est transmis, est également rajoutée. Son rôle a pour but de réduire la sensibilité du système de réception aux échos ou aux trajets multiples. L'intervalle de garde est donc la période de silence introduite avant le début de chaque symbole.

Dans la norme DVB-T, celui-ci peut être égal à  $T_u/32$ ,  $T_u/16$ ,  $T_u/8$ , ou  $T_u/4$ , où  $T_u$  représente la durée d'un symbole. Il est alors noté  $1/32$ ,  $1/16$ ,  $1/8$ ,  $1/4$ .

Voici le schéma à blocs fonctionnels du standard DVB-T :



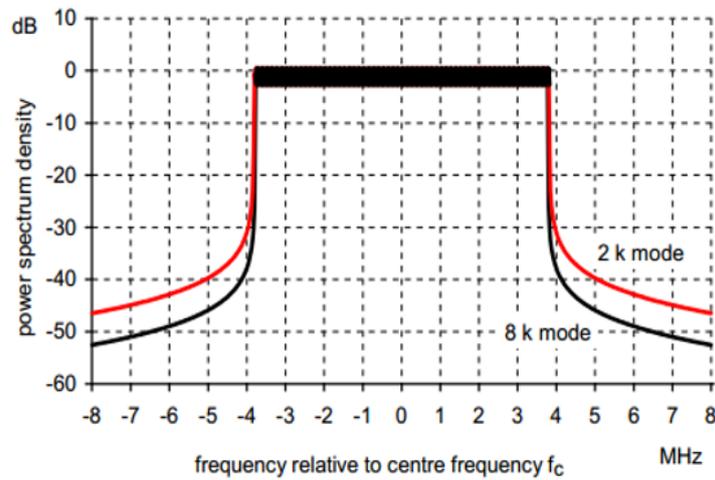
**Figure 2.01 :** Schéma à blocs fonctionnels du standard DVB-T [1]

Après un générateur de données, le bloc MPEG-2 est utilisé pour la compression de l'image et du son. Par la suite, il y a le bloc « mapper » qui effectue la modulation numérique en bande de base afin de placer les symboles numériques dans la constellation. Le bloc A/D est un convertisseur. Il effectue la conversion d'un nombre entier en un mot binaire. Nous passons ensuite au bloc OFDM qui applique la IFFT. Le bloc « Guard interval insertion » a pour but d'insérer un intervalle de garde entre les symboles. A la réception, les techniques inverses sont appliquées pour reconstruire le signal original

### 2.3 Caractéristiques du spectre

La densité spectrale de puissance est la somme des densités spectrales de puissance de toutes les porteuses. Le spectre théorique de signal DVB-T est illustré sur la Figure 2.02 (pour une

bande de 8 MHz). La bande passante nominale est de 7,608 259 MHz pour le mode 8k et 7,611 607 MHz pour le mode 2k.



**Figure 2.02 :** *Spectre théorique du signal d'émission DVB [8]*

Notons que dans un système DVB-T qui utilise le multiplexage par division de fréquence orthogonale (OFDM), toutes les porteuses de données sont modulées en utilisant soit QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Les valeurs exactes des points de constellation sont  $\epsilon+$  avec des valeurs de  $x$  et  $y$  données ci-dessous pour les diverses constellations:

- QPSK :  $x \in \{-1, 1\}, y \in \{-1, 1\}$
- 16-QAM :  $x \in \{-0.6, -0.2, 0.2, 0.6\}, y \in \{-0.6, -0.2, 0.2, 0.6\},$
- 64-QAM :  $x \in \{-7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7\}, y \in \{-7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7\}$

## 2.4 Paramètres techniques

Le choix des paramètres de transmission OFDM pour un système DVB-T dépend de l'application visée et des performances qu'on veut satisfaire. Les paramètres de transmission comprennent la largeur de bande du canal, le nombre de sous-porteuses, l'espacement entre les sous-porteuses et la durée de l'intervalle de garde.

La norme DVB-T prévoit l'utilisation de deux modes 2k ou 8k, les deux tableaux 2.01 et 2.02 représentent les différents paramètres utilisés.

Paramètres	Mode 2k		
Bande passante	8 MHz		
Nombre de porteuses	1704		
Espace entre sous porteuse	213 $\mu$ s		
Modulation	QPSK	16-QAM	64-QAM

Intervalle de garde	1/4	1/8	1/16	1/32
Nombre de symbole	100			
Chaîne de transmission	AWGN			

**Tableau 2.01: Mode 2k [1]**

Paramètre	Mode 8k			
Bande passante	8 MHz			
Nombre de porteuses	6816			
Espace entre sous porteuse	852s $\mu$ s			
Modulation	QPSK	16-QAM	64-QAM	
Intervalle de garde	1/4	1/8	1/16	1/32
Nombre de symbole	100			
Chaîne de transmission	AWGN			

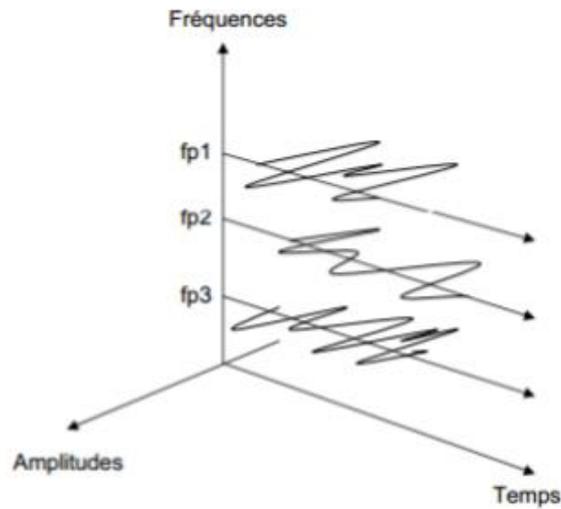
**Tableau 2.02: Mode 8k [1]**

## 2.5 Modulation multi-porteuses OFDM

### 2.5.1 Introduction

Le système de multiplexage en fréquence (FDM) est un système de transmission classique utilisé depuis les années 60 mène à une utilisation inefficace du spectre disponible. Vers la fin des années 60, la technique OFDM qui a été proposée, permet à l'utilisateur d'obtenir une meilleure efficacité spectrale due à l'orthogonalité des porteuses et au chevauchement fréquentiel des canaux.

En 1971, une grande partie de la recherche s'est concentrée sur le développement d'une transmission multi-porteuses (Figure 2.03) d'efficacité élevée, basée sur des porteuses « de fréquences orthogonales ». Les deux auteurs Weinstein & Ebert, ont appliqué la Transformée de Fourier Discrète (TFD) aux systèmes de transmission de données parallèles en tant qu'un élément du processus de modulation et de démodulation.

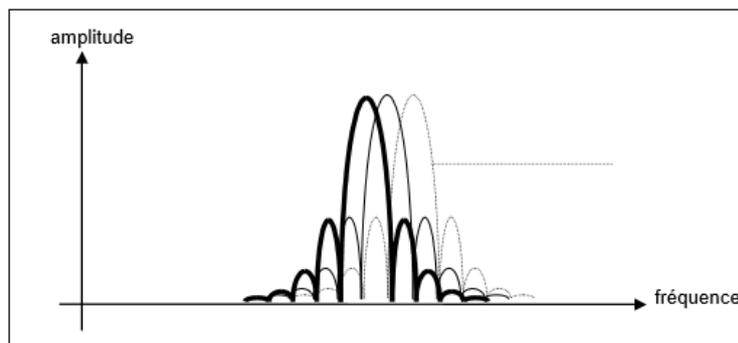


**Figure 2.03 :** *La modulation multi-porteuses [3]*

Ce type de modulation consiste à moduler en  $x$ -QAM ( $x$  étant choisi en fonction du compromis robustesse-débit recherché) un grand nombre  $N$  de porteuses par des symboles de durée  $T_s$ , l'écart entre deux porteuses étant de  $1/T_s$ .

Le signal binaire  $X_n(t)$  à haut débit  $D = 1 / T$  sera donc réparti sur  $N$  porteuses modulées par des signaux  $X_i(t)$  de débit  $N$  fois plus faible, soit par des débits de durée  $T_s$ ,  $N$  fois plus longue :

$$T_s = N \times T \quad (2.01)$$

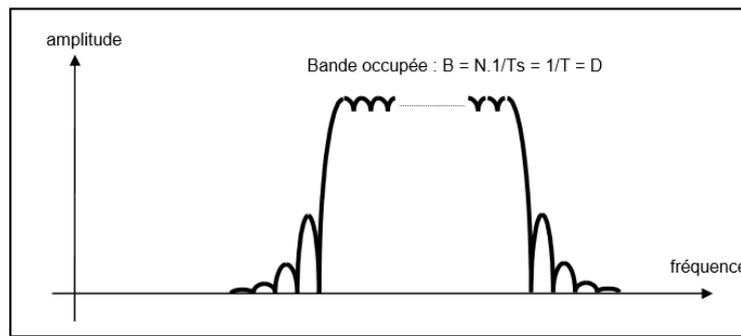


**Figure 2.04 :** *Construction du spectre d'un signal modulé avec plusieurs porteuses [5]*

Il est caractérisé par :

- Le spectre d'une porteuse en  $\sin(x)/x$
- Le spectre passe par 0 à  $1/T_s, 2/T_s, \dots$  de la porteuse
- Les différentes porteuses sont espacées de  $1/T_s$
- A la fréquence d'une porteuse, les autres spectres passent par 0

Le spectre résultant est quasi rectangulaire et occupe donc de façon optimale le canal alloué :



**Figure 2.05 :** *Spectre d'un signal OFDM [5]*

La modulation à porteuses multiples va se développer dans les années à venir puisqu'elle a été choisie pour les émissions de radio et de TV numérique terrestre.

On la trouvera aussi dans une nouvelle génération de Modems (modem ADSL), qui va s'affranchir de la limitation à 3.3 kHz imposée par des filtres placés aux points d'entrée du réseau téléphonique et utiliser la totalité de la bande passante (de l'ordre du MHz) de la liaison bifilaire reliant le particulier au central.

Le principal avantage de ce type de modulation est son excellent comportement en cas de réception à trajets multiples, ce qui est fréquent lors de la réception terrestre ou portable.

En effet, tant que le retard introduit par les trajets multiples reste inférieur à la durée d'un bit  $T_s$ , la réception n'est pas perturbée. Comme la durée  $T_s = N \times T$  est relativement grande du fait du grand nombre de porteuse utilisée, cette modulation est insensible à des différences de trajets importantes ou à des échos très longs.

Ceci permet aussi de faire travailler différents émetteurs diffusant le même programme sur la même fréquence, ce qui est un avantage considérable et permettrait de loger dans la bande TV-UHF actuelle pas moins de 50 chaînes différentes.

### **2.5.2 Principe de l'OFDM**

Le système OFDM est basé sur la modulation multi-porteuses consistant à transmettre des données numériques en parallèle, modulées sur un grand nombre de porteuses qui présentent une orthogonalité entre eux.

Mathématiquement, le système OFDM est basé sur la transformée de Fourier rapide, direct et inverse. La transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) est utilisée pour la génération de l'orthogonalité fréquentielle du signal OFDM, tandis que la transformée de Fourier rapide (FFT) est utilisée pour la détection et régénération des symboles à partir du signal OFDM reçu.

La transformée de Fourier rapide pour un signal discret sur une séquence de N échantillons est donnée par la formule suivante :

$$FFT(x_n) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-jn(\frac{2\pi k}{N})} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n W_N^{nk} \quad (2.02)$$

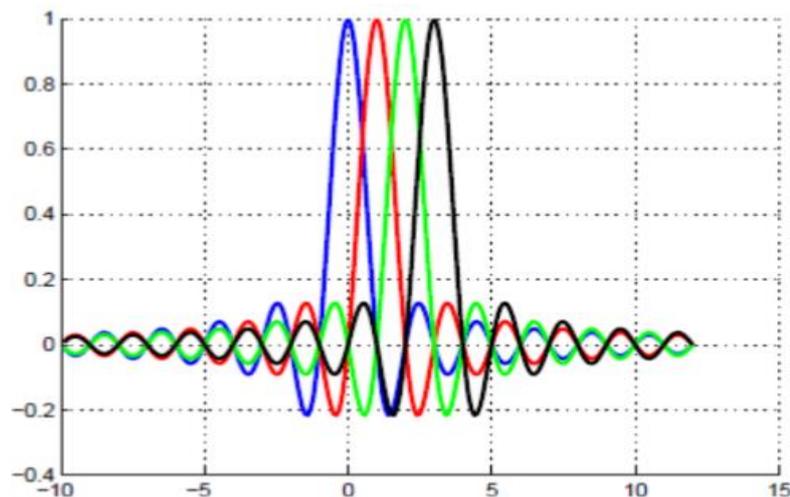
La transformée de Fourier rapide inverse pour un signal discret sur une séquence de N échantillons est donnée par la formule suivante :

$$IFFT(X_k) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{jk(\frac{2\pi n}{N})} = \frac{1}{N} \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} X_k W_N^{-nk} \quad (2.03)$$

Avec  $W_N^{nk} = e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}$

Notons que l'orthogonalité fréquentielle est la base du système OFDM. Cette propriété est utilisée afin d'éviter les interférences inter-symboles. Pour montrer l'orthogonalité de deux composantes, on calcule leur produit scalaire pour les signaux discrets :

$$\langle W_N^{nk_1}, W_N^{nk_2} \rangle = \sum_{n=0}^{N-1} W_N^{nk_1} (W_N^{nk_2})^* = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-jn(\frac{2\pi k_1}{N})} e^{jn(\frac{2\pi k_2}{N})} = \begin{cases} N & \text{si } k_1 = k_2 \\ 0 & \text{si } k_1 \neq k_2 \end{cases} \quad (2.04)$$



**Figure 2.06 :** Spectres de quatre porteuses orthogonales [9]

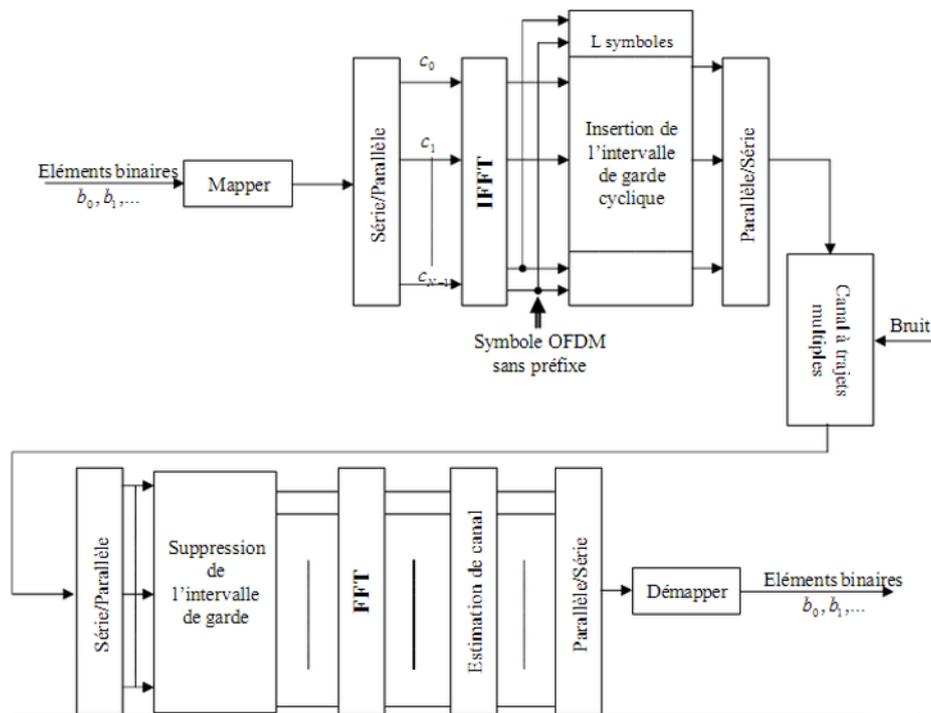
On obtient ainsi l'enveloppe spectrale représentée par la Figure 2.06. L'espace entre chaque sous-porteuse permet d'organiser les sous-porteuses de telle sorte qu'au maximum d'une porteuse donnée, les autres porteuses sont nulles: c'est la condition d'orthogonalité dans le domaine fréquentiel. Cette condition permet ainsi d'avoir une occupation spectrale idéale.

### 2.5.3 Un système de communication OFDM

Les bits de données à l'entrée sont modulés en x-MAQ qui génère des nombres complexes de N-symboles numériques discrets  $b(1), \dots, b(N-1)$ , où  $b(n) = x(n) + jy(n)$ .

On construit le vecteur  $B_n$  à partir de la transformée de Fourier discret des symboles  $b(0)$ .

La Figure 2.07 représente le diagramme en blocs d'un émetteur/récepteur OFDM. Le codeur M-QAM ou Mapper transforme les données binaires de durée en symboles complexes  $c_j$ . Après la conversion série/parallèle, ces symboles sont transformés en trames notées  $\{c\}_{1:N}$ . En appliquant ensuite une transformée de Fourier inverse IFFT, on obtient la trame parallèle OFDM formé de N symboles, notée  $\{S\}_{1:N}$ . Ensuite, un préfixe cyclique, formé des L derniers symboles  $S_n$ , est ajouté au début du symbole. Après la conversion parallèle/série on obtient le symbole OFDM à transmettre.



**Figure 2.07 :** Diagramme bloc d'un système OFDM [10]

Exemple : Pour la future TV numérique terrestre, on a choisi une modulation OFDM 8k, Soit  $N = 8 \times 1024 = 8192$  porteuses, dont 6818 effectivement utilisées.

L'espace entre les porteuses est de 1116 Hz et la durée du bit

$$T_s = 1/1116 = 896 \mu s$$

La bande totale occupée est de :

$$B = 6818 \times 1116 = 7.61 \text{ MHz}$$

La différence de trajet maximale L correspondant à la durée d'un bit s'écrit :

$$L = c \times T_s = 3 \cdot 10^8 \times 896 \cdot 10^{-6} = 270 \text{ km}$$

La modulation OFDM 8k permet donc d'émettre le même programme dans le même canal à condition que les différents émetteurs que peut capter un récepteur donné se trouvent à moins de 200km.

Cette condition est largement vérifiée dans la bande UHF analogique actuelle à cause de la portée limitée des émetteurs liée à la courbure de la Terre.

#### 2.5.4 Paramètres techniques

- Temps de garde

Le temps de garde noté  $T_G$  est la période pendant laquelle il n'y a aucune transmission équivalente à des symboles de valeurs nulles (zéro-padding).

L'intérêt de ce temps et d'éliminer les interférences inter-symboles. Ces interférences sont produites par la propagation du signal dans le canal de transmission.

L'inconvénient de l'intervalle de garde c'est qu'il réduit le débit binaire :

- Avant l'ajout du temps de garde :

$$D = \frac{qN}{T_s} \quad (2.05)$$

Où  $q$  est le nombre de bit par sous porteuse,  $N$  le nombre de sous porteuses et  $T_s$  est la durée d'un symbole OFDM.

- Après l'ajout du temps de garde :

$$D' = \frac{qN}{T_s + T_G} \Rightarrow D' < D \quad (2.06)$$

Pour que le débit binaire ne soit pas affecté, on peut augmenter la période du symbole  $T_s$  par rapport à  $T_G$ , ce qui donne  $D' \approx D$ .

- Préfixe cyclique

Pour éliminer les interférences inter-porteuses, le symbole OFDM est cycliquement étendu dans le temps de garde tel qu'on copie les  $M$  derniers symboles numériques au début de ce symbole.

#### 2.5.5 Limitations

La modulation multi-porteuse connaît aussi des limites à savoir :

- Par rapport à une modulation mono-porteuse, la modulation multi-porteuses ne devrait rien changer au débit total  $D = N \times D_N$ , à la bande occupée  $B = N \times B_N$  et au taux d'erreur en présence de bruit.
- En pratique, il faudra avoir une bande occupée  $B = N \times B_N$  ce qui est spectralement inefficace.

- La réalisation des N-modulateurs et démodulateurs indépendants est très difficile à réaliser

## 2.6 Méthodes de compression de données

Lorsque l'on veut transmettre un film ou une émission aux téléspectateurs, plusieurs étapes préliminaires sont nécessaires :

- Tout d'abord, les caméras et les microphones convertissent images et sons en signaux électriques de type analogique. Ceux-ci sont ensuite convertis en signaux numériques.
- Des données de commande et de confort sont ajoutées. Les données de confort fournissent au téléspectateur un ensemble d'informations utiles comme le télétexte par exemple ; les données de commande permettent de piloter l'émission, la transmission et la réception des données audiovisuelles. Toutes ces informations numériques génèrent un flux important de données. Quel que soit le type de support que l'on aura (câble, satellite, hertzien ...), il faudra compresser ce flux avant de le transmettre. La TNT utilisant le support hertzien, la compression est d'autant plus importante car le débit de données est très restreint. Dans le cas de la Télévision Numérique Terrestre, cette étape sera décrite par les normes du groupe MPEG.

MPEG, pour Motion Picture Expert Groupe, est un groupe de travail pour les standards de compression d'images animées, reconnu par l'ETSI. Le groupe MPEG a normalisé la norme du même nom et ses successeurs ; le MPEG2, MPEG4, MPEG 7, MPEG 21 ...

Dans la Télévision Numérique Terrestre seuls le MPEG2 et MPEG 4 sont utilisés. La norme MPEG2 a été utilisée dès le lancement de la TNT. Les chaînes ont diffusé dans un premier temps en définition standard (SD =720 x 576 lignes).

La norme MPEG4, utilisée ensuite par certaines chaînes, a permis de transmettre les émissions en haute définition. Ce nouveau standard (HD=1920 x 1080 lignes=2 073 600 pixels) apporte un piqué 5 fois plus élevé que la définition standard (SD) en 720 x 576 lignes.

Le but de ces normes est de définir les codages qui permettront de limiter le débit d'une source audiovisuelle. Il est à noter que la norme MPEG ne concerne que les images animées. Les autres données, audio et informationnelles, sont codées séparément puis rassemblées chez l'utilisateur. Comme le montre le tableau, on ne peut transmettre une source audiovisuelle brute.

	Définition Standard	TV HD	TNT
Débit total	216 Mbps	1152 Mbps	---
Débit utile	166 Mbps	885 Mbps	30 Mbps par multiplex

**Tableau 2.03: Débits normalisés [11]**

La norme MPEG s'appuie sur un grand principe : « Ne jamais transmettre un élément d'image déjà transmis ». Les principes de fonctionnement des normes seront expliqués par la suite.

### 2.6.2 Compression Vidéo MPEG2

MPEG1 fut le premier standard du groupement MPEG permettant de traiter une compression vidéo numérique. Le résultat est plus de 5 publications, qui forment le MPEG1. En 1993 les trois premières parties furent acceptées par l'ISO, et traitent des flux binaires de vidéo(Part1), son(Part2) et de leur multiplexage(Part3). La partie 4(1995) décrit une plateforme de tests pour vérifier la compatibilité sur tous les supports, et la partie 5(1998) est une implémentation de référence des algorithmes.

Le MPEG1 utilise une résolution de 352 pixels par 240 pixels, soit environ 85 000 pixels. Son débit binaire typique est de l'ordre de 1.5Mbps.

Les limitations du MPEG1 furent vite apparentes. Sa résolution limitée et sa qualité assez basse n'en faisait pas un standard capable de durer dans le temps face à l'évolution rapide des moyens informatiques et numériques. Sa standardisation finale se fait de 1998 à 2000, au travers de nombreux documents décrivant chaque partie du standard. En particulier, le MPEG2 laisse place à un bien plus large éventail de choix en ce qui concerne la résolution et le contrôle du débit binaire. Le MPEG2 comporte 9 parties comme indiqué sur le tableau suivant. A l'origine, il devait contenir 10 parties, mais la partie 9 fut abandonnée après que son utilité fût jugée faible; elle concernait la vidéo à « sample » égal 10 bits, c'est à dire avec un éventail de couleurs plus grand.

Document	Contenu	Année & Type
ISO/IEC 13818-1	Flux binaires système, multiplexage	2000
ISO/IEC 13818-2	Codage et compression des flux vidéos	2000
ISO/IEC 13818-3	Codage et compression des flux audios	1998
ISO/IEC 13818-4	Plateforme de vérification des flux	1998
ISO/IEC 13818-4	Correctif	1998/Cor 2

ISO/IEC 13818-4	Test des flux audio AAC	1998/Amd 1
ISO/IEC 13818-4	Adaptation de l'envoyeur à la cible de réception	1998/Amd 2
ISO/IEC 13818-4	Précision sur la conformité des flux audios	1998/Amd 3
ISO/IEC TR 13818-5	Code de référence pour l'encodage logiciel	1997
ISO/IEC TR 13818-5	Amendement, Codage AAC	1997/Amd 1
ISO/IEC 13818-6	Extension pour le DSM-CC	1998
ISO/IEC 13818-6	Correctif	1998/Cor 1
ISO/IEC 13818-6	Additions concernant la transmission à distance	1998/Amd 1
ISO/IEC 13818-6	Addition concernant l'interactivité	1998/Amd 2
ISO/IEC 13818-7	Référence codage AAC	1997
ISO/IEC 13818-7	Correctif	1997/Cor 1
ISO/IEC 13818-9	Reference pour le décodage matériel en temps réel	1996
ISO/IEC 13818-10	Conformité pour le DSM-CC	1999

**Tableau 2.04:** *Années de parution des documents et contenu à propos du MPEG2 [12]*

Cette norme de compression vidéo est très utilisée pour les DVD-Vidéo et la diffusion télévisuelle numérique par câble ou satellite. La définition d'image varie de 576 x 420 points à 720 x 576 points, avec un débit de 25 images par seconde. La compression MPEG-2 permet d'inclure des données autres que la vidéo elle-même. On peut ajouter des informations quant au numéro du canal, le titre du programme, la langue utilisé...

MPEG2 optimise la qualité par rapport au débit et décrit également le flux de transport (transport stream) audio vidéo. En général, cette technique de compression vidéo se fait en quatre étapes à savoir :

- Le pre-processing qui consiste à déterminer des éléments d'image non perçu en vision normale
- La compression spatiale où les blocs DCT sont convertis
- La compensation de mouvement y compris le codage des vecteurs de mouvements et le codage des différences de blocs
- La quantification qui contrôle les coefficients de compression

### **2.6.3 Compression Audio MPEG1-L2**

La compression audio utilise les propriétés de l'oreille humaine pour réduire le débit que nécessite un signal audio : on supprime les fréquences inaudibles par l'oreille humaine. La compression audio est de type MUSICAM. Standard qui encode et compresse le son des DVD-Vidéo. Les signaux générés peuvent ensuite être utilisable par la norme Dolby Digital. Celle-ci gère les sons multicanaux.

La durée d'une trame MPEG1-L2 basique est de 24 millisecondes pour une fréquence d'échantillonnage : 48 kHz, ce qui est équivalent à 1152 échantillons.

## **2.7 Correction d'erreur**

Comme les transmissions sont du type « broadcast », le récepteur ne peut pas envoyer un message à l'émetteur pour dire : « Je n'ai pas reçu le dernier message, pouvez-vous le retransmettre ? » C'est pour cela qu'on utilise le FEC. Il s'agit d'informations de correction d'erreurs diffusées en complément des informations signal. Elles permettent au récepteur de reconstituer le flot de bits si des pertes ou dégradation se produisent lors de la chaîne de diffusion.

Les FEC utilisés avec la modulation OFDM sont composés de plusieurs systèmes de corrections d'erreurs dont 2 principaux : le code de Viterbi et le codage Reed Solomon.

Le taux d'erreurs binaires (BER) est l'un des principaux paramètres à considérer pour apprécier la qualité de transmission d'un signal DVB. En DVB-T, il se mesure à trois niveaux après la démodulation:

- Avant chaque correction d'erreur (avant correction FEC interne), en tant que BER brut, généralement désigné « BER avant Viterbi ».
- Après la première correction d'erreur (après correction FEC externe). On parle alors de « BER après Viterbi » ou de « BER avant Reed Solomon ».
- Après la seconde correction d'erreur (après correction FEC externe). On parle alors de « BER après Reed Solomon ».

### **2.7.1 Code de Viterbi**

Le Code de Viterbi (Code Rate) est symbolisé par une fraction. C'est un code convolutif qui permet de lier un bit à un ou plusieurs bits précédents de sorte à pouvoir retrouver sa valeur en cas de problème. La fraction définit, dans un débit symbole donné, le rapport entre les données signal et les informations de corrections d'erreurs.

Exemple 2/3 : Dans ce cas, les 2/3 des symboles sont utilisés pour transmettre les données signal TV... et les 1/3 pour transmettre les informations de sécurisation de la diffusion.

### **2.7.2 Codage Reed Solomon**

Le code de Reed Solomon est un code correcteur basé sur les corps finis dont le principe est de construire un polynôme formel à partir des symboles à transmettre et de le sur-échantillonner. Le résultat est alors envoyé, au lieu des symboles originaux. La redondance de ce sur-échantillonnage permet au récepteur du message encodé de reconstruire le polynôme même s'il y a eu des erreurs pendant la transmission.

Il s'agit là d'un rajout d'informations d'origine mathématique lors de la diffusion. Une protection supplémentaire est réalisée par l'entrelacement des flux de données pour éviter qu'un bruit intempestif ne vienne interrompre le flux.

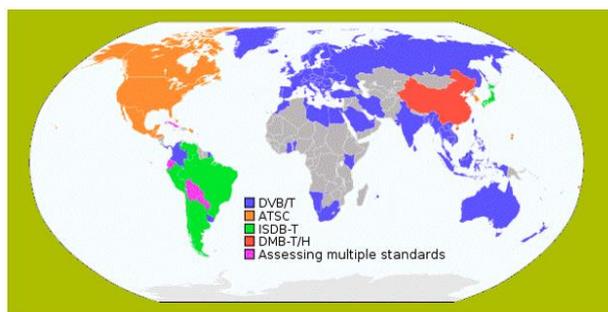
## **2.8 Application**

Deux grands types de diffusion existent pour la télévision ; la télévision dite analogique et celle dite numérique qui emploie le système DVB-T. La télévision analogique est apparue la première. Celle-ci est largement répandue dans le monde entier. Cependant ce type de diffusion est vieillissant et peu innovant. Pour cette raison la télévision analogique tend actuellement à disparaître pour laisser place à la télévision numérique. La télévision numérique s'inspire largement de la télévision analogique. Les modifications majeures concernent la compression des sources audiovisuelles et le mode d'acheminement de l'information audiovisuelle. La télévision numérique peut utiliser différents modes de diffusions :

- le satellite
- le câble, dans les grandes villes
- le réseau Internet, notamment grâce à l'avènement de l'ADSL
- le canal hertzien terrestre traditionnel

La Télévision Numérique Terrestre s'appuie sur le canal hertzien terrestre.

La figure suivante affiche la répartition des différentes normes mondiales de TNT.



**Figure 2.08 :** Répartition de différentes normes mondiales de TNT [13]

Pour le cas de Madagascar, la ville de Nosy-Be est désormais dotée d'équipements et d'infrastructures permettant l'utilisation des nouvelles technologies numériques. La pose de première pierre d'un grand pylône (Figure 2.09) et le lancement du projet Smart Nosy-Be se sont tenus le 5 novembre 2015. Nosy-Be est la première « ville numérique » à Madagascar. Cette appellation a déjà été évoquée, dans la foulée du basculement de notre Grande Ile, vers la TNT. Pour le pays, c'est une avancée notable dans l'objectif d'atteindre le « numérique pour tous ». En effet, Smart Nosy-Be est une initiative ambitieuse qui s'inscrit dans le cadre d'un renforcement des infrastructures locales, de la modernisation de l'administration publique, de l'amélioration sensible de la sécurité et dans l'accès du grand nombre au numérique.



**Figure 2.09 :** Infrastructure TNT à Nosy Be

## 2.9 Avantages

Les avantages de ce système sont :

- La qualité de l'image est meilleure qu'en analogique en raison de l'élimination des interférences visibles.
- Certaines chaînes peuvent diffuser leurs programmes en haute définition (HD).
- Beaucoup plus de chaînes peuvent tenir sur le même spectre dans la transmission numérique : ceci conduit à la fois à une augmentation du nombre de chaînes, ainsi qu'à la libération de certaines portions du spectre hertzien (dividende numérique).

- Des services interactifs peuvent être fournis.
- La transmission de la télévision en numérique est plus efficace en terme de consommation d'énergie que la transmission en analogique.
- L'émission en DVB-T est moins couteuse.

## **2.10 Evolutions**

Le DVB-T2, qui est une évolution de la norme DVB-T actuellement utilisée pour la diffusion de la télévision hertzienne terrestre en France, est une norme désormais bien définie, d'ores et déjà déployée dans plusieurs pays (Royaume-Uni, Suède, ...). Il ne fait pas de doute qu'elle sera largement adoptée pour ses performances à terme en Europe, et dans bien d'autres pays du monde.

Toutefois, il convient de rappeler les deux points suivants :

- Quelle que soit la technologie numérique de diffusion (DVB-T, DVB-T2, autre...), le débit total disponible par multiplex dépend fortement des choix des paramètres de planification. Il est, d'une part, directement lié aux choix du mode de réception que l'on cherche à garantir (réception sur les toits, en « portabilité » ou alors, réception en mobilité) et, d'autre part, au recours, de façon plus ou moins intensive, à la technique de planification dite « isofréquence ».
- Le passage au DVB-T2 impliquera le renouvellement complet du parc des récepteurs des téléspectateurs (les récepteurs DVB-T ne comprennent pas les signaux DVB-T2) ainsi qu'une intervention technique sur chaque émetteur TNT. La transition vers le tout DVB-T2 sera donc a priori assez comparable au passage au tout numérique, avec la nécessité de faire coexister, sur le terrain, des multiplex en DVB-T et d'autres en DVB-T2, et de mettre en place, le moment venu, un plan de transition.

## **2.11 Conclusion**

Le système DVB-T est un système de communication numérique. Donc les processus de compression de données (MPEG2 et MPEG1-L2) et de codage (code de Viterbi et codage Reed Solomon) sont indispensables. Précédemment, on a vu que le système DVB-T utilise la modulation multi-porteuses OFDM. Sa première application est la télévision numérique terrestre.

## CHAPITRE 3 SIMULATION DU SYSTEME DVB-T

### 3.1 Introduction

Dans le cadre de la présentation d'un mémoire, l'impétrant se doit toujours d'effectuer une simulation ou une réalisation afin de consolider ses recherches. C'est un peu comme le fruit de l'arbre qui est le corps tout entier du travail. Pour notre part, nous allons effectuer la simulation d'une transmission DVB-T sous Matlab. (Voir annexe2 la présentation du système DVB-T avec les blocs Simulink)

### 3.2 Présentation des interfaces graphiques

Le logiciel est composé de deux principales interfaces graphiques : l'interface d'accueil et l'interface de simulation.

#### 3.2.1 Interface d'accueil

L'interface d'accueil s'affiche en premier lorsqu'on lance le logiciel. Sa structure est la suivante :



**Figure 3.01 :** *Interface d'accueil*

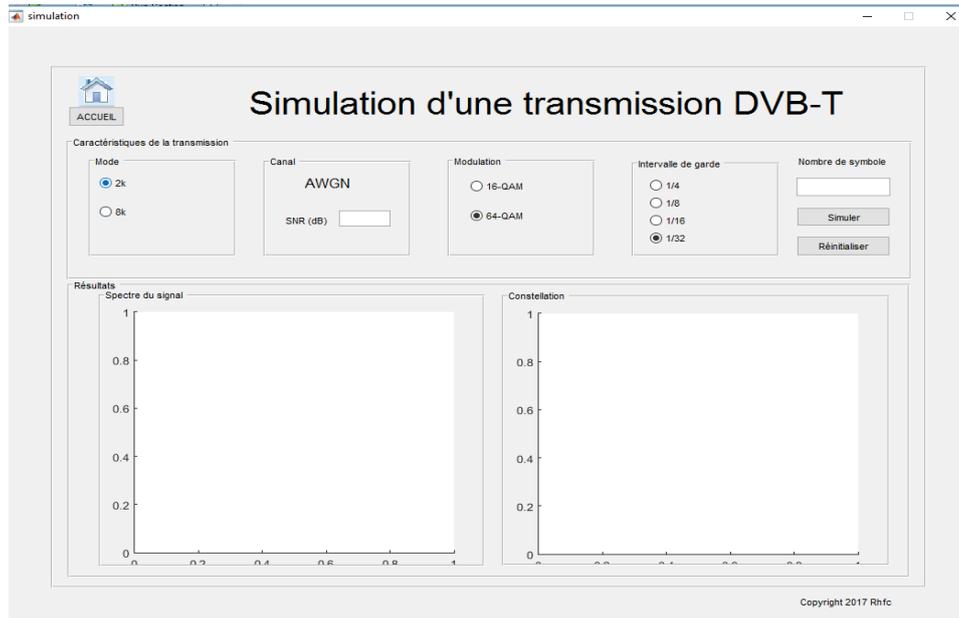
L'interface d'accueil contient tous les renseignements me concernant.

On trouve deux boutons sur cette interface :

- Le bouton « Simulation » qui sera une redirection vers l'interface de simulation
- Le bouton « Quitter » qui permet de fermer la fenêtre d'accueil.

### 3.2.2 Interface de simulation

La structure de l'interface de simulation est la suivante :



**Figure 3.02 :** *Interface de simulation*

Sur la figure ci-dessus, on peut voir à côté du titre un bouton de redirection vers la page d'accueil. L'interface de simulation est divisée en deux parties. La première partie regroupe les caractéristiques de la transmission telles que le mode de transmission, le canal de transmission AWGN avec le rapport signal sur bruit correspondant, la modulation x-QAM, l'intervalle de garde et le nombre de symbole à transmettre.

Le nombre de symbole affiché sur l'interface graphique correspond au nombre de symbole qu'on veut transmettre, c'est-à-dire le nombre de données à simuler.

La seconde partie est consacrée aux résultats de simulation. Cette dernière est composée de deux axes. L'un affiche le spectre du signal (voir Annexe1) et l'autre affiche la constellation du signal.

Toutes simulations ne démarrent pas sans avoir cliqué sur le bouton « Simuler ». Le bouton « Réinitialiser », comme son étiquette l'indique, réinitialise les valeurs de la SNR dans le canal AWGN et du nombre de symbole à transmettre.

## 3.3 Caractéristiques de la transmission

### 3.3.1 Mode de transmission

Le mode de transmission DVB-T se fait en mode 2k ou 8k d'où le choix imposé dans l'interface de simulation. Le mode 2k utilise 1705 porteuses et le mode 8k utilise 6817 porteuses. Il influe,

de par le débit binaire, sur la robustesse du signal vis-à-vis de certains types de bruits (bruits impulsifs, plus gênant sur un système à 2000 porteuses) et sur la facilité de réception en mobile (Limitation de la vitesse avec le système à 8000 porteuses). Le mode 2k est adapté pour l'opération de transmission avec un seul émetteur et au réseau mono-fréquence avec la puissance d'émission limitée. Le mode 8k peut être utilisé à la fois pour un seul émetteur et pour un large SFN.

### 3.3.2 Canal de transmission AWGN

AWGN ou Additive White Gaussian Noise ou Additif à Bruit Blanc Gaussien est un modèle de bruit basique utilisé dans la théorie de l'information pour imiter l'effet de nombreux processus aléatoires qui se produisent dans la nature.

Additif car il est ajouté à tout bruit qui pourrait être introduit à l'information.

Blanc se réfère à l'idée qu'il a une puissance uniforme à travers la bande de fréquence pour le système d'information. C'est un analogue à la couleur blanche qui a une émission uniforme à toute fréquence dans le spectre visible.

Gaussien car il a une distribution dans le temps avec une durée moyenne égale à zéro.

Un rapport signal sur bruit est associé à ce canal. Le code Matlab qui génère ce canal est le suivant :

$$Y = \mathbf{awgn}(X, \text{SNR})$$

L'utilisation de la fonction « awgn » sous Matlab nous mène au signal bruité noté Y. X étant le signal à bruite et SNR le rapport signal sur bruit.

### 3.3.3 Modulation x-QAM

La modulation choisie dans cette simulation est la modulation 16-QAM et 64-QAM. La modulation QAM ou Modulation d'amplitude en quadrature résulte de la combinaison de deux fréquences porteuses sinusoïdales déphasées l'une de l'autre de 90° (d'où le nom de quadrature). Elle peut aussi être vue comme une modulation de phase et d'amplitude. Elle permet d'obtenir des débits élevés avec une rapidité de modulation (R) relativement faible.

La QAM est donc intéressante à chaque fois que le canal de transmission est étroit. La 16-QAM utilise 4 bits par symbole. Pour la QAM à 64 points (64-QAM), chaque porteuse est modulée sur 8 niveaux d'amplitude (2 à la puissance 6). La rapidité de modulation R (en symboles par seconde) est divisée par 6. Les niveaux de ces deux porteuses permettent 64 combinaisons possibles au même instant, ce qui permet d'assigner 6 bits de données à chacune

d'entre elles. La 64-QAM délivre un débit nominal de 30 Mbit/s et de 27 Mbit/s utiles, mais elle n'autorise pas la mobilité, sauf si le nombre de canaux est restreint.

La QAM s'intègre facilement aux systèmes de détection et de protection contre les erreurs (codage en treillis, codage Reed Solomon, etc.) et est donc très appréciée pour la restitution de signaux numériques en milieu perturbé. En effet, la QAM a été choisie pour la distribution télévisuelle sur réseau câblé et pour la diffusion par satellite.

### 3.3.4 Intervalle de garde

L'augmentation de l'intervalle de garde permet d'absorber des échos plus longs, et facilite par conséquent la réalisation de certains réseaux ou plaques locales mono-fréquence (SFN). En effet, un intervalle de garde plus grand permet d'avoir des distances plus importantes entre les émetteurs d'un réseau mono-fréquence. Son augmentation entraîne la baisse du débit binaire.

A titre d'exemple (voir le tableau ci-dessous), l'augmentation de l'intervalle de garde de 28µs à 112 µs pour un système 64-QAM, 2/3 entraîne une baisse du débit de 2 Mbit/s.

		Débit binaire utile en Mbit/s pour les différents intervalles de garde			
Modulation	Rendement de code	$T_G = 1/4$	$T_G = 1/8$	$T_G = 1/16$	$T_G = 1/32$
		224 µs	113 µs	56 µs	28 µs
64-QAM	2/3	19.91	22.12	23.42	24.13
64-QAM	3/4	22.39	24.88	26.35	27.14

**Tableau 3.01:** Comparatif du débit binaire en changeant l'intervalle de garde

### 3.3.5 Conclusion

Pour conclure, voici un tableau récapitulatif de l'influence des paramètres de modulation sur le débit utile et la robustesse de la transmission.

Paramètres	Débit	Robustesse
Modulation	↗	↘
Intervalle de garde	↘	↗

**Tableau 3.02:** Influence des paramètres de modulation sur le débit utile et la robustesse de la transmission

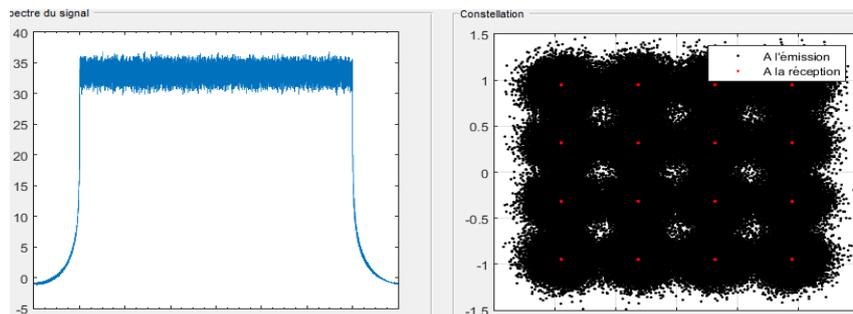
Le mode 2k et 8k n'a pas d'influence sur le débit. En 2k, on obtient une meilleure robustesse contre l'effet Doppler. En 8k, les effets du bruit impulsif sont moindres qu'en 2k.

### 3.4 Résultats de la simulation

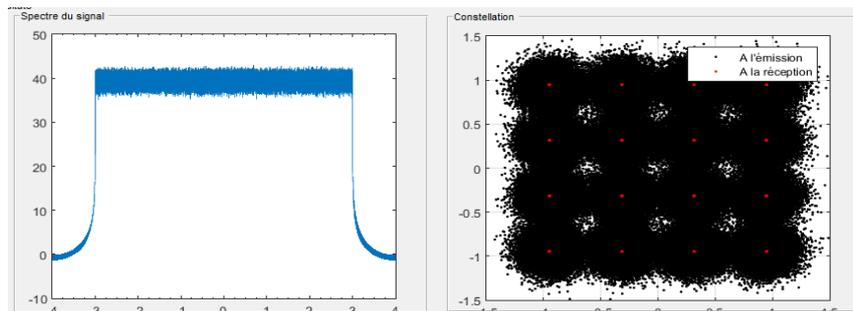
#### 3.4.1 Influence du mode de transmission

Lançons une simulation en variant le mode de transmission avec la configuration suivante :

- SNR : 45 dB
- Modulation : 16-QAM
- Intervalle de garde : 1/4
- Nombre de symbole : 50



**Figure 3.03 :** Mode 2k avec une modulation 16-QAM et un intervalle de garde 1/4



**Figure 3.04 :** Mode 8k avec une modulation 16-QAM et un intervalle de garde 1/4

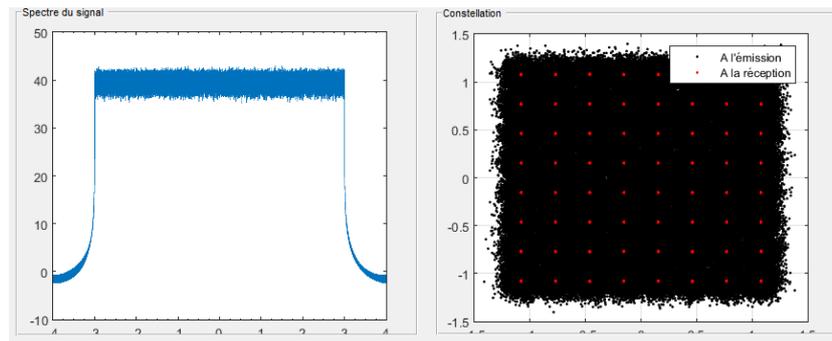
La Figure 3.03 représente le résultat en mode 2k et la Figure 3.04 le résultat en mode 8k. L'influence du mode de transmission se traduit par la diminution de la puissance du signal en mode 2k. Dans l'exemple, en mode 2k la puissance maximale du signal est de 35W tandis que en mode 8k elle est de l'ordre de 40W.

#### 3.4.2 Influence de la modulation

Lançons une simulation en variant la modulation avec la configuration suivante :

- SNR : 45 dB
- Mode : 8k
- Intervalle de garde : 1/4

- Nombre de symbole : 50



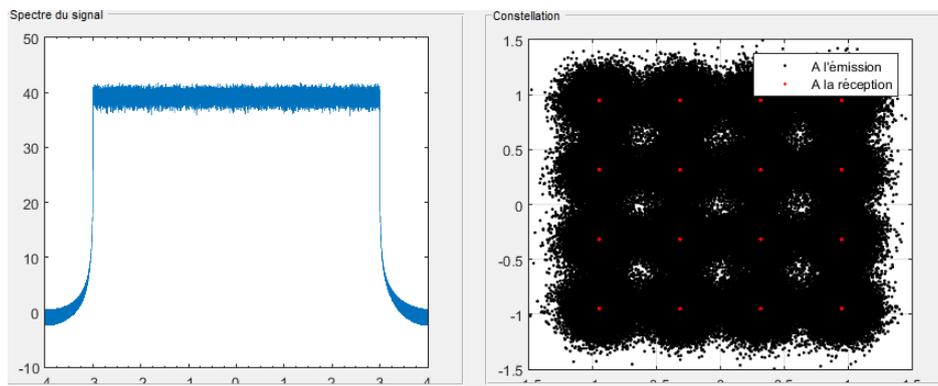
**Figure 3.05 :** Mode 8k avec une modulation 64-QAM et un intervalle de garde 1/4

Le résultat de la simulation en mode 8k avec une modulation 16-QAM et un intervalle de garde 1/4 a été déjà simulé précédemment et représenté par la Figure 3.04. Ceux avec la modulation 64-QAM est représenté par la Figure 3.05. Nous remarquons que l'influence de la modulation sur la transmission est le changement du nombre de constellation : 16 avec la modulation 16-QAM et 64 avec la modulation 64-QAM. Dans le chapitre précédent, on a vu que le débit augmente avec le nombre de constellation du signal mais la robustesse diminue.

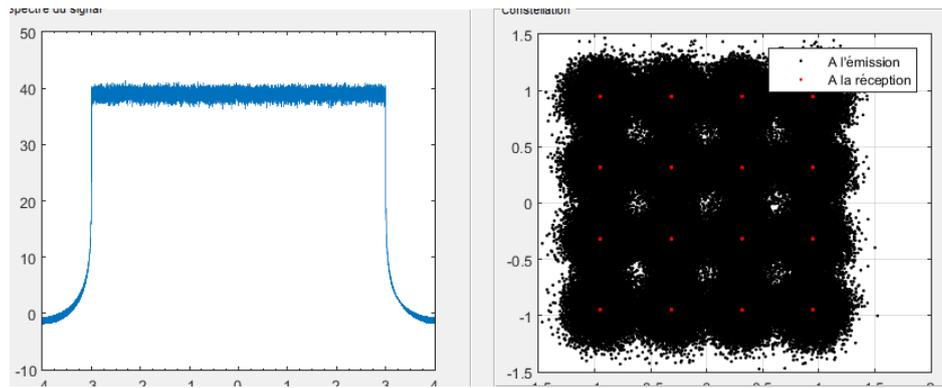
### 3.4.3 Influence de l'intervalle de garde

Lançons une simulation en variant l'intervalle de garde avec la configuration suivante :

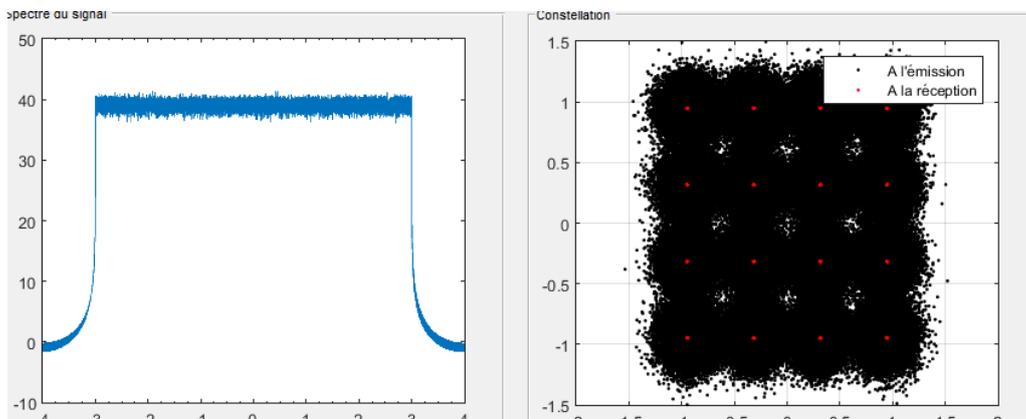
- SNR : 45 dB
- Mode : 8k
- Modulation : 16-QAM
- Nombre de symbole : 50



**Figure 3.06 :** Mode 8k avec une modulation 64-QAM et un intervalle de garde 1/8



**Figure 3.07 :** *Mode 8k avec une modulation 64-QAM et un intervalle de garde 1/16*



**Figure 3.08 :** *Mode 8k avec une modulation 64-QAM et un intervalle de garde 1/32*

Les trois figures ci-dessus avec la figure 3.03 nous montrent l'influence de l'intervalle de garde sur la transmission DVB-T. On peut conclure que le changement de l'intervalle de garde influe la constellation c'est-à-dire la modulation. Il influe donc le débit et la robustesse du signal. Plus l'intervalle de garde augmente plus le débit diminue.

### 3.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, un logiciel de simulation d'une transmission DVB-T développé sous Matlab a été présenté. Des paramètres techniques sont en jeu tels que le mode de transmission (2k ou 8k), le rapport signal sur bruit à introduire dans le canal AWGN, la modulation (16-QAM ou 64-QAM), l'intervalle de garde et le nombre de symbole à transmettre. Ces paramètres ont une influence sur la transmission. Que ce soit sur le débit binaire ou sur la robustesse du signal.

## CONCLUSION GENERALE

Pour conclure, un système DVB-T est l'évolution de la technologie télévisuelle, de l'analogique à la numérique. Dans la première partie, nous avons vu les critères d'analyse et de performance des systèmes de communication numérique tels que le taux d'erreur binaire, le rapport signal sur bruit et la probabilité de coupure. Un système de communication numérique est composé d'une source numérique, d'un codeur source, d'un codeur canal et d'un modulateur avant de passer dans le canal de transmission. Si la source n'est pas numérique, il serait nécessaire de passer au processus d'échantillonnage, de quantification et de codage binaire : c'est ce qu'on appelle la numérisation. Ensuite, on a vu la modélisation d'une chaîne de transmission DVB-T, les méthodes de compression de données et les techniques de codage utilisé. Sans oublier, la modulation multi-porteuses OFDM. Dans le dernier chapitre, un logiciel de simulation d'une transmission DVB-T a été présenté. Ce logiciel nous a permis d'étudier l'influence des paramètres techniques sur ce type de transmission. Actuellement, le système DVB-T est dans son plein essor. L'apparition du DVB-T Second Generation ou DVB-T2 en est la preuve. Il utilise les normes MPEG4 et le HEVC pour avoir des images HD (Haute Définition) dont la plupart des usagers veulent. Le système DVB-T2 étant déjà très performant, qu'est-ce que le système DVB-T nous réserve ?

## ANNEXES

### ANNEXE 1

Extrait de code Matlab qui permet d'afficher le spectre du signal d'une transmission DVB-T

```
% Les Paramètres du système DVB-T
```

```
% Longueur de la IFFT
```

```
N = 1704;
```

```
% Nombre des points de la constellation MAQ
```

```
M = 16;
```

```
% Nombre de zero padding pour la FFT
```

```
NZ = N/4+1;
```

```
% Préfixe Cyclique
```

```
CP = 1/4;
```

```
% Bande passante
```

```
BP = 8;
```

```
% Nombre de symbole
```

```
S = 100 ;
```

```
% Longueur du spectre
```

```
SpectreFFT = 2*N;
```

```
Spectre = 20*log10(mean(abs(fft(ModZIC(:,:))./mean(std(ModZIC)),SpectreFFT),2));
```

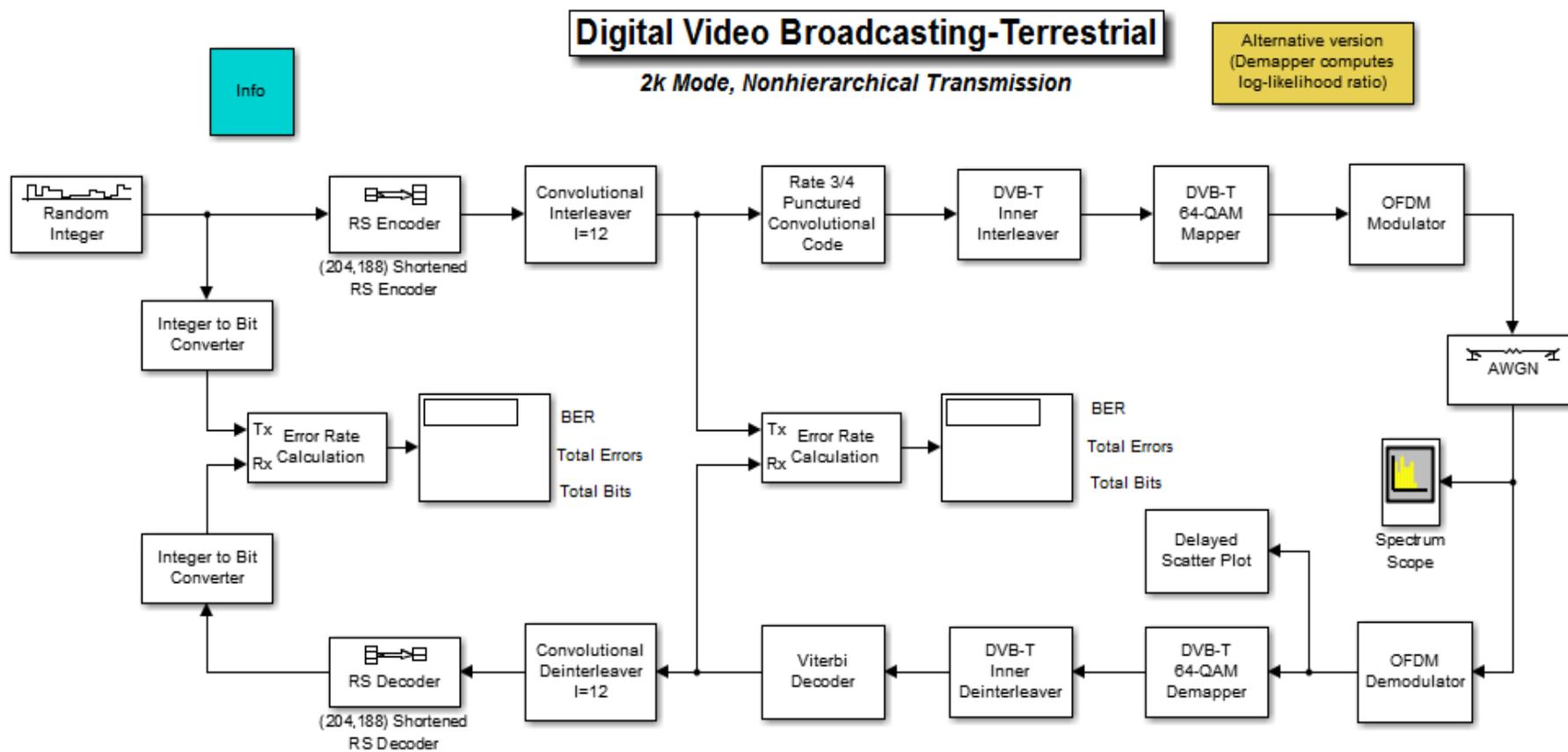
```
Freq = linspace(-BP/2,BP/2,length(Spectre));
```

```
Figure
```

```
plot(Freq,[Spectre(length(Spectre)/2:length(Spectre));Spectre(1:(length(Spectre)/21))]);
```

## ANNEXE 2

La figure suivante est le modèle Simulink du système DVB-T qui est déjà intégré dans Matlab 2015.



Copyright 2006-2014 The MathWorks, Inc.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Jaouad « *Etudes technique de la chaîne DVB-T* », Université Sidi Mohammed ben Abdallah, Faculté des Sciences et techniques, FES Département de Génie Electrique, Thèse soutenue le 14 Juin 2013.
- [2] S. Haingomalala « *Communication numérique* », cours S6, Institut d'Enseignement Supérieur-Antsirabe Vakinankaratra, AU: 2015-2016.
- [3] Y.S Yameogo « *Etudes de nouvelles techniques d'estimation et d'égalisation de canal adaptées au système* » SC-FDMA. THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES, Thèse soutenue à Supélec le 30 Septembre 2011.
- [4] Chamelot « *Modulation des signaux numériques* », Mars 2013.
- [5] J.P Muller « *Les modulations numériques dans les systèmes de communication* », Décembre 2000.
- [6] L.Hanzo « *Quadrature Amplitude Modulation* », From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems Second Edition. Second edition. Copyright @2004.
- [7] Thierry « *TP TNT (Terrestre et Satellite)* », Université Paul Sabatier, Janvier 2016.
- [8] JTC « *ETSI EN 300 744: Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television* », Juin 2004.
- [9] C. Weiss « *La TNT* », Université de Bordeaux, Septembre 2011.
- [10] C. Alexandre et D. Le Ruyet « *Modulations multiporteuses* », cours ELE207, Conservatoire National des Arts et Métiers, Janvier 2008.
- [11] Thibaud Levrard « *TNT: Télévision Numérique Terrestre* », Institut Universitaire de technologie de TOURS, Département Génie électrique et Informatique Industrielle, Octobre 2005.
- [12] P. Kenji « *Technique de compression vidéo des standards MPEG* », Université de Nice Sophia Antipollis.
- [13] J.P Muller « *La TNT* », Physique appliquée, Mai 2010.
- [14] P. Ciblat « *Diffusion numérique: le DVB-T* », Université Paris-Saclay et Telecom ParisTech, France, Octobre 2015.
- [15] G. Laurent « *Audio Video* », Mars 2010.

## PAGE DE RENSEIGNEMENT

**Nom :** RAKOTONDRAHASY

**Prénoms :** Hantaniaina Felana Christelle

**Adresse :** Lot 0502B151 Ampanataovana Antsirabe

e-mail: [felanachristelle@gmail.com](mailto:felanachristelle@gmail.com)

Tel : +261 33 63 868 11/ +261 32 26 842 64



**Titre du mémoire :**

« ETUDE DE LA PERFORMANCE D'UNE TRANSMISSION DVB-T »

**Nombres de pages :** 43

**Nombres de tableaux :** 09

**Nombres de figures :** 37

**Mots-clés:** numérisation, DVB-T, TNT, OFDM, modulation, multi-porteuses, Matlab

**Encadreur :** RANDRIANANDRASANA Marie Emile

e-mail: [emile3marie@gmail.com](mailto:emile3marie@gmail.com)

Tel : +261 33 82 445 35

## **RESUME**

Actuellement, le monde est en pleine évolution et est en route vers la numérisation, surtout dans le domaine de la télécommunication et de l'informatique. Sachant que le principal rôle d'un système de télécommunication est la transmission d'information à distance : soit par l'analogique, soit par la numérique. Mais vu la vulnérabilité de la transmission analogique par rapport aux bruits, les chercheurs ont pu trouver une solution : c'est le passage à la transmission numérique. Le système DVB-T en fait partie. C'est un système de transmission télévisuelle numérique, connu aussi sous le nom de TNT. Il utilise la compression de donnée MPEG et la modulation multi-porteuses OFDM. A travers cet ouvrage, j'ai pu illustrer l'importance du logiciel de simulation Matlab.

Mots-clés : numérisation, DVB-T, TNT, OFDM, modulation, multi-porteuses, Matlab.

## **ABSTRACT**

Currently, the world is changing and is on the way of digitalization, especially in the field of telecommunications and computing. Knowing that the main role of a telecommunication system is the transmission of remote information : either by analog, or by digital. Given the vulnerability of analogue transmission to noise, researchers have been able to find solutions : it is the transition to digital transmission. The DVB-T system is a part of it. It is a digital television transmission system, also known as TNT. It uses MPEG data compression and multicarrier modulation OFDM. Through this book, I was able to illustrate the importance of the simulation software Matlab.

Keywords : digitalization, DVB-T, OFDM, modulation, multicarrier, simulation, Matlab.