

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude**  
**Pour l'obtention du diplôme de Licence Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**  
Filière : **Télécommunications**  
Spécialité : **Télécommunications**

---

---

**Etude d'un système de transmission multi-porteuses**

---

---

Présenté par :

**BOUKARA Rostom**

**TAIR Abdallah**

Sous la direction de :

**Dr. IKNI Samir**

Juin2021

## *Remerciements*

*En premier lieu, nous remercions **Allah** soubhanouhou wa taala de nous avoir donné la volonté, pour terminer ce travail dans les meilleures conditions.*

*Nous tenons à remercier très sincèrement avec une profonde gratitude notre encadreur **Dr. IKNI Samir** qui nous a encadré tout au long de ce travail, et pour sa disponibilité pour diriger le projet et sa grande compréhension.*

*Nous remercions les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail.*

## *Dédicace 1*

*Je dédie ce mémoire à celle qui m'a mis au monde, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à **ma mère** et puis **mes sœurs** et **mon frère** pour leur amour.*

*Je tiens à remercier tous les enseignants de notre département TLC et ELN qui ont contribué à notre formation.*

*Un grand Merci à tous mes amis et mes collègues de TLC Guelma.*

**Boukara Rostom**

## *Dédicace 2*

*Je dédie ce mémoire à mon cher père, à mon excellente mère, dont le mérite, le sacrifice et les qualités humaines qui m'ont aidé et permis de vivre ce jour de succès. A mes frères et mes sœurs à tous les gens qui m'aiment de près ou de loin.*

**Tair Abdallah**

## *Table des matières*

<i>Introduction générale.....</i>	<i>1</i>
<b><i>Chapitre I : Modulations mono-porteuse</i></b>	
<i>I.1 Introduction.....</i>	<i>2</i>
<i>I.1.1 Modulation numérique mono-porteuse.....</i>	<i>2</i>
<i>I.1.2 principe de la modulation mono porteuses.....</i>	<i>3</i>
<i>I.2 La modulation d'Amplitude ASK.....</i>	<i>3</i>
<i>I.2.1 définition.....</i>	<i>3</i>
<i>I.2.2 expression temporelle.....</i>	<i>3</i>
<i>I.2.3 Taux de modulation : m .....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.4 Etude fréquentielle de la modulation d'amplitude.....</i>	<i>5</i>
<i>I.2.4.1 Cas d'un signal modulant sinusoïdal.....</i>	<i>5</i>
<i>I.2.4.2 Cas d'un signal modulant quelconque.....</i>	<i>6</i>
<i>I.2.5 Bande occupée.....</i>	<i>6</i>
<i>I.2.6 Différentes modulations d'amplitudes.....</i>	<i>6</i>
<i>I.2.6.1 modulation d'amplitude sans porteuse.....</i>	<i>7</i>
<i>I.2.6.2 modulation d'amplitude à bande latérale unique.....</i>	<i>7</i>
<i>I.2.7 Démodulation d'amplitude.....</i>	<i>9</i>
<i>I.3 La modulation de fréquence FSK.....</i>	<i>9</i>
<i>I.3.1 expression temporelle dans le cas d'un signal modulant quelconque.....</i>	<i>9</i>
<i>I.3.2 expression temporelle dans le cas d'un signal modulant sinusoïdal.....</i>	<i>10</i>
<i>I.4 La modulation de phase PSK.....</i>	<i>11</i>
<i>I.4.1 expression temporelle dans le cas d'un signal modulant quelconque.....</i>	<i>11</i>
<i>I.4.2 expression temporelle dans le cas d'un signal modulant sinusoïdal.....</i>	<i>11</i>
<i>I.5 Les intérêts de modulation.....</i>	<i>12</i>
<i>I.6 conclusion.....</i>	<i>12</i>

## **Chapitre II :Modulations multi-porteuses**

<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>13</b>
<b>II.2 Modulations multi-porteuses.....</b>	<b>13</b>
<b>II.2 .1 Aperçu sur la modulation multi-porteuses.....</b>	<b>13</b>
<b>II.2.2 Systèmes de modulation multi-porteuse.....</b>	<b>14</b>
<b>II.2.3 Champs d'applications de l'OFDM.....</b>	<b>14</b>
<b>II.2.4 Multiplexage.....</b>	<b>14</b>
<b>II.2.5 Multiplexage FDM.....</b>	<b>15</b>
<b>II.3 Modulation Multi-porteuse à base de fréquences orthogonales (OFDM).....</b>	<b>16</b>
<b>II.3.1 Historique.....</b>	<b>16</b>
<b>II.3.2 Canal multi-trajets.....</b>	<b>16</b>
<b>II.3.3 Présentation de l'OFDM.....</b>	<b>17</b>
<b>II.3.4 Principe de la modulation OFDM.....</b>	<b>18</b>
<b>II.3.5 Schéma de principe et expression du signal transmis de l'OFDM.....</b>	<b>19</b>
<b>II.3.6 Notion d'orthogonalité.....</b>	<b>20</b>
<b>II.3.7 Interférences entre les symboles.....</b>	<b>21</b>
<b>II.3.9 Avantages de l'OFDM.....</b>	<b>21</b>
<b>II.3.10 Applications de l'OFDM.....</b>	<b>22</b>
<b>II.4 Conclusion.....</b>	<b>22</b>

## **Chapitre III :Simulations**

<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>23</b>
<b>III.2 Simulation et évaluation de préfixe cyclique sur les performances du système OFDM.....</b>	<b>24</b>
<b>III.3 Conclusion.....</b>	<b>28</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>29</b>

## **Bibliographie**

## *Introduction générale*

De nos jours, dans un monde de très grande mobilité, la vitesse et la capacité des systèmes de transmissions sont des éléments essentiels afin de pouvoir maintenir les gens du monde entier en communication. Les premiers systèmes de communications numériques étaient basés sur la modulation mono-porteuse. En général, lorsque l'on veut augmenter le débit d'une transmission, on doit diminuer la durée de symbole. Cependant, en présence d'un canal radio on se trouve confronté au problème dit le « multi-trajet » qui a comme effet d'introduire des interférences inter-symboles (IES), ce qui nécessite, à la réception, une égalisation très complexe.

Ainsi, grâce à leur capacité de faire face à la sélectivité fréquentielle des canaux de transmission, les modulations multi-porteuses ont attiré l'attention des chercheurs. Actuellement, la modulation basée sur les fréquences orthogonales OFDM est la plus répandue. Ceci grâce à sa simplicité d'implémentation et à son efficacité et robustesse.

La technique de modulation appelée multi porteuses se base sur la transmission des données numériques simultanément en les modulant sur un grand nombre de porteuses, c'est la technique de multiplexage en fréquence qui existent depuis longtemps. L'objectif de la modulation multi porteuses OFDM était ainsi d'augmenter l'efficacité spectrale en exploitant au maximum la plage fréquentielle par l'orthogonalisation des porteuses, ce qui permet d'obtenir une meilleure exploitation spectral de la bande passante qui est une ressource rare et coûteuse.

Le principal objectif de ce mémoire est d'étudier les deux systèmes de modulation à savoir à mono-porteuse et à porteuses multiples.

Par conséquent, le plan de ce mémoire est le suivant :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude de la modulation mono-porteuse, on va présenter les trois types de modulation mono-porteuse et les intérêts de modulation.
- Le deuxième chapitre est dédié à l'étude de la modulation multi-porteuse, on va présenter un aperçu sur les modulations multi-porteuses en général, puis la modulation multi-porteuse à base de fréquences orthogonales (OFDM) en expliquant leurs principes et leurs avantages.
- Le troisième chapitre qui représente notre partie de programmation Matlab afin de simuler la performance en BER d'une liaison OFDM et l'impact du préfixe cyclique dans l'amélioration de qualité de transmission.

On clôture notre mémoire par une conclusion générale.

*Chapitre I :*  
***Modulation mono-porteuse***

### 1.1. Introduction

Dans le domaine de télécommunication il y a deux méthodes essentielles pour transmettre un signal analogique ou numérique à savoir la transmission en bande de base et la transmission par modulation. Cependant il est impossible de transmettre un signal à basse fréquence en bande de base sur de longues distances, où on doit utiliser un signal à haute fréquence qu'on l'appelle porteuse, dans lequel on place l'information à transmettre, c'est ce qu'on appelle « modulation ».

La modulation est une technique utilisée en télécommunication pour adapter le signal à transmettre, parole, son, image au canal de propagation. Il s'agit de faire varier un des trois paramètres (amplitude, phase, fréquence) de cette onde porteuse en fonction du signal à transmettre. Le dispositif qui effectue cette opération est appelé modulateur. La démodulation est l'opération inverse effectuée à la réception pour récupérer le signal en bande de base d'origine.

Dans ce chapitre, on va présenter les trois types de modulation mono-porteuse ainsi que ses intérêts.

#### 1.1.1 Modulation numérique mono-porteuse

Dans la transmission mono-porteuse les données sont transmises de façon séquentielle sur une seule bande autour d'une fréquence porteuse comme le montre la Figure I.1.

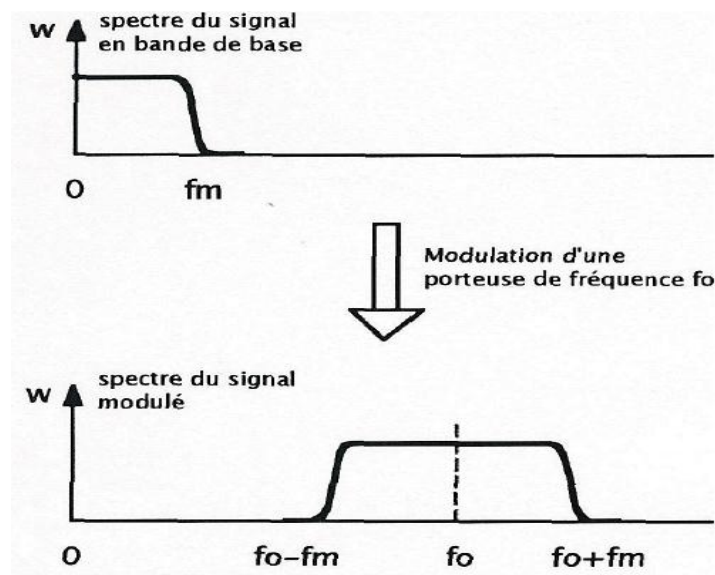


Figure I.1 : Format de modulation à porteuse unique.

Malheureusement, cette technique introduit des interférences entre symboles lorsqu'on est en présence d'un canal multi-trajets.



Les types de modulation numérique sont distingués selon la variation des paramètres du signal porteur. Les paramètres du signal porteur qui peuvent être modifiés sont : l'amplitude, la phase et la fréquence. Par conséquent, les trois techniques fondamentales de modulation numérique sont :

- Modulation à déplacement d'amplitude ASK (Amplitude Shift Keying).
- Modulation à déplacement de fréquence FSK (Frequency Shift keying).
- Modulation à déplacement de phase PSK (Phase Shift Keying).

### ***1.1.2 Principe de la modulation mono-porteuse***

Une onde porteuse est utilisée pour transporter le signal d'information sur des distances relativement importantes. Ce signal d'information sous forme de bits ou symboles est appelé modulant tandis que la porteuse est dite signal modulé.

Nous abordons tout d'abord la transmission en bande de base d'un message numérique constitué par une suite de symboles  $S_q$  émis à un débit de  $1/T$  symboles par seconde. Dans le cas d'une transmission mono-porteuse, le signal en sortie de l'émetteur a pour expression :

$$S(t) = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} x[q] \cdot h_{TX}(t - qT)$$

Où  $T$  est la durée du symbole et  $h_{TX}(t)$  est la forme d'onde à l'émission (en général un filtre demi-Nyquist). Le signal émis est alors transmis dans un canal de propagation.

## ***1.2 La modulation d'Amplitude ASK***

### ***1.2.1 définition***

La modulation d'amplitude consiste à faire varier l'amplitude d'un signal de fréquence élevée en fonction d'un signal à basse fréquence. Ce dernier est celui qui contient l'information à transmettre (voix, par exemple, recueillie par un microphone), le premier étant le signal porteur dit « porteuse ».

### ***1.2.2 expression temporelle***

La modulation d'amplitude (AM pour « Amplitude Modulation » en anglais) consiste à inclure le signal information  $b(t)$  dans l'amplitude de la porteuse.

Ainsi, on a :

- La porteuse :  $p(t) = A_P \cos(\omega_P t + \varphi_P)$

- Le modulant (signal d'information) :  $b(t) = \cos(\omega_b t + \varphi_b)$

- Le signal modulé soit donc :  $S_{AM}(t) = (A_P + K \cdot b(t)) \cos(\omega_P t + \varphi_P)$

Où  $K$  est un facteur de proportionnalité, souvent appelé sensibilité du modulateur.

Le terme  $(A_P + K \cdot b(t))$  est appelée l'enveloppe de de signal AM.

La figure I.2 suivante montre l'exemple d'un signal utile  $b(t)$  de forme sinusoïdale qui va moduler l'amplitude d'une onde porteuse.

On remarque que les variations de signal modulant sont traduites par la forme de l'enveloppe du signal modulé ou son amplitude.

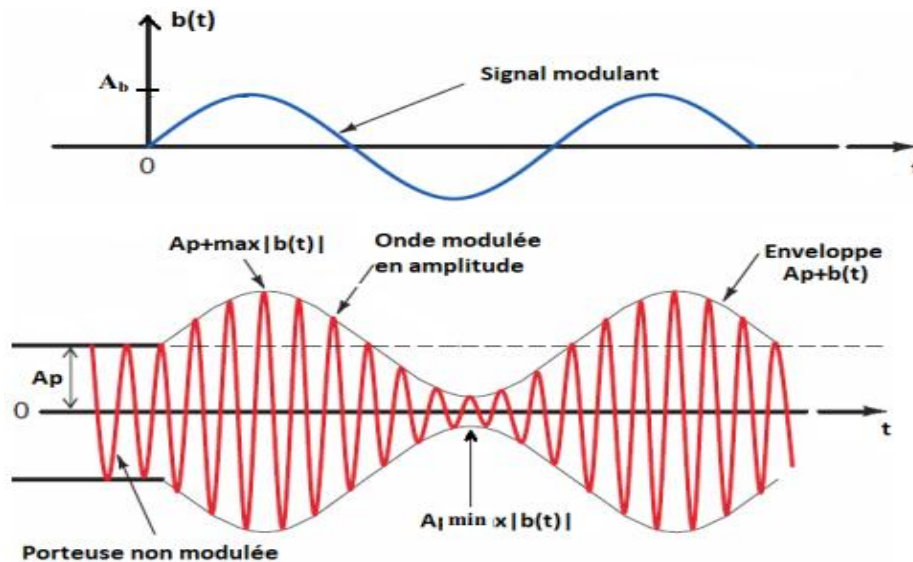


Figure I.2 : La forme temporelle de la modulation d'amplitude.

### I.2.3 Taux de modulation

Dans le cas où le signal modulant est un signal sinusoïdal, on obtient :

$$S_{AM}(t) = (A_P + K \cdot A_b \cos(\omega_b t + \varphi_b)) \cos(\omega_P t + \varphi_P)$$

On peut réécrire cette expression comme suit :

$$S_{AM}(t) = A_P (1 + m \cos(\omega_b t + \varphi_b)) \cos(\omega_P t + \varphi_P)$$

Avec :  $m = K \cdot A_b / A_P$  est le taux de modulation, qui est caractéristique du modulateur. Il représente l'amplitude du signal modulé par rapport à l'amplitude de la porteuse. Sur la figure I.3, on représente différentes valeurs de  $m$ .

$$m = \frac{A_b}{A_P} \times 100\%$$

Si  $A_b > A_P$  alors  $m > 100\%$ , on dit qu'il s'agit d'une sur-modulation. Dans ce cas l'enveloppe du signal AM ne représente pas la forme de signal modulant et la démodulation devient plus compliquée.

Pour avoir une bonne modulation, il faut que :

$$0 < m < 1 \text{ et } f_p > 100 f_b$$

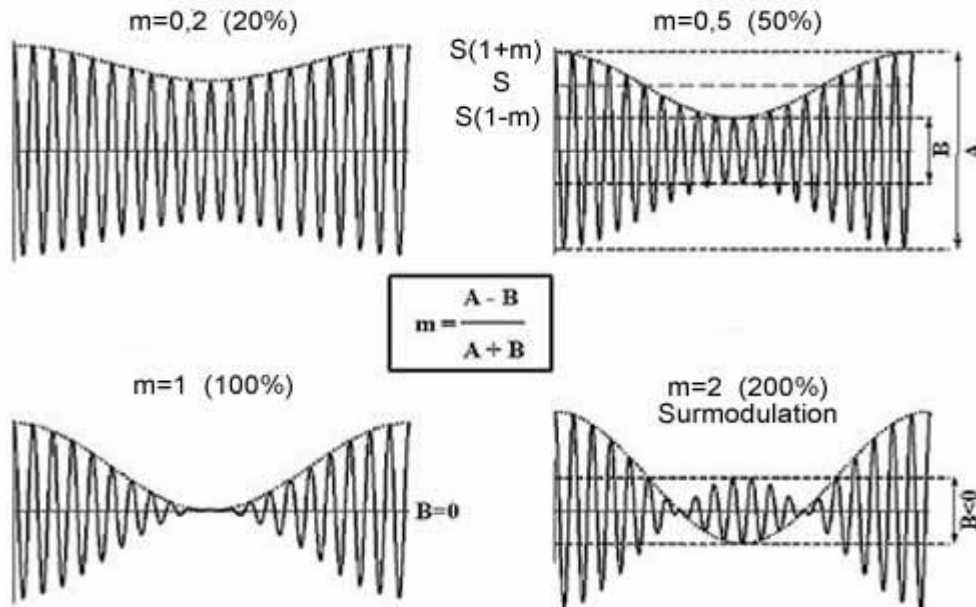


Figure I.3 : Signal modulé pour différents taux de modulation.

## 1.2.4 Etude fréquentielle de la modulation d'amplitude

### 1.2.4.1 Cas d'un signal modulant sinusoïdal

Pour l'étude spectrale du signal de sortie du modulateur, on peut arranger l'expression précédente sous la forme suivante :

$$S_{AM}(t) = A_P \cos(\omega_P t + \varphi_P) + m A_P / 2 \cos(2\pi(f_p + f_b)t + \varphi_P + \varphi_b) + m A_P / 2 \cos(2\pi(f_p - f_b)t + \varphi_P - \varphi_b)$$

Le signal AM contient trois composantes fréquentielles :

- La porteuse :  $A_P \cos(\omega_P t + \varphi_P)$
- Une bande latérale supérieure (BLS) :  $m A_P / 2 \cos(2\pi(f_p + f_b)t + \varphi_P + \varphi_b)$
- Une bande latérale inférieure (BLI) :  $m A_P / 2 \cos(2\pi(f_p - f_b)t + \varphi_P - \varphi_b)$

La figure I.4 illustre ces trois composantes.

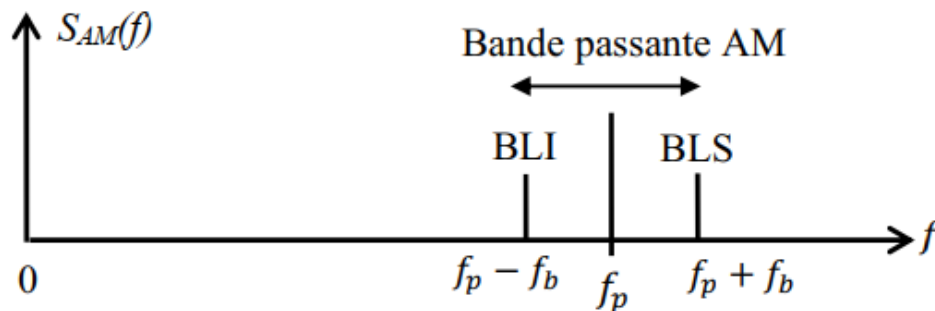


Figure I.4 : Le spectre de la modulation d'amplitude avec un signal modulant sinusoïdal.

#### 1.2.4.2 Cas d'un signal modulant quelconque

Dans la pratique, le signal possède une certaine largeur de bande comprise entre  $f_{min}$  et  $f_{max}$ . Dans ce cas, on considère que ce signal est formé par plusieurs composantes fréquentielles de  $f_{min}$  à  $f_{max}$ . Par analogie avec un signal sinusoïdal, chaque fréquence  $f_1$  donne  $f_p - f_1$  et  $f_p + f_1$  après la modulation, d'où le spectre montré dans de la figure I.5.

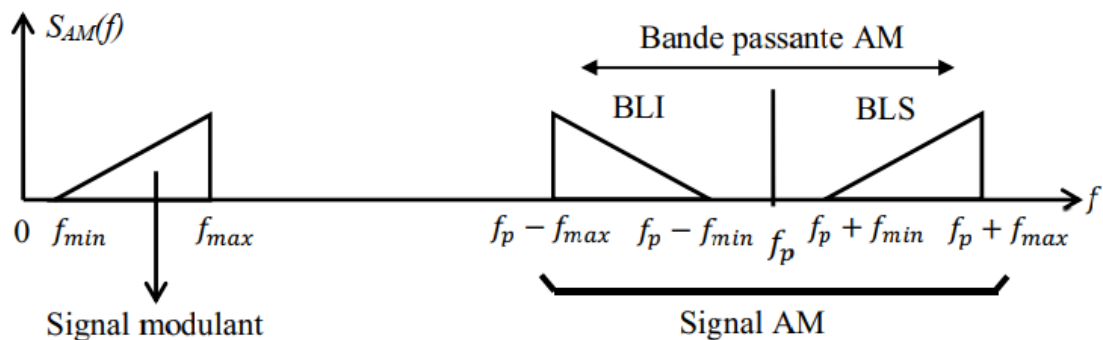


Figure I.5 : Le spectre de la modulation d'amplitude avec un signal modulant quelconque.

#### 1.2.5 Bande occupée

La bande occupée correspond à la largeur de bande nécessaire à la transmission du signal après la modulation. C'est la bande spectrale minimale à transmettre tout en assurant une récupération totale du signal émis au niveau de réception.

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

Cependant, ces deux notions sont antinomiques. Il faudra donc faire un compromis entre simplicité et bande occupée autrement dit entre coût et efficacité spectrale.

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

### 1.2.6 Différentes modulations d'amplitudes

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

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

#### 1.2.6.1 Modulation d'amplitude sans porteuse

La modulation d'amplitude sans porteuse (AM DSB-SC : Double SideBand Suppressed-Carrier), consiste à transmettre les deux bandes latérales sans la porteuse voir la figure I.6. L'avantage de la DSB, c'est que la puissance de transmission est entièrement dans le signal utile. On donne l'expression d'un signal DSB :

$$S_{\text{DSP}}(t) = A_P b(t) \cos(\omega_P t + \varphi_P)$$

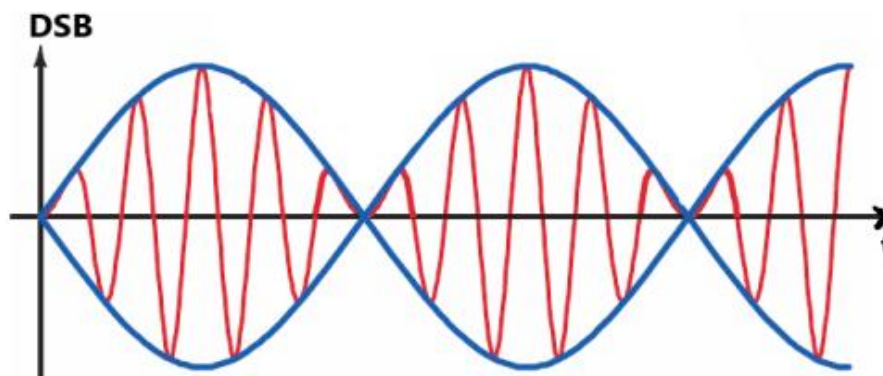


Figure I.6 : Exemple de la forme d'un signal DSB.

En DSB, l'enveloppe de signal n'a pas la forme de signal modulant. Le spectre du signal ne contient que les deux bandes latérales (figure I.7) :

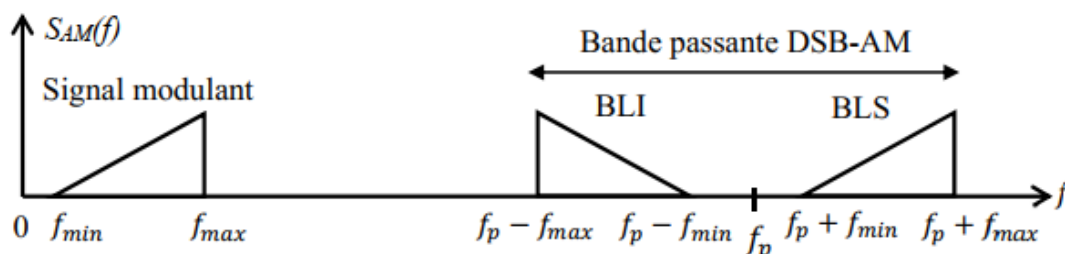


Figure I.7 : Le spectre de la DSB.

La bande passante d'un signal DSB vaut :  $BP=2f_{\text{max}}$

Le rendement de puissance est 100%. Mais, le signal utile est transmis deux fois : une dans la LSB et l'autre dans la USB.

### 1.2.6.2 Modulation d'amplitude à bande latérale unique

La modulation d'amplitude à bande latérale unique (AM SSB-SC : Single SideBand Suppressed Carrier modulation), consiste à supprimer la porteuse et une des bandes latérales et ne transmettre qu'une seule bande latérale.

Si, la bande inférieure qui est émise, alors il s'agit d'une modulation à bande latérale inférieure, LSSB : « Lower Single Side Band ».

Si, la bande supérieure qui est émise, il s'agit d'une modulation à bande latérale supérieure, USSB : « Upper Single Side Band ».

On donne l'expression d'un signal SSB pour le cas d'une modulation à bande latérale inférieure et le cas d'une modulation à bande latérale supérieure comme suit :

$$S_{LSSB}(t) = b(t)/2 \cos(\omega_P t + \varphi_P) - b'(t)/2 \sin(\omega_P t + \varphi_P)$$

$$S_{USSB}(t) = b(t)/2 \cos(\omega_P t + \varphi_P) + b'(t)/2 \sin(\omega_P t + \varphi_P)$$

On obtient  $b'(t)$  en déphasant  $b(t)$  par  $90^\circ$ .

Ci-dessous on donne le spectre de fréquence de la LSSB:

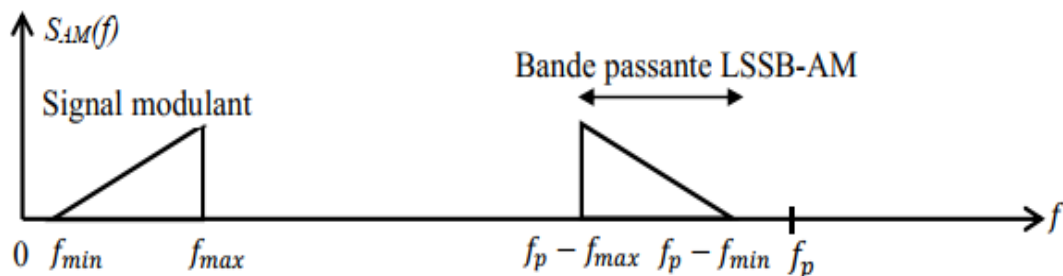


Figure 1.8 : Le spectre de la LSSB-AM.

La largeur de bande d'un signal LSSB est donnée par :  $BP_{LSSB} = f_{max} - f_{min}$

Le spectre de fréquence de la USSB contient aussi une seule bande latérale :

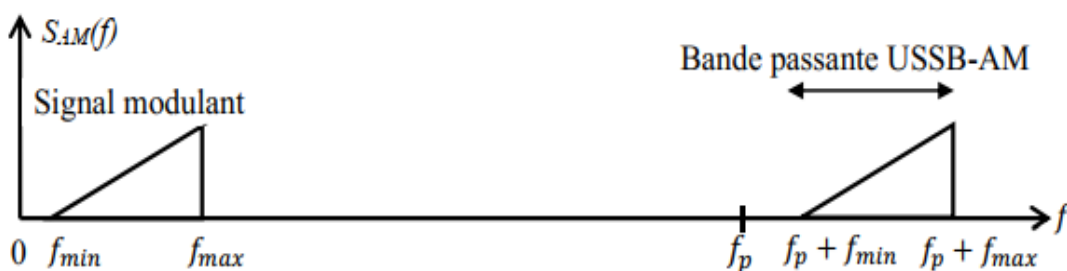


Figure 1.9 : Le spectre de la USSB-AM.

La largeur de bande d'un signal USSB est :  $BP_{USSB} = f_{max} - f_{min}$

En plus de l'optimisation de rendement en puissance (comme pour la DSB), la bande passante nécessaire pour la SSB est égale à la bande passante de signal utile, donc presque la moitié de la bande passante de la AM ou la DSB.

### 1.2.7 Démodulation d'amplitude

A la réception, deux types de démodulation peuvent être utilisés pour extraire l'information de base transmise : démodulation asynchrone basée sur un détecteur de crête et démodulation synchrone basée sur un multiplicateur des signaux.

Le principe de la démodulation AM asynchrone repose sur trois blocs : un détecteur d'enveloppe, un filtre passe-bas et un supprimeur du niveau de la composante continue DC. Le passage du signal modulé AM à travers un détecteur d'enveloppe permet de supprimer la composante négative. Le filtre passe bas a pour rôle de supprimer le signal HF. Enfin, le supprimeur du niveau de la composante continue DC permet de restituer le signal d'information. Le principe de la démodulation AM asynchrone est expliqué dans la figure I.10.

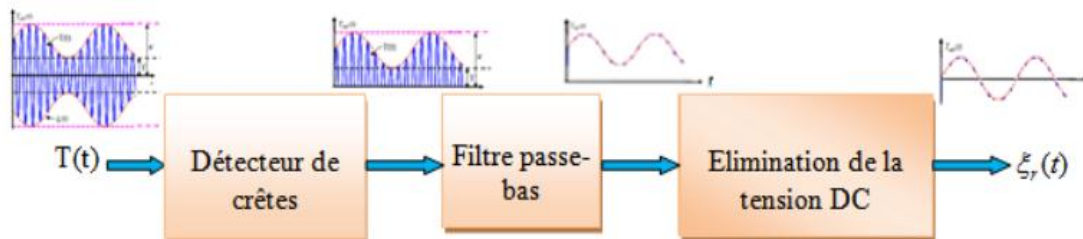


Figure I.10 : Principe de la démodulation AM asynchrone.

Le principe de la démodulation AM synchrone repose principalement sur la récupération ou la reconstruction du signal porteur. Cette technique repose sur la multiplication du signal modulé reçu avec la porteuse. Après filtrage, à l'aide d'un filtre passe bas pour retrouver le signal en bande de base. Le principe de la démodulation AM synchrone est expliqué dans la figure I.11.

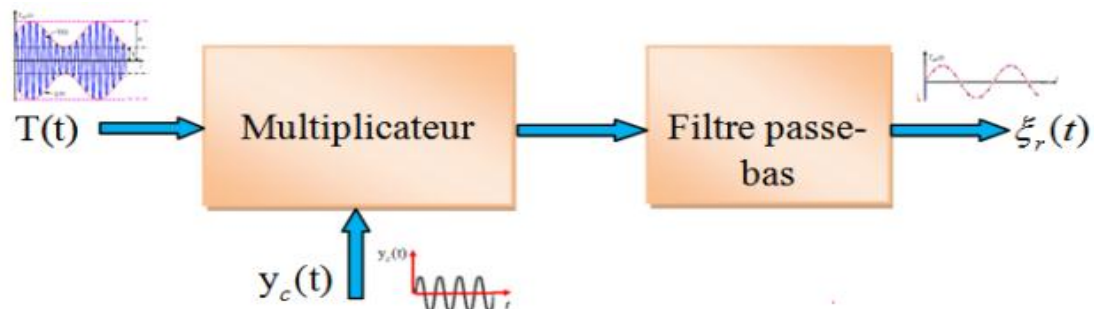


Figure I.11 : Principe de la démodulation AM synchrone.

### I.3 La modulation de fréquence FSK

#### I.3.1 expression temporelle dans le cas d'un signal modulant quelconque

Dans la modulation de fréquence : (FM pour : Frequency Modulation en anglais), le signal utile module la fréquence de la porteuse, soit donc :

- La porteuse  $p(t) = A_P \cos(\omega_P t + \varphi_P)$
- Le modulant (signal d'information) :  $b(t)$
- Le signal modulé  $S_{FM}(t) = A_P \cos(\omega_P t + 2\pi \int K b(t) dt + \varphi_P)$

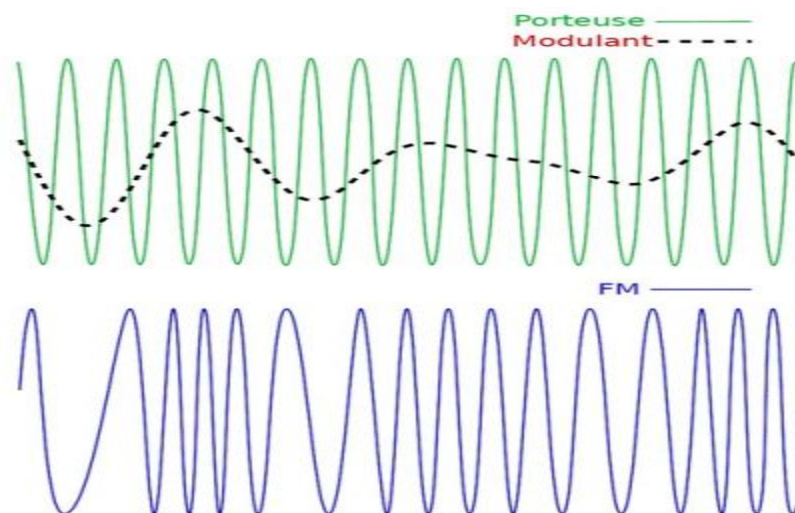
où  $K$  est un facteur de proportionnalité, souvent appelé sensibilité du modulateur.

On définit :

- La déviation maximale en fréquence :  $\Delta f = k \cdot \max |b(t)|$
- L'indice de modulation :  $m = \frac{\Delta f}{f_{max}}$

avec :  $f_{max}$  est la fréquence maximale de signal modulant.

La figure I.12 suivante montre l'exemple d'un signal utile  $b(t)$ , puis ce signal qui va moduler la fréquence d'une porteuse.



**Figure I.12 : Exemple de la modulation en fréquence d'une porteuse par un signal modulant quelconque**

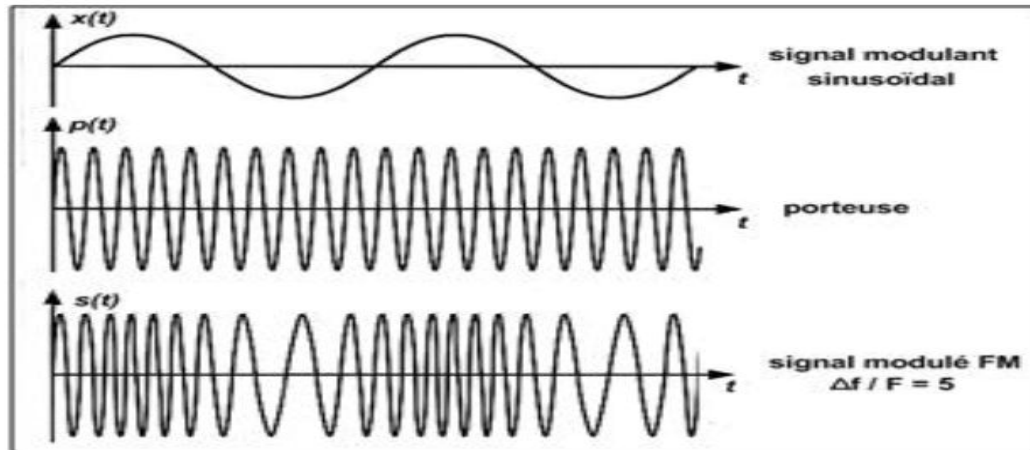
#### I.3.1 Expression temporelle dans le cas d'un signal modulant sinusoïdal

Dans l'exemple d'un signal modulant de forme sinusoïdale :  $b(t) = A_b \cos(\omega_b t + \varphi_b)$



- La forme de signal modulé est :  $S_{FM}(t) = A_P \cos(\omega_P t + \frac{kA_b}{f_b} \sin(\omega_b t + \varphi_b) + \varphi_p)$
- La déviation maximale en fréquence :  $\Delta f = k A_b$
- L'indice de modulation :  $m = \frac{\Delta f}{f_b} = \frac{k A_b}{f_b}$

La figure I.13 suivante montre l'exemple d'un signal utile de forme sinusoïdale, puis ce signal qui module la fréquence d'une porteuse.



**Figure I.13 : Exemple de la modulation en fréquence d'une porteuse par un signal modulant sinusoïdal.**

#### **1.4 La modulation de phase PSK**

##### **1.4.1 Expression temporelle dans le cas d'un signal modulant quelconque**

Dans la modulation de phase : (PM pour : Frequency Modulation en anglais), le signal à transmettre module directement la phase instantanée de la porteuse.

La forme de signal modulé est :  $S_{PM}(t) = A_P \cos(\omega_P t + kb(t) + \varphi_p)$

Et on définit :

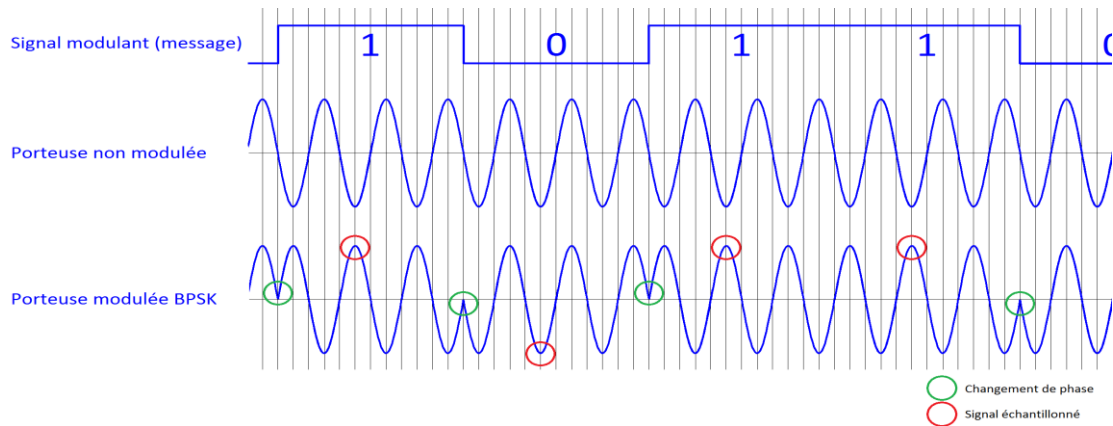
- Le déphasage instantané :  $\varphi(t) = kb(t)$
- La déviation maximale en phase :  $\Delta\varphi = k \cdot \max |b(t)|$
- L'indice de modulation :  $m = \max |\varphi(t)| = k \cdot \max |b(t)|$

##### **1.4.2 Expression temporelle dans le cas d'un signal modulant sinusoïdal**

Dans l'exemple d'un signal modulant de forme sinusoïdale :  $b(t) = A_b \cos(\omega_b t + \varphi_b)$

- Le déphasage instantané :  $\varphi(t) = k A_b \cos(\omega_b t + \varphi_b)$
- La forme de signal modulé :  $S_{PM}(t) = A_P \cos(\omega_P t + k A_b \cos(\omega_b t + \varphi_b) + \varphi_P)$
- La déviation maximale en phase :  $\Delta\varphi = k A_b$
- L'indice de modulation :  $m = k A_b$

Ceci est expliqué dans la figure I.14.



**Figure I.14 : Exemple de la modulation en phase d'une porteuse par un signal modulant.**

#### 1.4 Les intérêts de la modulation

- **Facilite l'accès multiple :** en traduisant le spectre en bande de base des signaux provenant de différents utilisateurs pour différentes bandes de fréquence, de multiples utilisateurs peuvent être logés à l'intérieur d'une bande du spectre électromagnétique c'est ce qu'on appelle multiplexage fréquentiel.
- **Augmente la portée de communication :** les signaux en bande de base de basse fréquence souffrent de l'atténuation et ne peuvent donc pas être transmis sur de longues distances. La conversion à une bande de fréquence plus élevée permet de parcourir une longue distance de transmission.
- **Réduction de la taille de l'antenne :** La hauteur de l'antenne est inversement proportionnelle à la fréquence de signal rayonné et donc le rayonnement du signal à haute fréquence permet de diminuer la taille de l'antenne.

#### 1.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une définition sur la modulation numérique mono-porteuse avec leurs trois types : la modulation d'amplitude ASK, de fréquence FSK et de phase PSK. Ensuite nous avons vu les intérêts de la modulation.

Nous allons étudier dans le second chapitre la modulation multi-porteuses.

***Chapitre II :***  
***Modulations multi-porteuses***

***II.1 Introduction***

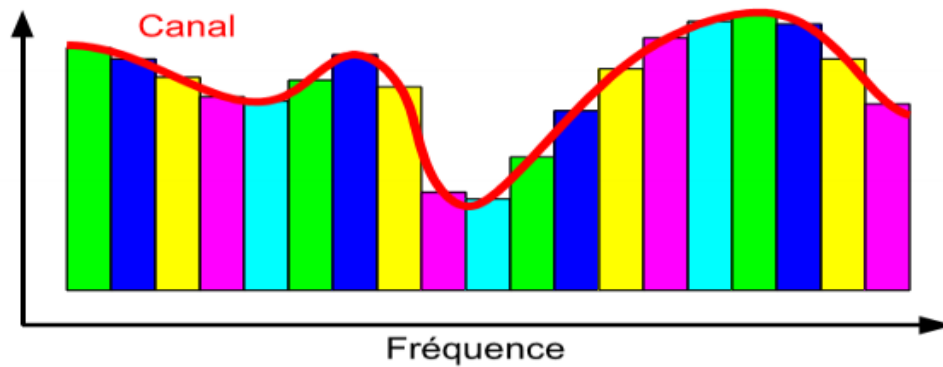
Les premières études sur les multi-porteuses étaient faites à la fin des années 1950, Les techniques multi-porteuses consistent à transmettre des données numériques en les modulant sur un grand nombre de porteuses en même temps, ce sont des techniques de multiplexage en fréquence qui existent depuis longtemps. Le gain d'intérêt actuel réside dans l'amélioration apportée pour augmenter l'efficacité spectrale en orthogonalisant les porteuses, ce qui permet d'implémenter la modulation et la démodulation à l'aide de circuits performants de transformée de Fourier rapide (FFT).

Différentes techniques de modulation multi-porteuses ont été proposées dans la littérature, parmi lesquelles l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), qui est la plus répandue et est basée sur l'orthogonalité de ses fréquences porteuses.

Dans ce chapitre, on va présenter un aperçu sur les modulations multi-Porteuses en général, puis la modulation multi-porteuse à base de fréquences orthogonales (OFDM) en expliquant leurs principes et leurs avantages.

***II.2 Modulations Multi-Porteuses******II.2.1 Aperçu sur la Modulation Multi-Porteuse***

Une modulation à porteuses multiples distribue les informations sur plusieurs sous-porteuses à bande étroite afin de former un signal à large bande. Ce procédé permet de diviser le canal de propagation à large bande en plusieurs canaux de propagation à bandes étroites. Dans un système bien dimensionné, chacun de ces canaux de propagation à bande étroite est considéré comme non sélectif dans les domaines temporel et fréquentiel. Ainsi, une modulation multi-porteuse présente une grande robustesse vis-à-vis de la sélectivité temporelle et fréquentielle du canal de propagation. C'est pourquoi les modulations multi-porteuses sont largement utilisées dans les systèmes de transmission actuels sur un canal radio à large bande comme le montre la figure II.1.



*Figure II.1 : Principe modulation multi-porteuse.*

### **II.2.2 Systèmes de modulation multi-porteuse**

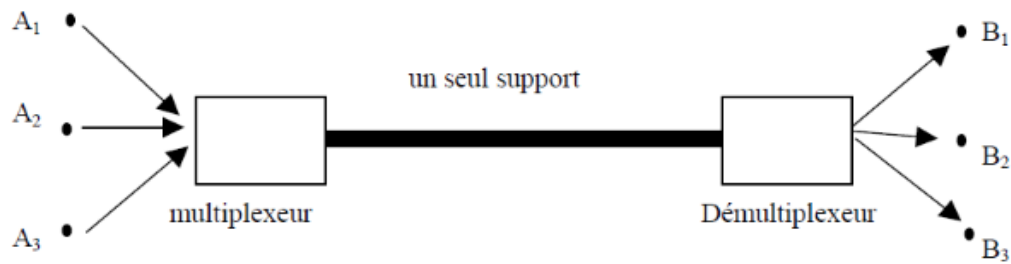
Les systèmes de transmission basés sur les modulations multi-porteuses ou à porteuses multiples permettent de combattre les interférences inter-symboles (IES) causés essentiellement par l'évanouissement lié à la propagation par trajets multiples dans le canal radio. Il existe plusieurs techniques de modulation multi-porteuse qui sont en usage ou en cours d'étude pour des utilisations futures. L'OFDM en est un bon exemple basée sur les fréquences multiples.

### **II.2.3 Champs d'applications de l'OFDM**

La modulation multi-porteuse est retenue pour plusieurs applications telles que la norme de diffusion de son numérique DAB (Digital Audio Broad casting) et de télévision numérique terrestre DVB-T (Digital Vidéo Broad casting Terrestrial), ADSL, WiFi, WiMAX et LTE. Ce succès est grâce à ses propriétés de robustesse vis-à-vis de la sélectivité en temps et en fréquence des canaux radio à trajets multiples et pour son efficacité spectrale [2].

### **II.2.4 Multiplexage**

Le multiplexage est l'opération de répartir la capacité du canal en plusieurs voies, chacune est associé à une communication, de façon à transmettre simultanément plusieurs signaux indépendants sur le même canal de communication sans qu'il y ait d'interférence ou de perturbation entre eux comme le montre la figure II.2.

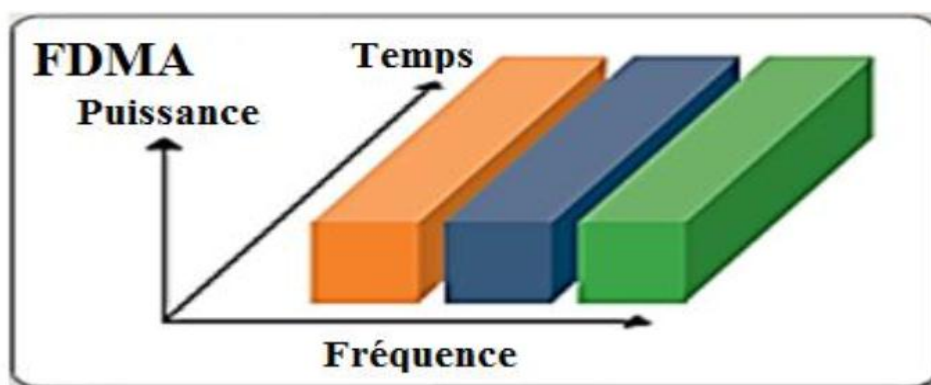


**Figure II.2: Multiplexage des possibilités d'accès à un canal donné.**

Il existe trois Techniques de base de multiplexage dans la gamme radiofréquence : le multiplexage fréquentiel (FDM, Frequency Division Multiplex), le multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplex) et le multiplexage par codes orthogonaux (CDM, Code Division Multiplex). Dans notre mémoire on va s'intéresser au premier, FDM.

### II.2.5 Multiplexage FDM

C'est la technique la plus ancienne de multiplexage. D'ailleurs, tout appareil de radio ou de télévision fonctionne avec ce type de multiplexage puisque l'antenne reçoit simultanément plusieurs porteuses modulés. Il faut seulement choisir le canal disponible en ajustant le récepteur à la porteuse du sous-canal dont on veut sélectionner. Plusieurs signaux analogiques peuvent être multiplexés ensemble dont chacun module une porteuse différente des autres et en occupant une portion bien définie de la bande passante du canal de communication. En téléphonie, chaque signal occupe une bande de fréquence de 4kHz. Les supports de transmission employés pour acheminer ces signaux (fils, câbles, radio, satellites, etc.) possèdent des bandes passantes beaucoup plus larges.



**Figure II.3 : Méthodes d'accès multiples FDMA.**

### ***II.3 Modulation Multi-porteuse à base de fréquences orthogonales (OFDM)***

#### ***II.3.1 Historique***

La modulation multi-porteuse a été introduite à la fin des années 50, sa première utilisation était dans des systèmes de communications hautes fréquences militaires. Quelques années plus tard elle a été améliorée avec l'apparition du concept des signaux orthogonaux à bande limitée, concept que l'on appellera par la suite "Orthogonal Frequency Division Multiplexing" (OFDM). La mise en œuvre de l'OFDM à l'époque consistait à utiliser des filtres de Nyquist. Du fait de la complexité à générer des bancs de filtres de sinusoides, l'OFDM n'a pas tout de suite intéressé les industriels civils. 20 ans plus tard le schéma de modulation-démodulation a été simplifié avec l'utilisation de la Transformée de Fourier Discrète Inverse (TFDI) à l'émission et de la TFD au niveau de la réception, ce qui rend facile son implémentation numérique. Dans le milieu des années 1980, la technique OFDM a été développée dans les domaines industriels civils tels que le projet de radiodiffusion numérique DAB.

#### ***II.3.2 Canal multi-trajets***

Dans le système de radiocommunication le signal transmis va emprunter des trajets différents afin d'arriver au récepteur.

Dans certains cas le signal suit un trajet direct sans rencontrer d'obstacles (line-of-sight, LOS), par contre dans la majorité des cas les composantes du signal sont réfléchies par le sol, les bâtiments, les voitures ..., ces trajets multiples ont des longueurs physiques différentes ainsi le signal issue de chaque trajet arrive avec une amplitude et un retard propre au trajet. C'est le phénomène de multi-trajet.

Ces échos induisent un étalement temporel du signal donnant lieu à un phénomène d'interférence entre les symboles transmis (ISI).

Par ailleurs le changement au cours du temps de l'environnement de propagation dû au déplacement de l'émetteur ou du récepteur induit des interférences entre porteuses (ICI) comme le montre la figure II.4.

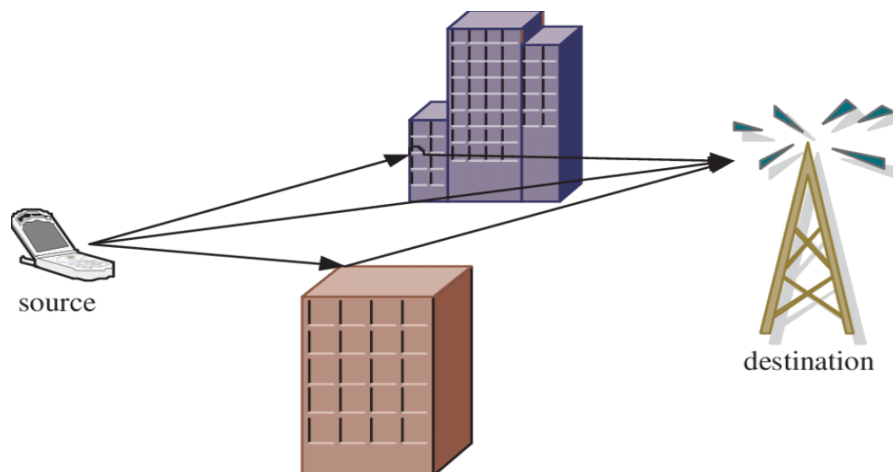


Figure II.4 : Canal radio à trajets multiples.

### II.3.3 Présentation de l'OFDM

Le concept de la modulation OFDM est très similaire à la technique conventionnelle du multiplexage par répartition en fréquence (FDM). Cependant, OFDM utilise des sous- porteuses mutuellement orthogonales et étroitement espacées, ce qui lui permet d'assurer une efficacité spectrale bien améliorée de l'ordre de 50 % voire plus, par rapport au système traditionnel FDM comme le montre la figure II.5 [1].

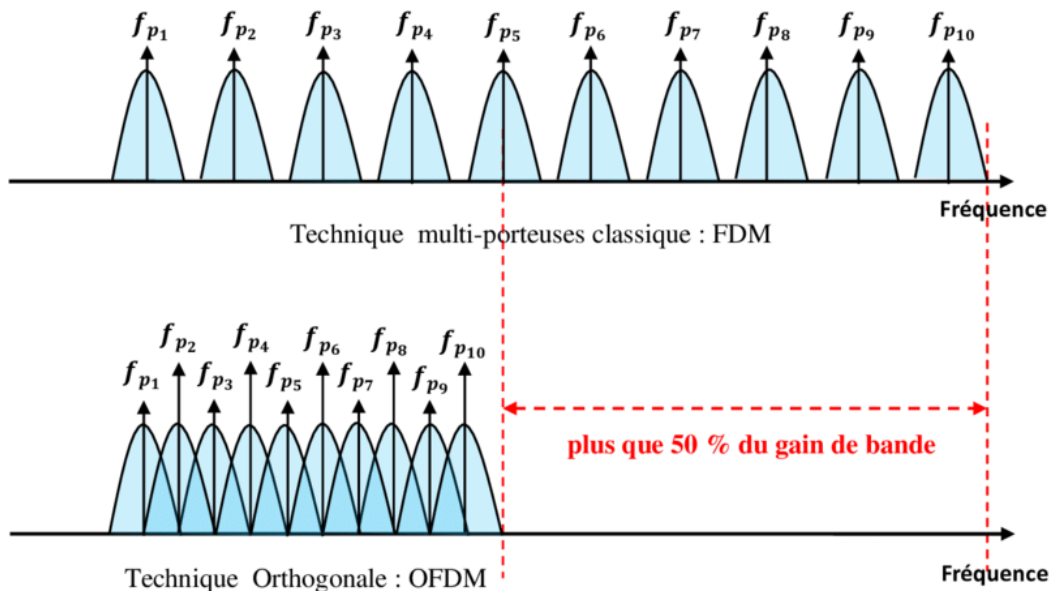


Figure II.5 : Gain en efficacité spectrale de l'OFDM par rapport à FDM.



### II.3.4 Principe de la modulation OFDM

L'OFDM consiste à diviser un flux à haut débit en un certain nombre de flux à faible débit, puis les transmettre en parallèle à l'aide de plusieurs sous-porteuses orthogonales (transmission en parallèle). Ainsi, les  $N$  symboles à transmettre qui étaient auparavant transmis consécutivement à un débit élevé de  $1/T_s$ , vont être émis simultanément sur  $N$  sous-porteuses modulés à bas débit  $1/T$ , avec  $T = N.T_s$ . Ainsi, chacune des  $N$  données sont transmises par un symbole de durée  $T$  au lieu de  $T_s = T/N$ . La figure II.6 illustre cette idée de base des modulations à porteuses multiples en général. La durée d'un symbole est donc multipliée par un facteur  $N$  dont le bon choix doit permettre de minimiser les ISI tout en conservant le débit de la modulation mono-porteuse initiale de  $1/T_s$  [1].

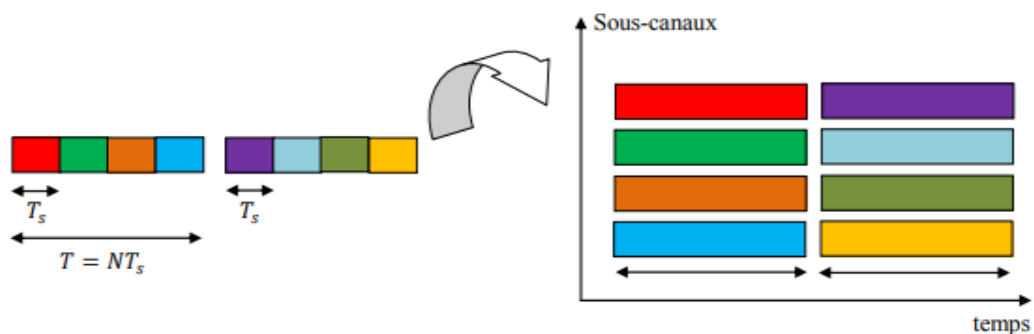


Figure II.6 : Principe de la modulation OFDM.

Spectre des différentes sous-porteuses orthogonales :

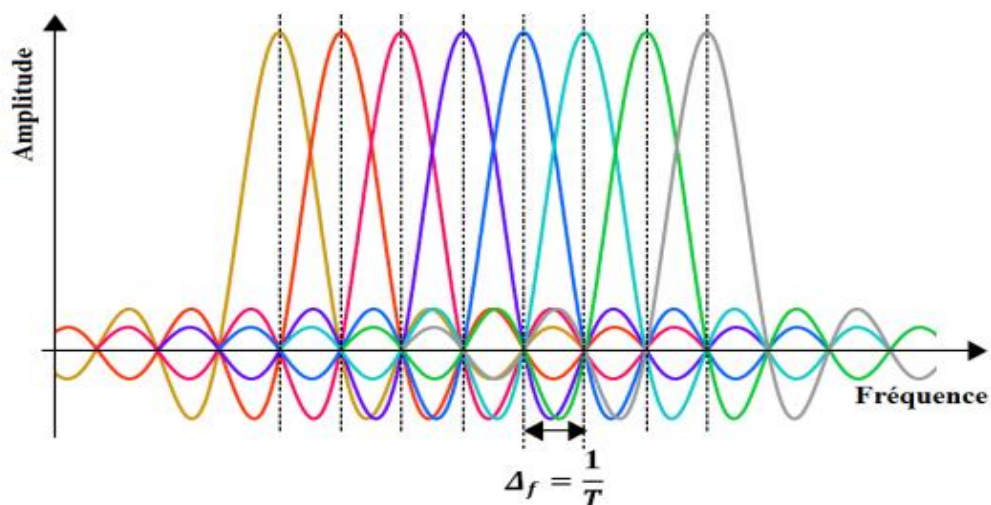
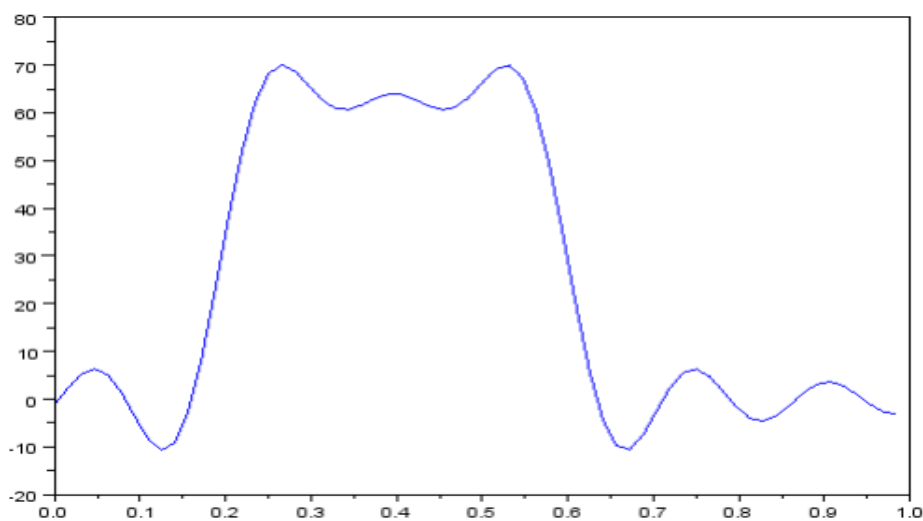


Figure II.7 : Spectre des sous-porteuses orthogonales.

Dans la figure II.7 on constate qu'en raison de l'orthogonalité fréquentielle, la valeur d'une fréquence porteuse au pic de chaque sous-bande coïncide avec des valeurs nulles des autres sous-porteuses, ce qui permet d'éliminer les effets des interférences.

Cette condition d'orthogonalité autorise ainsi le recouvrement entre les différentes sous-bandes fréquentielles en évitant les interférences ce qui améliore l'efficacité spectrale c'est-à-dire une exploitation beaucoup plus efficace de la bande passante globale du canal radio.

Le spectre total résultant de la somme des spectres individuels aura l'allure suivante :



**Figure II.8 : Spectre du symbole OFDM.**

La figure II.8 montre qu'en utilisant une modulation multi-porteuses, la bande passante sera occupée de manière optimale en suivant les variations fréquentielles du canal. Cette résistance contre la sélectivité fréquentielle du canal est grâce aux sous bandes OFDM qui sont bien étroites pour considérer les sous canaux comme plats.

### **II.3.5 Schéma de principe et expression du signal transmis de l'OFDM**

Le schéma de principe de l'OFDM est représenté dans la figure II.9 suivante :

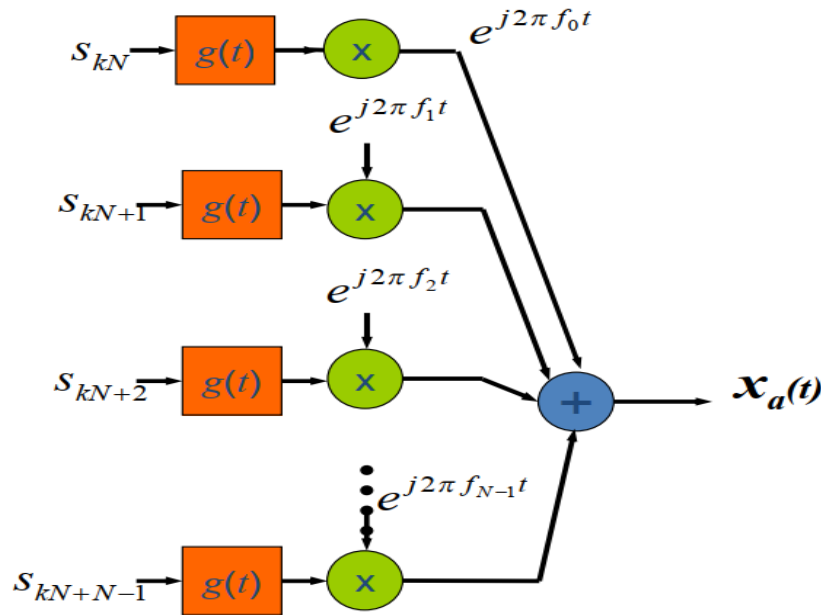


Figure II.9 : Principe de l'OFDM côté émetteur.

Comme nous venons de le voir sur la figure II.9, le signal OFDM se compose de  $N$  sous porteuses de fréquences  $f_k = f_0 + k\Delta_f$ ,  $k \in [0, \dots, N - 1]$  qui sont rigoureusement espacées de  $\Delta_f$  et sont utilisées pour la transmission en parallèle de  $N$  symboles. Ces symboles, notés  $s_{kN+i}$ , sont des éléments complexes prenant leurs valeurs dans un alphabet fini correspondant à une modulation donnée comme par exemple le QAM.  $g(t)$  est la fonction de mise en forme qui est une fonction porte pour l'OFDM. L'expression du signal OFDM généré durant l'intervalle  $[0, T]$  est donnée par [1].

$$x_a(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_k s_{kN+i} g(t - kT) \exp(j2\pi f_i t), \quad \text{avec } f_i = i\Delta_f$$

$$x_a(t) = \sum_k g(t - kT) \sum_{i=0}^{N-1} s_{kN+i} \exp(j2\pi i\Delta_f t)$$

$$x_a(t) = \sum_k S_k g(t - kT)$$

### II.3.6 Notion d'orthogonalité

Pour avoir une meilleure efficacité spectrale, il faut que les fréquences porteuses soient bien proches les unes aux autres, tout en assurant que le récepteur soit capable

de les séparer sans interférences et donc pouvoir restituer les données numériques modulées sur chacune d'entre elles.

Cette condition d'orthogonalité fréquentielle est assurée grâce au critère de Nyquist qui assure un dimensionnement rigoureusement défini de l'espacement inter-porteuses  $\Delta f$  qui est égale à :  $\Delta f=1/T$ , où  $T$  est la durée utile pour émettre un symbole d'information [5].

Cette condition d'orthogonalité est satisfaite pour chaque porteuse avec ses voisines, on dit que les fréquences porteuses sont orthogonales deux à deux.

### ***II.3.7 Interférences entre les symboles***

Les signaux OFDM sont transmis à des intervalles égaux, et ils doivent parcourir un certain trajet pour atteindre le récepteur. Dans le cas d'un canal multi-trajet, un symbole transmis prend différents retards pour arriver au récepteur à cause des différents chemins de propagation, ce qui cause des étalements temporels différents. L'étalement des symboles provoqué par le canal fait chevaucher les symboles entre eux, ce qui donne naissance à ce qu'on appelle interférences entre symboles (IES).

### ***II.3.8 Notion d'intervalle de garde***

Sous l'effet du multi-trajet, les symboles auront des échos et donc, chaque symbole émis arrive au récepteur sous forme de plusieurs symboles atténués, déphasé et retardés les uns aux autres. Un symbole émis lors d'une période  $iT_s$  peut se superposer à un écho provenant du symbole émis à la période  $(i-1)T_s$ , il se produit alors des interférences inter-symboles. Pour éviter ces interférences, on ajoute un intervalle de garde d'une durée  $T_g$ .

Chaque symbole est précédé par une extension périodique du signal lui-même, la durée du symbole totale transmis est alors  $T=T_s+T_g$ . Pour que les interférences soient absorbés, il faut que  $T_g$  soit au moins égale à l'étalement max du canal, soit :  $T_g \geq \tau_{\max}$  avec  $\tau_{\max}$  est le retard max introduit par le canal multi-trajet [5].

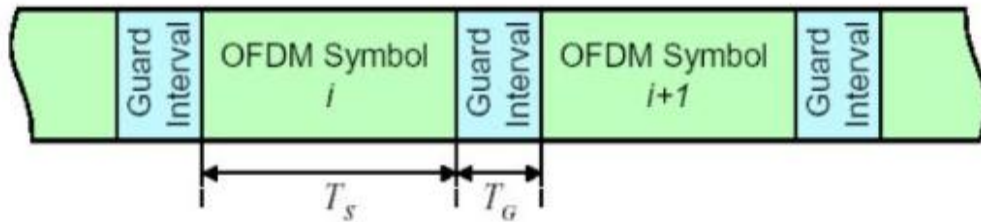


Figure II.10 : Intervalle de garde.

### II.3.9 Avantages de l'OFDM

- Un des grands avantages des schémas de transmission OFDM est d'avoir partager la complexité de l'égalisation entre l'émetteur et le récepteur, contrairement aux schémas de transmission mono-porteuses. Ceci permet d'avoir des récepteurs simples et peu coûteux.
- Une exploitation efficace des ressources fréquentielles en comparaison avec les solutions classiques de multiplexage fréquentiel. Ceci est principalement dû au fait que dans l'OFDM, les canaux se chevauchent tout en gardant une orthogonalité parfaite.
- Les techniques OFDM ont une très grande flexibilité dans l'allocation du débit dans un contexte multi utilisateurs. En effet, en fonction de la valeur du gain instantané du canal, chaque sous porteuse peut être codée indépendamment des autres porteuses.
- Un codage et un entrelacement adapté permet d'améliorer de façon importante le taux d'erreur.
- Ne nécessite pas d'égalisation mais une simple estimation périodique de la réponse du canal.
- L'OFDM diminue l'IES dû au retard de propagation multi-trajet en ajoutant un préfixe cyclique dans le domaine temporel aux symboles OFDM.

### II.3.10 Applications de l'OFDM

L'OFDM est un domaine de recherche pertinent pour une mise en application dans les réseaux locaux sans fil et dans des applications de câble à bande large.

Les premières applications ont concerné la diffusion du son numérique dans le canal radio- mobile. En outre, l'OFDM est utilisé dans :

- la télédiffusion numérique terrestre (DVB-T, DVB-H);
- la radiodiffusion numérique terrestre DAB ;
- la radiodiffusion numérique terrestre T-DMB ;
- la radiodiffusion numérique DRM ;
- les liaisons filaires telles que l'ADSL, le VDSL, les modems sur courant porteur (Homeplug),
- les modems câble (standard Docsis) ;
- les réseaux sans-fils Wi-Fi, WIMAX et HiperLAN ;
- les réseaux mobiles de nouvelle génération (LTE, 4G) qui utilisent la technique d'accès multiple basée sur l'OFDM appelée OFDMA.

#### **II.4 Conclusion**

Dans ce deuxième chapitre, le principe de la modulation multi-porteuse a été expliqué. Ainsi Nous avons vu la technique de modulation OFDM : son principe de fonctionnement, ainsi la propriété d'orthogonalité entre ses fréquences porteuses et l'intervalle de garde ou le préfixe cyclique. Cette technique apporte une solution efficace aux problèmes dus à la transmission à haut débit dans un canal radio sélectif en fréquence et ceci en divisant la bande globale du canal en un ensemble de sous bandes étroites centrées autour des fréquences orthogonales.

Nous allons voir dans le chapitre trois les résultats de simulation concernant la modulation multi-porteuse OFDM.

*Chapitre III :*  
*Simulations*

### III.1 Introduction

Après avoir vu dans les deux chapitres 1 et 2 des notions théoriques sur la modulation multi-porteuse OFDM, nous allons voir dans ce dernier chapitre des résultats obtenus par simulation pour confirmer les notions passées. Dans ce but, nous avons utilisé comme outil de programmation le logiciel scientifique MATLAB qui est un environnement de programmation très évolué, utilisé à des fins de calculs numériques. Développé par la société Mathworks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes et de créer des interfaces utilisateurs.

Dans le chapitre précédent, nous avons vu comment l'OFDM insère des intervalles de garde afin de combattre les interférences dues à l'effet multi-trajet. Afin d'évaluer la performance de cette technique et sa robustesse contre les IES provoquées par un canal qui présente une forte sélectivité en fréquence, nous allons présenter dans le chapitre présent des résultats de simulation d'une chaîne de transmission OFDM.

### III.2 Evaluation de la performance de l'OFDM

Nous avons choisi l'outil BER-vs-Eb/N0, utilisé communément pour évaluer les performances des systèmes de transmission tels que OFDM. Pour cela, on a programmé, dans un premier temps, la chaîne OFDM de bout en bout sur Matlab. Pour le canal de transmission on a choisi un modèle de Rayleigh NLOS (Non Line Of-Sight) avec effet multi-trajet et donc une grande sélectivité en fréquence. Pour combattre les IES, un préfixe cyclique (ou Intervalle de Garde) est ajouté au niveau de l'émission avec différentes longueurs. Dans la figure III.1 la longueur du CP est nulle c'est-à-dire qu'on transmet les symboles sans insertion de CP.

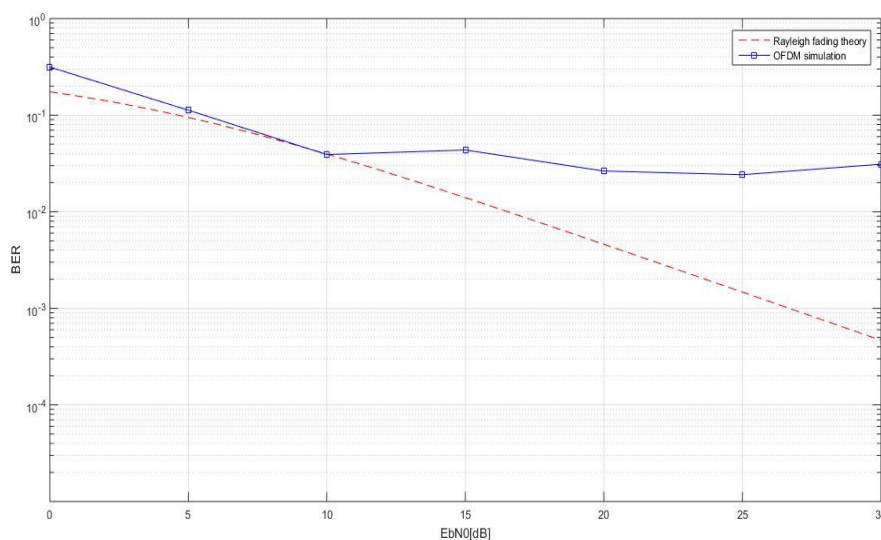
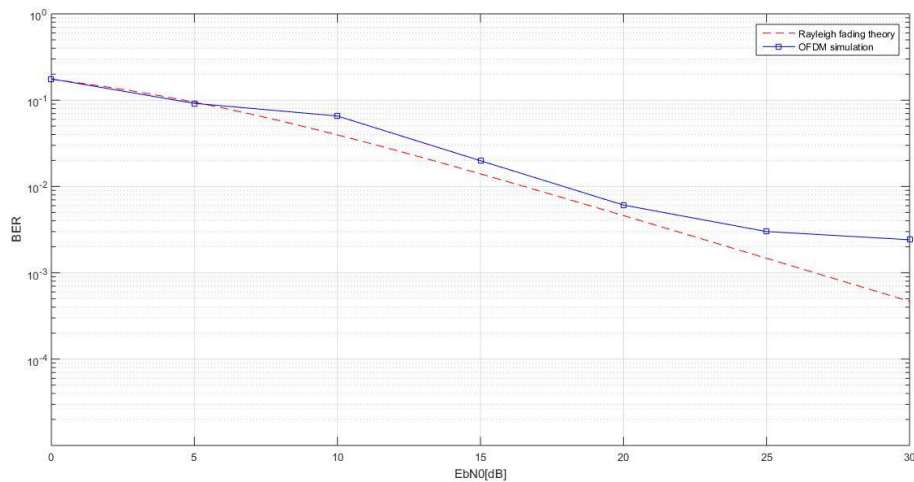


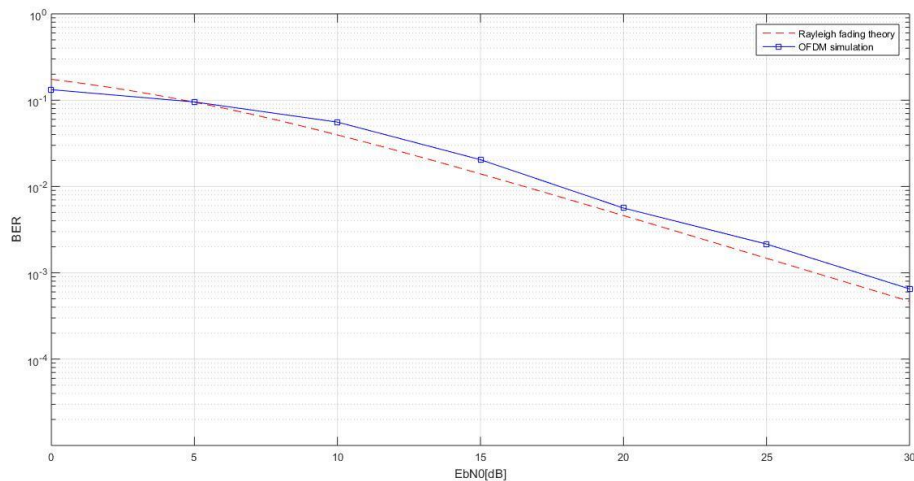
Figure III.1 : Performance de l'OFDM en BER, CP=0



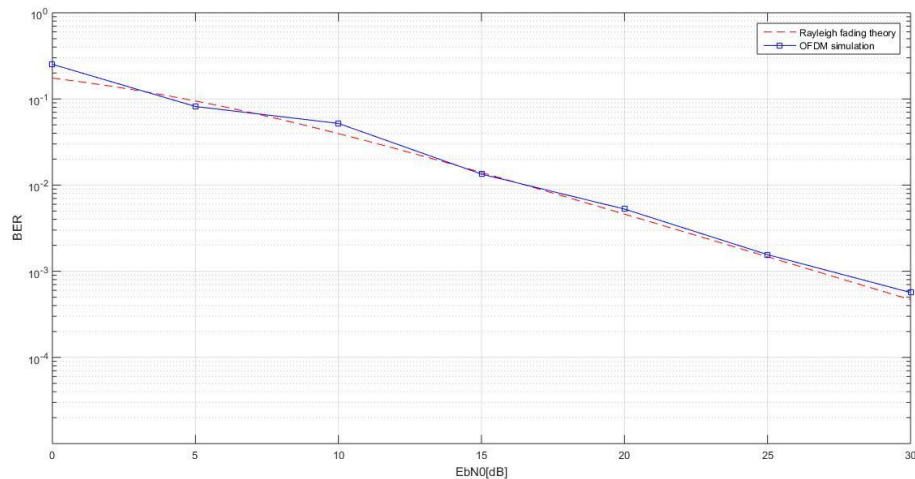
Nous constatons dans ce premier cas qu'avec l'effet multi-trajet du canal nous avons besoin de beaucoup plus d'énergie dans le signal ( $E_b/N_0$ ) pour atteindre un taux d'erreurs binaire acceptable. La courbe en bleu montre une forte dégradation de la qualité de transmission marquée par une croissance de la courbe en s'éloignant de la courbe de référence théorique en rouge. Afin de mieux faire ressortir l'impact de l'ajout d'un préfixe cyclique à longueur non nulle dans l'amélioration du TEB, les trois figures suivantes sont obtenues en augmentant graduellement la longueur du CP jusqu'à une longueur bien supérieur au retard maximum introduit par le canal multi-trajet. Soit donc : CP = (4, 6 puis 8).



**Figure III.2 : Performance de l'OFDM en BER, CP=4**



**Figure III.3 : Performance de l'OFDM en BER, CP=6**

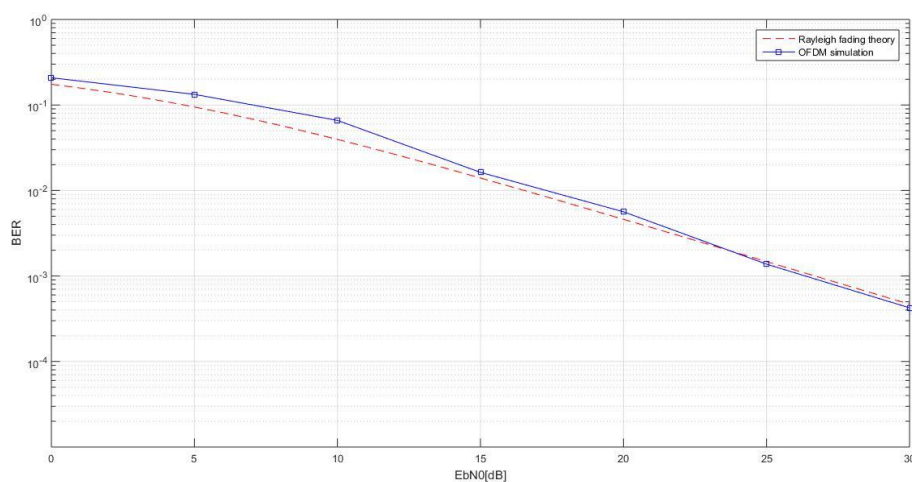


**Figure III.4 : Performance de l'OFDM en BER, CP=8**

L'amélioration est assez clair sur les différentes figures, l'augmentation graduelle de la longueur du préfixe cyclique améliore considérablement le taux d'erreur binaire. En effet plus la longueur du préfixe cyclique se rapproche de la valeur du délai maximal du canal, plus les interférences sont absorbées et éliminées et plus la courbe de simulation tend vers la celle théorique.

Cependant bien que pour les différentes longueurs respectives de 4, 6, 8, nous avons une nette amélioration du BER, on peut constater qu'il y a toujours des interférences minimales parce que ces longueurs sont encore inférieures au délais maximum.

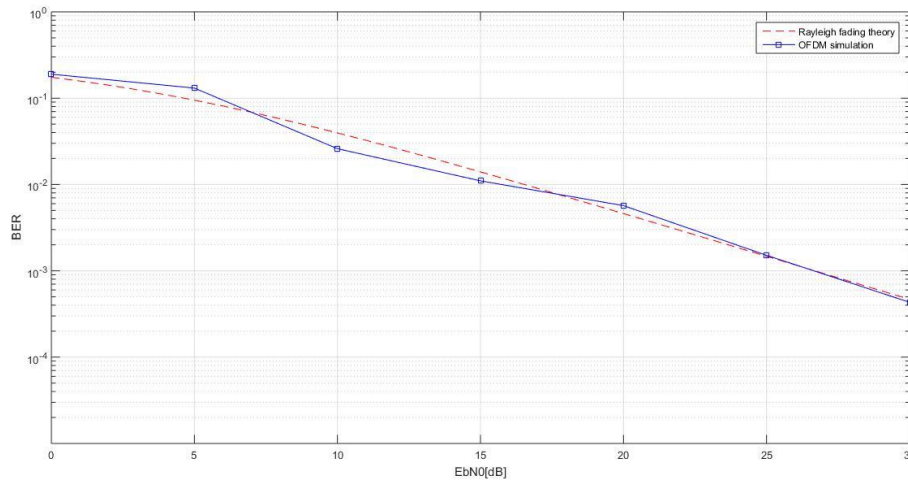
Les figures suivantes, 5 et 6, présentent l'ajustement de la longueur du préfixe cyclique pour qu'il corresponde à la valeur de 10 puis 16.



**Figure III.5 : Taux d'erreur binaire un canal de pour CP=10**

On constate qu'au-delà de la valeur 16, il est inutile d'augmenter encore le préfixe cyclique, c'est la valeur maximale pour laquelle les interférences sont éliminées en quasi-totalité.

En fait, pour une longueur de préfixe plus grande que le délai maximum on ne gagne plus rien sur TEB, bien au contraire on perd une partie de débit utile, car souvenons-nous que les informations du préfixe cyclique sont une copie donc une redondance des informations utiles transmises.



**Figure III.6 : Taux d'erreur binaire un canal de pour CP=16**

### III.3 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté les performances de la liaison OFDM et l'impact du préfixe cyclique dans l'amélioration du taux d'erreur binaire. Il a été démontré qu'à mesure que sa longueur se rapproche de celle du délai maximal du canal, on a annulation des IES et donc une nette amélioration du TEB.

Pour améliorer la qualité de transmission d'une technique, nous avons un compromis à faire entre qualité de transmission (BER) et consommation d'énergie ( $E_{bn0}$ ).

*Conclusion générale*

Les systèmes de communications numériques traditionnels ont été basés sur la modulation mono-porteuse. Dans la théorie comme dans la pratique, lorsqu'on veut augmenter le débit d'une transmission, on doit diminuer la durée de symbole des données. Cependant, d'après ce qu'on a vu dans ce mémoire, la présence d'un canal multi-trajet a comme effet d'introduire des interférences inter-symboles (IES), ce qui nécessite à la réception une égalisation très compliquée. Ainsi, les modulations multi-porteuses ont été proposées en tant que solutions pour combattre l'effet multi-trajet. L'idée de base des techniques multi-porteuses consiste à subdiviser un flux de données à très haut débit en 'N' flux élémentaires à débit très bas qui sont transmis sur N sous-porteuses orthogonales. Le principal avantage est que même si les spectres des sous-porteuses se chevauchent, les signaux n'interfèrent pas entre eux grâce à la propriété d'orthogonalité. De plus, le grand nombre de sous-porteuses N permet d'assurer que la bande de chaque sous-canal soit plus petite que la bande de cohérence du canal de propagation et donc considérer les sous canaux ainsi créés comme plats.

Différentes techniques de modulation multi-porteuses ont été proposées dans la littérature, parmi lesquelles l'OFDM qui est basée sur les fréquences orthogonales.

Dans ce mémoire, nous avons étudié les avantages d'un système de transmission multi-porteuse par rapport à un système classique mono-porteuse. Une simulation sur les performances de la liaison OFDM a été faite pour et voir l'impact du préfixe cyclique dans l'amélioration du taux d'erreur binaire. Nous avons utilisé comme logiciel de simulation Matlab sous sa version 2016.

## *Bibliographie*

- [1]. IKNI Samir, «Contribution à l'Etude et au Développement de Techniques Avancées de Modulations Multi-porteuses pour les futurs Systèmes de communication sans fil», thèse pour l'obtention du diplôme doctorat en science, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2018-2019.
- [2]. Mohamed Larbi Tayebi, «performances des systèmes OFDM deans les canaux radio-mobiles », Presses Académiques Francophones.
- [3]. Jiří VODRÁŽKA «Multi-Carrier Modulation and MIMO Principle Application on Subscriber Lines » Dept. of Telecommunication Technology, Czech Technical University, Technická 2, 166 27 Praha, Czech Republic.
- [4]. Annick Le Glaunec « MODULATION MULTIPORTEUSE ».
- [5]. BENANI MOHAMED, NADJIB BENYAHIA YASSER, «Principe et simulation d'une transmission de type OFDM», MEMOIRE DE FIN D'ETUDES MASTER ACADEMIQUE, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017/2018.
- [6]. Baouni, A. Estimation du canal et élimination des interférences ICI dans les communications mobiles avec modulation OFDM.
- [7]. DAOUD Khedidja , Réseaux et Systèmes de Télécommunication, Juin 2016.
- [8]. S. Labandji, Cours de télécommunications fondamentales, mai 2018.
- [9]. Dr. CHAABANE Abdelhalim, TP Télécommunication Fondamentale, 2018/2019.