



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
Et de la Recherche Scientifique  
Centre universitaire d'Ain Témouchent  
Institut des Sciences et de la Technologie



# COURS

## COMMUNICATIONS ANALOGIQUES



**3EME ANNEE ELECTRONIQUES ET SYSTEMES DE COMMUNICATIONS**

**Auteur :**

*Dr Belhamiani (née Ferouani) Souheyla*  
*Maitre de conférences classe B*

**2014/2015**

# **PREFACE**

Le cours de Communications Analogiques est principalement destiné aux étudiants de la troisième année de l'Institut des Sciences et de la Technologie, *option : Télécommunications, Electronique, Electronique et Systèmes de Communications.*

Il sert de base pour le cours de Communications Numériques et permet à l'étudiant de saisir les principes de fonctionnement des systèmes de Télécommunications. La notion essentielle développée dans les premières pages est l'interprétation d'un signal dans le domaine temporel et fréquentiel. L'étudiant est ensuite sensibilisé à la notion de modulation (pourquoi moduler, ...), et les coûts de la modulation (d'un point de vue conception et d'occupation spectrale). L'étudiant sera capable de déterminer les objectifs principaux de chaque type de modulations. Enfin, nous aborderons les modulations angulaires à savoir la modulation FM et la modulation PM ainsi que leurs principes de transmission.

*Le cours est divisé en trois chapitres :*

- 1. Généralité sur les modulations**
- 2. Modulation d'Amplitude**
- 3. Modulation Angulaire**

## CHAPITRE1 : GENERALITES ET DEFINITIONS

### 1- Les signaux

Les signaux sont une représentation temporelle de phénomène évoluant dans le temps (courant, tension, ondes électromagnétique, ondes acoustiques, ...) et capables de se propager dans un système ou un milieu donné [1].

### 2- Ondes électromagnétiques

L'onde est constituée d'un champ magnétique et d'un champ électrique se propageant dans un milieu matériel ou immatériel. Elle est caractérisée par sa fréquence et sa longueur d'onde donnée par l'expression :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.1)$$

Où :

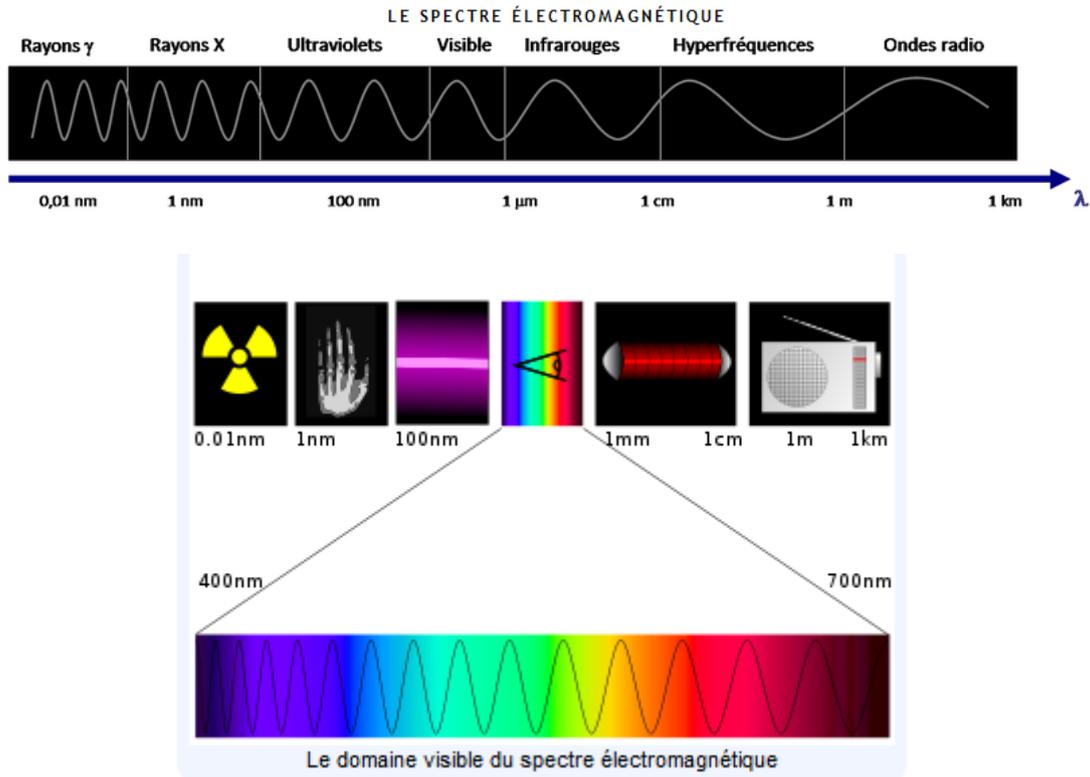
V : est la vitesse de l'onde dans le milieu considéré. Dans le vide :  $v = c$  (la célérité de l'onde).

Ainsi, plus la longueur d'onde du rayonnement est élevée, plus sa fréquence est basse et inversement.

### 3-Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique décrit la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur fréquence ou bien encore de leurs énergies [1] :

Les ondes de faible fréquence, de quelques kilohertz (KHz) à plusieurs gigahertz (GHz), sont appelées *Ondes Radio* ou *Ondes Hertziennes*, à des fréquences plus élevées se trouvent par ordre de fréquence croissant, *l'Infrarouge*, *la lumière visible* (longueur d'onde entre 400 et 700 nm) et *l'Ultraviolet*. Enfin, aux fréquences les plus élevées, se trouvent le domaine des *Rayon X* (entre 1 et 100 nm), puis celui des *Rayons GAMMA* (longueur d'onde inférieur à 1 nm).



**Fig 1** *Spectre Electromagnétique* [2]

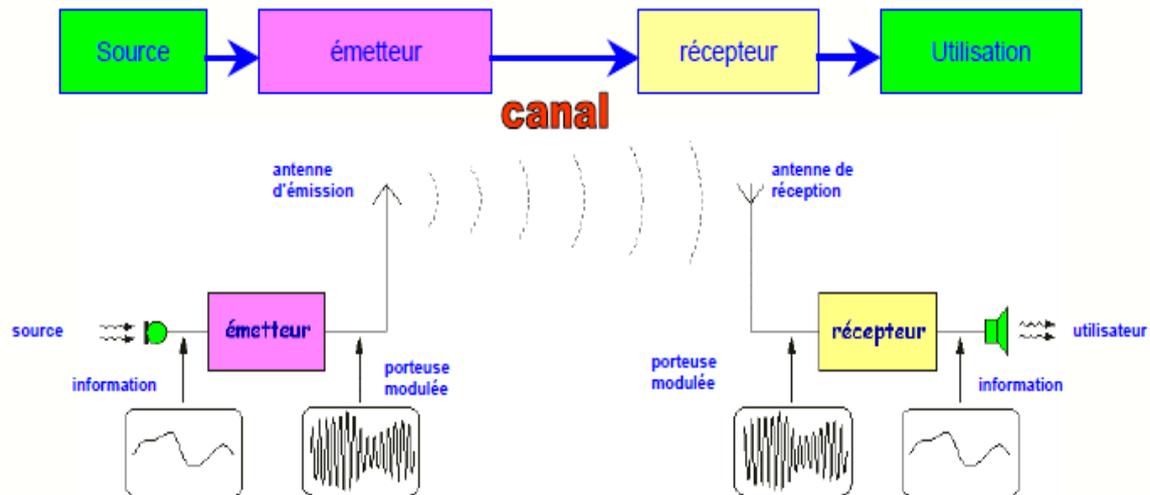
#### 4- Les différentes techniques de transmission

- L'information peut être soit analogique (ex. voix) soit numérique (ex. bits).
- Dans l'ordinateur, le signal est numérique et utilise deux tensions pour représenter le bit.
- Le signal correspondant à la séquence binaire et circulant sur le support de transmission est soit un signal analogique soit un signal numérique.
- Le choix est fait selon les caractéristiques du support et ceux du signal à transmettre.
- La technique de transmission numérique est appelée Transmission en Bande de Base tandis que la transmission analogique est appelée Transmission par Transposition de Fréquence.

#### 5- Notions de base

Afin de comprendre le principe de base de la transmission par modulation, nous allons prendre un simple exemple : la voix, cette dernière est une onde acoustique. Notre soucis est de transmettre ce signal à une distance très éloigné (ex : Radio FM). L'information analogique à transmettre se situe le plus souvent dans la bande audio,  $f_{max} = 10$  kHz. Si on essaie de transmettre l'information analogique telle qu'elle sans traitement particulier, on est confronté à un certain nombre de problèmes, nous devons alors chercher un moyen de transmission entre

l'émetteur et le récepteur [3]. Nous allons donc faire une transposition fréquence, ou bien on dit une translation de spectre. Autrement dit ; le signal basse fréquence (sons, musique, parole) est imprimé sur un signal haute fréquence (la porteuse). La radio, la Télévision, les lignes téléphoniques utilisent le procédé de **modulation**



**Fig 2** Structure d'un système de communications Radio [3]

- la source fournit l'information sous la forme d'un signal analogique
- l'émetteur va effectuer l'opération de modulation en portant le signal RF de fréquence  $f_m$ , dans un signal RF de fréquence  $f_p$  (porteuse).
- L'antenne va émettre ce signal modulé sous forme d'onde électromagnétique.
- le canal est le media de transmission dans lequel se propage l'onde électromagnétique qui relie la source au récepteur
- le récepteur sélectionne la fréquence de la porteuse et démodule l'information qui y est inscrite
- Avec un traitement effectué au niveau du récepteur, l'information de base (signal analogique) est restituée.

## 6. Spectre d'un signal

Le signal électrique issu du microphone peut être représenté soit par sa variation temporelle soit de manière fréquentielle. La variation temporelle du signal électrique est définie par l'évolution de l'amplitude du signal en fonction du temps. Supposons maintenant que le signal se répète (on dit qu'il est périodique). Si la variation temporelle du signal (donc l'amplitude) se répète 100 fois en une seconde, on entendra une multitude de sons, dont un à

100 Hz. Si on accélère la variation temporelle du signal jusqu'à 440 fois par seconde, on entendra une multitude de sons, dont une note à 440 Hz, soit une note plus aigüe par rapport au signal à 100 Hz [3-4].

L'oreille humaine peut percevoir des sons de 20 Hz à 20KHz, à 20 Hz le signal varie lentement (20 fois la même période par seconde), à 20 kHz le signal varie 1000 fois plus rapidement (20 000 fois la même période par seconde). Au-delà, on parle d'ultrasons. La représentation fréquentielle consiste à représenter l'amplitude d'un extrait temporel du signal en fonction de la fréquence. Plus l'amplitude est élevée plus la note est forte, plus la fréquence est élevée plus la note est aigüe [4].

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

Cependant, si on souhaite transmettre ce signal via une antenne, il faudra transformer l'onde électrique vers une **fréquence plus élevée**. On parle alors de **modulation**. Cette opération est nécessaire car la dimension de l'antenne est d'autant plus petite que la fréquence est élevée.

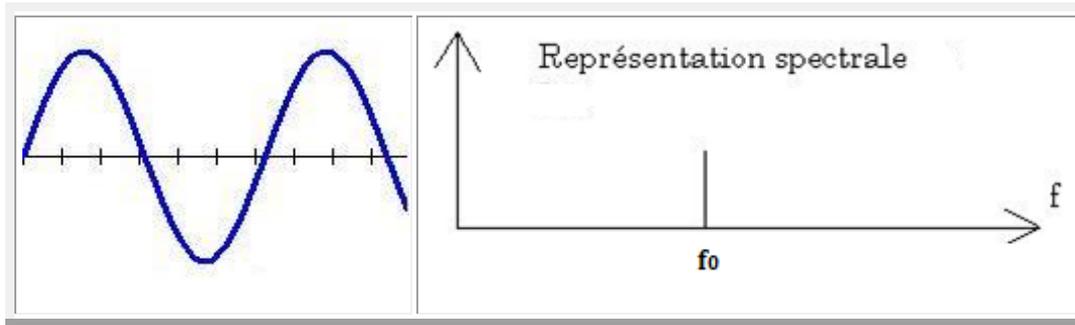
Ex : Un signal à 300 Hz doit être émis par une antenne quart d'onde d'environ 250 km, un signal à 300 MHz doit être émis par une antenne quart d'onde d'environ 25 centimètres.

### **Définition :**

Le spectre d'un signal est la représentation du signal dans le domaine fréquentiel.

## **6.1 Transmission en bande de base**

On appelle transmission en bande de base une transmission d'un signal sans translater son spectre. C.-à-d. sans faire changer sa fréquence initiale. Son principal avantage est la possibilité d'un multiplexage temporel.



**Fig 3** représentation temporelle et fréquentielle d'un signal [4]

Une question importante se pose sur la manière de transmettre cette onde à de très grande distance ?

## 6.2. Modulation, modulant, module

La problématique initiale posée dans ce cours était : "Comment transmettre ma voix à une personne éloignée". Supposons par exemple que l'on veuille transmettre un signal sonore audible. Il encombrerait une plage de fréquences s'étendant de 20 Hz à 20 kHz. La transmission directe de ce signal, par ondes hertziennes est impossible car :

- il serait impossible, à la réception, de distinguer ce signal de tous les autres occupant la même plage de fréquences.
- Les dimensions des antennes sont grandes d'environ une longueur d'onde du signal. Celle-ci atteindrait alors des dimensions prohibitives.
- Même si il était possible de construire l'antenne, étant donné que, dans notre cas, la fréquence du signal varie sur une large plage de fréquences, l'antenne ne serait pas adaptée.

Nous devons alors faire appel à une technique de transmission plus efficace afin de ne pas perdre l'information. En d'autre terme, nous allons translater la fréquence initiale  $f_0$  en une fréquence radio à travers une porteuse. C'est la modulation via des ondes hertziennes. En Réception, le signal HF doit être ramené vers les basses fréquences, c'est la démodulation proprement dite.

La modulation consiste à transformer un signal en bande de base en un signal avec une fréquence radio plus élevée. Dans ce qui suit, on appelle :

- **Porteuse** : le signal connu, porteuse haute fréquence HF ou RF radio fréquence

- **Modulant** : le signal d'information ou signal en bande de base appelé aussi signal audio fréquence AF.
- **Modulé** : le signal résultant de la multiplication de la porteuse par le modulant

Le signal d'information est généralement un signal sinusoïdal défini par son amplitude et sa fréquence  $f_0$ . La fréquence radio est appelée fréquence porteuse RF.

## 7. Principe de la modulation

Dans les transmissions à de très longues distances, Il est nécessaire d'utiliser une technique de modulation appropriée pour transmettre une information d'une source à un destinataire éloigné en adaptant le signal au moyen de transport utilisé, ce dernier est appelé canal de transmission. Parmi les avantages de la modulation nous citons :

- L'adaptation du signal modulé aux caractéristiques fréquentielles du canal de transmission,
- Moindre sensibilité au bruit et parasites externes

*Types de supports de transmissions :*

**7.1 Canal guidé** : câble métallique, fibre optique ... le signal est contenu (guidé) par le support.



**Fig 4** Câble coaxial [5]

**7.2 Canal en espace libre** : faisceaux hertziens, liaisons radios, liaisons sous-marines, le signal se propage librement.



**Fig 5 Faisceaux Hertzien [5]**

Pour les transmissions en espace libre, l'utilisation d'une antenne permet de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement). Le transport d'énergie par une onde électromagnétique va donc permettre le transfert d'information sans support physique à travers un canal ou une liaison radioélectrique, à condition que l'onde électromagnétique soit modulée par un signal informatif. Une liaison radioélectrique est un canal de transmission entre un émetteur et un récepteur, dont le support de transmission est assuré par des ondes électromagnétiques.

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

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2)$$

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

### **7.3 Transmission par fibre optique**



**Fig.6 Fibre optique [5]**

## **8. Signal sinusoïdal**

La modulation consiste à transposer le spectre d'un signal sinusoïdal. La variation de la porteuse peut être apportée sur l'amplitude, la fréquence ou la phase du signal original.

## Définition : Caractéristiques d'un signal sinusoïdal

Un signal sinusoïdal est entièrement défini par trois caractéristiques qui sont :

- son amplitude  $A$
- sa fréquence  $f$
- sa phase  $\phi$

Le signal sinusoïdal s'écrit de la manière suivante :  $m(t)=A_m \cdot \sin (2\pi \cdot f_m t + \phi_p)$ , (1.3)

La porteuse RF est de la forme :  $v(t)=A_c \cdot \sin (2\pi \cdot f_c t + \phi_p)$ , (1.4)

### 8.1 Signal Sinusoïdal-Applications

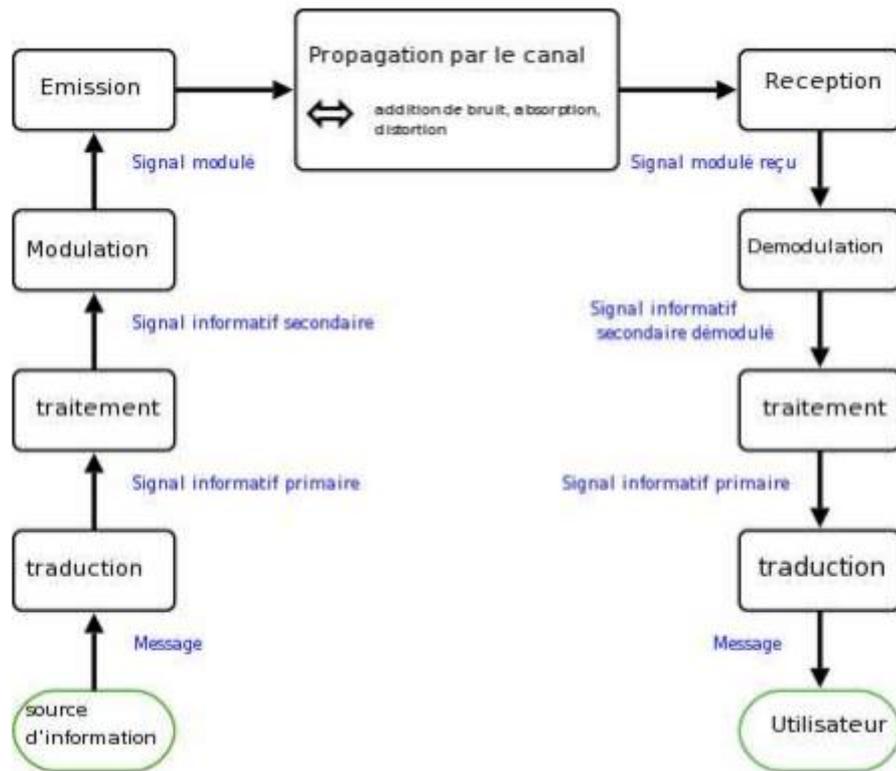
La modification d'une des trois caractéristiques du signal définit trois types de modulations de base :

- Modulation d'Amplitude (AM) : variation de l'amplitude du signal haute fréquence (porteuse), en fonction du signal basse fréquence (signal original), le signal modulant.
- Modulation de Phase (PM) : variation de la phase du signal haute fréquence (porteuse), en fonction du signal basse fréquence (signal original), le signal modulant.
- Modulation de Fréquence (FM). variation de la fréquence du signal haute fréquence (porteuse), en fonction du signal basse fréquence (signal original), le signal modulant.

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter une chaîne de transmission analogique, tout en expliquant le fonctionnement de chaque bloc ou chaque dispositif électronique.

### 8.2 Synoptique d'une chaîne de transmission analogique

Une chaîne de transmission analogique représente l'ensemble des éléments nécessaires à la transmission d'une information de nature analogique (figure7). Elle est composée d'un émetteur, d'un canal de propagation et d'un récepteur.



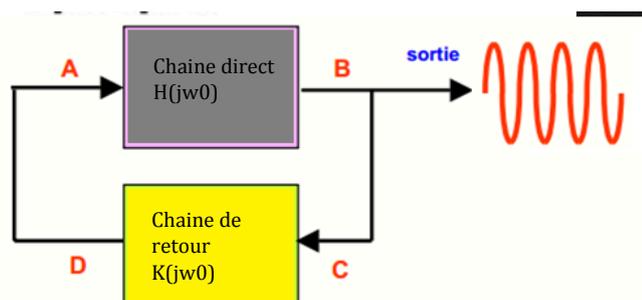
**Fig 7** Schéma Synoptique de la transmission d'information

### 8. 3 Description générale

#### 8.3.1. Oscillateur

Un oscillateur est un générateur de signaux variable périodique sinusoïdaux ou non, c'est tout simplement un système bouclé placé délibérément dans un état d'instabilité qui comporte [6]:

- Une chaîne directe qui est un amplificateur à Aop ou à transistor selon la fréquence de travail
- Un quadripôle de réaction qui réinjecte à l'entrée de l'amplificateur une fraction du signal de sortie
- Il possède une sortie mais pas d'entrée à part l'alimentation



**Fig 8** Principe d'un oscillateur [6]

Les oscillateurs sont des dispositifs essentiels dans les équipements électroniques. Ils permettent de produire une fréquence stable et d'assurer le bon fonctionnement de la fréquence porteuse des émetteurs à titre d'exemple, aussi nous pouvons citer la fréquence de l'oscillateur local en réception etc...

**Condition d'entretien des oscillations : la condition d'oscillation ou la condition de Berkausen est donné par :  $H(j\omega) * K(j\omega) = 1$ .**

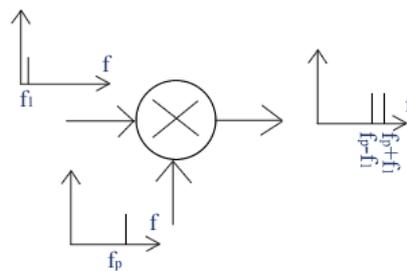
### 8.3.2 Mélangeur

Comme nous avons vue auparavant, le but de la modulation est modifier la caractéristique d'une porteuse et de transposer le spectre du signal AF vers une fréquence plus élevée. Le dispositif électronique qui nous permet de réaliser cette opération s'appelle : un mélangeur.

#### Définition :

**Un mélangeur est un circuit électronique qui effectue la multiplication entre deux signaux [4].**

*Modélisation : Nous pouvons démontrer qu'au niveau du spectre, cela revient à une simple translation autour de  $+f_p$  du signal modulant, c'est-à-dire qu'en multipliant le signal AF par une porteuse RF, nous allons trouver deux raie comme le montre la figure 9.*



**Fig 9** Principe du mélangeur

Soit un signal basse fréquence  $s(t) = A \cdot \sin(2\pi f_1 t)$ , et un signal RF de fréquence  $f_p$  :

$$v(t) = B \cdot \sin(2\pi f_p t) \text{ alors : } s(t) * v(t) = A \cdot \sin(2\pi f_1 t) \cdot B \cdot \sin(2\pi f_p t) \quad (1.5)$$

$$= AB/2 * [\cos(2\pi(f_p - f_1)t) - \cos(2\pi(f_p + f_1)t)]$$

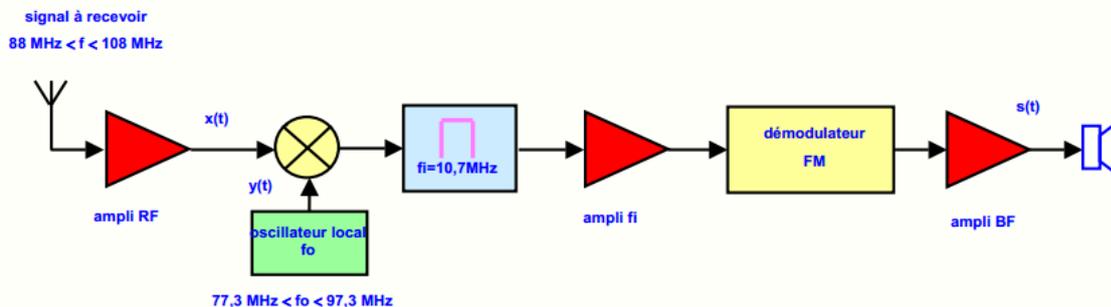
Comme le montre l'équation, nous avons trouvé deux raies, l'une à la fréquence  $f_p+f_l$  et l'autre à la fréquence  $f_p-f_l$ . Nous pouvons dire alors que le spectre a bien été translaté autour de la fréquence  $f_p$

### 8.3.2.1 Principe du récepteur superhétérodyne

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

Un récepteur radio à changement de fréquence pour la radio diffusion FM a les caractéristiques suivantes [7] :

- il est construit pour recevoir la bande de fréquences allant de 88 à 108 MHz
- Dans la bande FM, chaque émetteur occupe une bande de fréquence de largeur  $B = 250$  kHz environ
- la valeur standard du filtre  $f_i$  est de  $f_i = 10,7$  MHz et sa largeur est de 300 kHz
- la plage couverte par l'oscillateur local va de  $f_0 = 77,3$  à  $97,3$  MHz

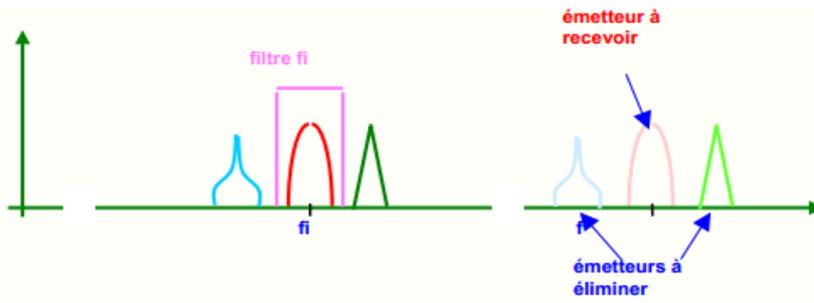


**Fig 10** Principe du récepteur superhétérodyne [7]

Si on veut capter l'émetteur de Ain Temouchent à  $f = 95,9$  MHz :

- l'oscillateur local sera réglé à  $f_0 = 85,2$  MHz
- en sortie du mélangeur, l'émission de Ain Temouchent retrouvera à  $f + f_0 = 181,1$  MHz et à  $f - f_0 = 10,7$  MHz
- Le signal à 10,7 MHz traversera le filtre  $f_i$ , et sera amplifié puis démodulé
- Pour recevoir une émission à la fréquence  $f$ , il faut régler l'oscillateur local à la fréquence  $f_0$  telle que :  $f - f_0 = f_i$  ou  $f_0 - f = f_i$  soit  $f - f_0 = \pm f_i$
- Le filtre  $f_i$  qui sélectionne l'émission désirée et élimine les autres émetteurs assure la sélectivité du récepteur :

- en radiodiffusion AM, la valeur standard est  $f_i = 455$  kHz en radiodiffusion FM, la valeur standard est  $f_i = 10,7$  MHz

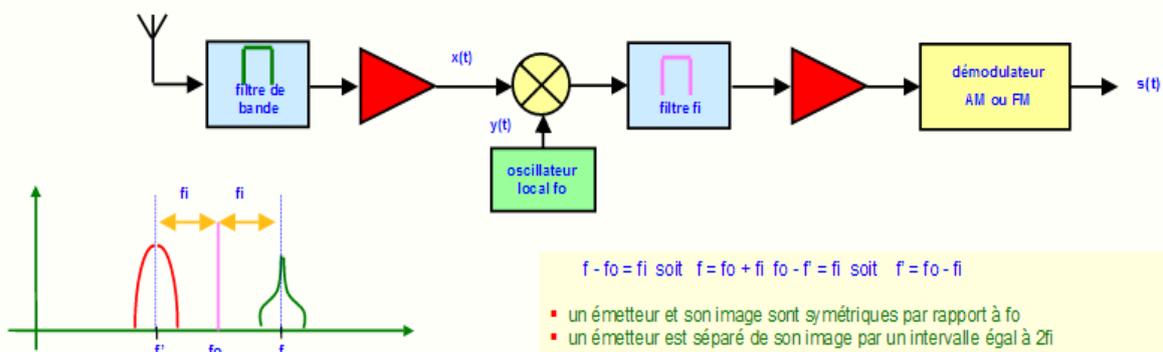


**Fig 11** Principe de la FI [7]

### 8.3.2.2 Fréquence Images X

Cette structure quasi idéale a un défaut puisque 2 émetteurs seront reçus pour une valeur donnée de l'oscillateur local  $f_0$  :

- ✓ Pour recevoir l'émetteur d'Ain Temouchent à  $f = 95,9$  MHz, on règle  $f_0 = 85$  MHz
- ✓ La fréquence  $f' = f_0 - f_i = 74,3$  MHz mélangée à 85 MHz tombera aussi à 10,7 MHz
- ✓ S'il y a un émetteur qui émet à cette fréquence  $f'$ , il sera reçu et se superposera à Ain Temouchent.
- ✓ Cette deuxième fréquence  $f'$  est appelée fréquence image de  $f$ .
- ✓ L'émetteur image peut être supprimée par un filtre de bande qui sélectionne la bande à recevoir et supprime la bande image.



**Fig 12** Principe de la fréquence image [7]

## 8.4 Filtrage Analogique

Un filtre est un circuit électronique qui réalise une opération de traitement du signal. Autrement dit, il atténue certaines composantes d'un signal et en laisse passer d'autres. On parle alors d'un Filtre sélectif [8].

### 8.4.1 Etude du filtre en régime sinusoïdale



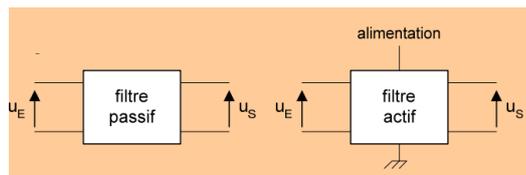
**Fig 13** *filtre en régime sinusoïdale*

Un filtre est caractérisé par :

- ✓ sa réponse en fréquence :  $T_v(f)$  (amplification en tension)  
 $T_v(f) = U_s / U_e = \text{amplitude de la tension de sortie} / \text{amplitude de la tension d'entrée}$
- ✓ sa réponse en phase :  $\varphi (U_s/U_e)$

### 8.4.2 Filtre actif et filtre passif [8]

La figure 14 montre le schéma d'un filtre actif et d'un filtre passif.



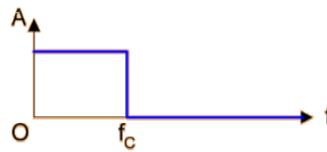
**Fig 14** *Filtre actif et filtre passif*

Le filtre passif ne contient que des composants passifs tels que la résistance, la bobine et le condensateur, par contre un filtre actif contient en plus un élément actif comme par exemple un amplificateur, un transistor.

### 8.4.3 Les types de filtres

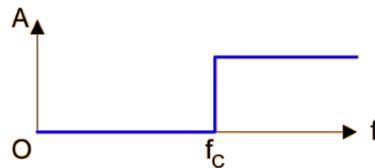
Le paramètre essentiel qui limite le passage d'un filtre à un autre est appelée fréquence de coupure du filtre ( $f_c$ ). On trouve alors :

- ✓ **Filtre passe bas** : il ne laisse passer que les basses fréquences du signal d'entrée.



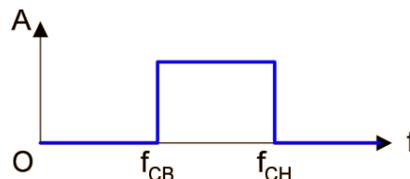
**Fig 15** *Filtre passe bas*

- ✓ **Filtre passe haut** : il ne laisse passer que les hautes fréquences du signal d'entrée.



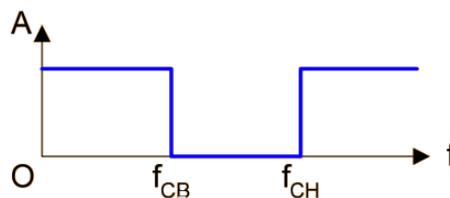
**Fig 16** *Filtre passe haut*

- ✓ **Filtre passe bande** : il ne laisse passer qu'une bande de fréquence



**Fig 17** *Filtre passe bande*

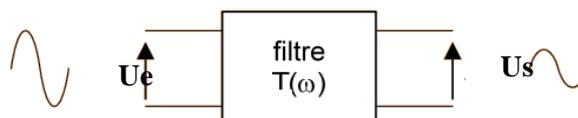
- ✓ **Filtre coupe bande** : il empêche le passage de certaines fréquences



**Fig 18** *Filtre coupe bande*

#### 8.4.4 Fonction de transfert des filtres

La fonction de transfert d'un filtre décrit son comportement en fréquence en régime sinusoïdale :



**Fig 19** *Fonction de transfert d'un filtre*

Elle est donnée par :  $T(\omega) = U_s / U_e$

#### **8.4.4.1 Coût d'un filtre**

Plus un filtre est sélectif, plus sa conception est compliquée et plus le coût est élevé. On choisira par conséquent, dans la mesure du possible, des filtres peu sélectifs dans une chaîne de transmission. La sélectivité peut être déterminée par le rapport bande utile sur fréquence utile. Plus le rapport est petit, plus le filtre est sélectif [4].

#### **8.4.4.2 Structure superhétérodyne du récepteur - choix de la fréquence intermédiaire**

Pour avoir un filtre sélectif moins coûteux, on choisit préférentiellement une fréquence intermédiaire plus petite que la fréquence porteuse. Cependant, dans certains cas, l'emploi de filtre céramique impose un autre choix ou la fréquence intermédiaire est plus élevée [4].

### **8.5 Le canal de transmission**

En communication, un canal est un média de transmission d'information. Il relie la source au destinataire et permet l'acheminement du message. La largeur du canal dépend du type d'application: 8Mhz pour un canal TV, 250 KHz pour un canal audio FM, 12,6 KHz en téléphonie

## **Conclusions - révision premier cours**

**Ce premier cours est dédié à définir le principe d'une modulation analogique et à présenter ses conséquences sur les paramètres d'une chaîne de transmission. A ce stade, l'étudiant doit être capable de comprendre les objectifs de transmission sur des canaux guidés ou non guidés avec l'usage d'un certain type de modulation, les conséquences principalement au niveau du spectre, du canal et de l'antenne elle-même.**

## CHAPITRE 2 : MODULATION D'AMPLITUDE

### Objectif

La modulation analogique se base sur trois grandes classes : AM, FM et PM. Dans ce deuxième chapitre, l'étudiant est initié à la modulation d'amplitude à savoir la modulation à porteuse, à porteuse supprimée et bande latérale unique. Une étude sur les dispositifs de modulations/démodulations est mise en œuvre pour chaque technique de modulation d'amplitude.

### 1. Généralités

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

La modulation d'amplitude consiste à modifier l'amplitude de la porteuse par une fonction linéaire ( $y=Ax+b$ ) du signal à transmettre [3- 4].

Ainsi, soient :

• La porteuse :	$v(t)=A_c.\sin (2\pi.f_c t+\varphi_p)$	(2.6)
• Le modulant (signal d'information) :	$m(t) = A_m.\sin(2\pi.f_m t+\varphi_m)$	(2.7)
• Le signal modulé :	$S_{AM}(t)=[A_c+k.m(t)].\sin(2\pi.f_c t+\varphi_c)$	(2.8)

### 2. Emetteur AM

Les composants essentiels d'un émetteur AM sont schématisés sur le schéma symbolique suivant :

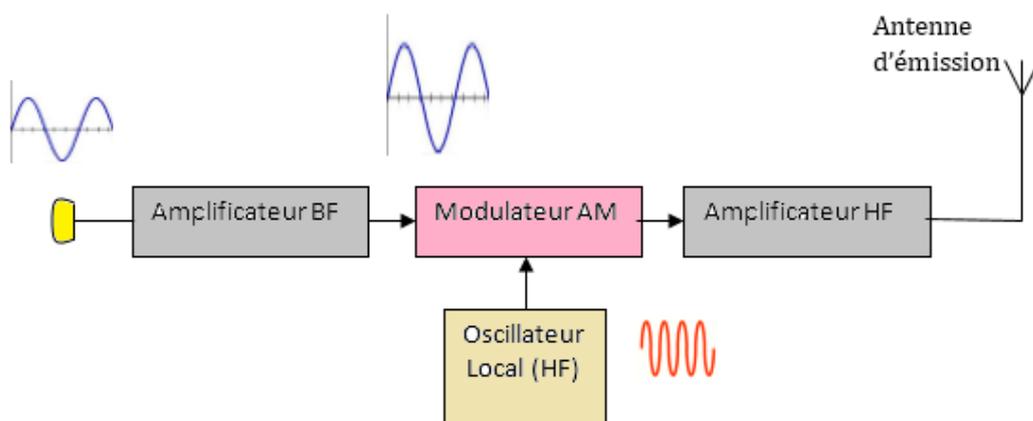


Fig 20 Emetteur AM

- **Amplificateur BF**

Les amplificateurs sont des appareils électroniques destinés à augmenter (amplifier) le signal BF (exemple : le signal faible provenant du microphone) [9].

- **Oscillateur local**

Un oscillateur est un circuit qui génère un signal comme nous l'avons expliqué au premier chapitre.

- **Modulateur AM:** (Modulation AM)

Le but de la radio diffusion est de transmettre à distance (parole, music,...) depuis un centre d'émission jusqu'à une multitude de récepteur. Pour transmettre un spectre audible de fréquence [20 Hz- 20KHz] dans l'espace, il faut réaliser ce qu'on appelle la modulation, ce qui consiste à utiliser une fréquence radio dite porteuse. A la réception, pour extraire le spectre audible (ainsi transmis) du signal porteur d'information ainsi reçu, on réalise la démodulation [9].

Une onde porteuse radio fréquence (RF) sinusoïdale peut se présenter par l'expression :  
 $v(t)=A_c.\sin (2\pi.f_c t+\varphi_c)$

L'onde est caractérisée par les 3 grandeurs suivantes :

- L'amplitude :  $A_c$
- La fréquence :  $f_c = \frac{\omega}{2\pi}$  (2.9)
- La phase :  $\varphi_c$  (2.10)

Donc il existe plusieurs principes de modulation dont les deux plus utilisés couramment en radio de diffusion sont : la *modulation AM* et *modulation FM*.

### 3. Modélisation

La modulation d'amplitude (AM) consiste à faire varier l'amplitude  $A_c$  du signal Radio-Fréquence (RF), (HF) au rythme du signal Audio-Fréquence (AF).

Supposons que  $v(t)$  et  $m(t)$  sont deux grandeurs sinusoïdales respectivement de fréquence  $f_c, f_m$  avec  $f_c \gg f_m$  et données par les relations suivantes :

$$v(t) = A_c \sin \omega t \text{ , Avec } \omega = 2\pi f_c \text{ (HF, RF)} \quad (2.11)$$

$$m(t) = A_m \sin \Omega t \text{ Avec } \Omega = 2\pi f_m \text{ (BF, AF)} \quad (2.12)$$

L'amplitude modulée sera :

$$V'_{RF} = A_c + m(t) \quad (2.13)$$

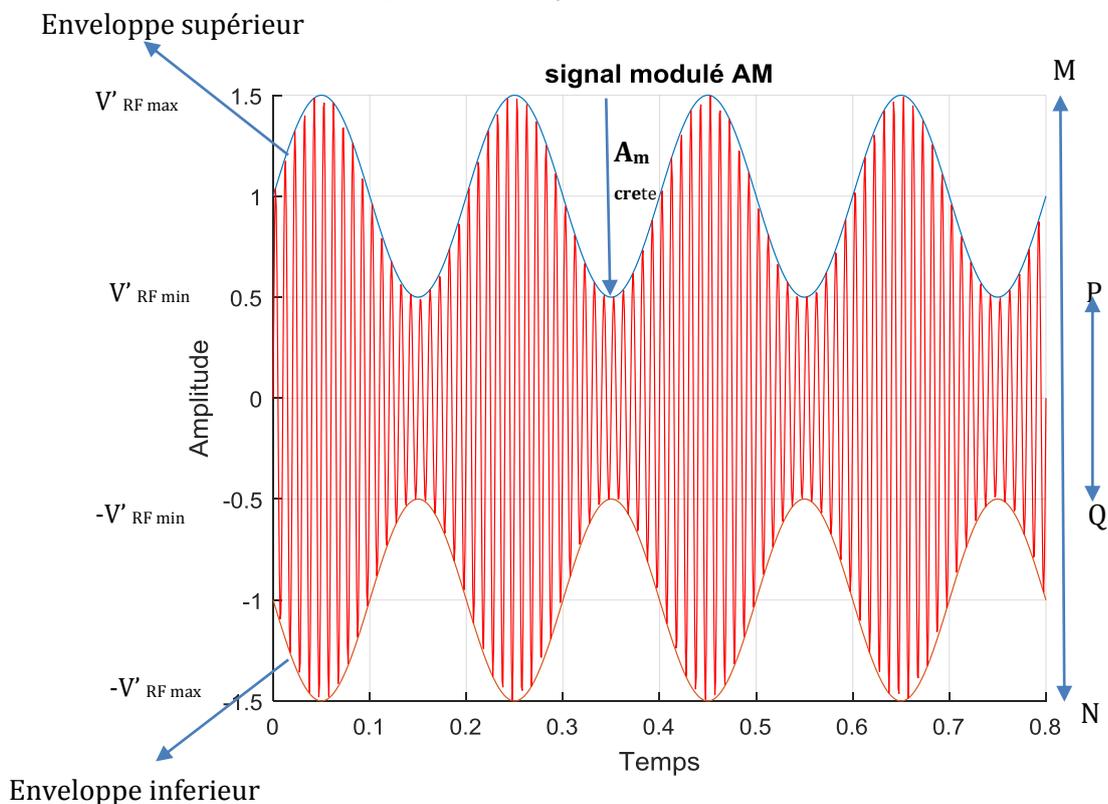
$$V'_{RF} = A_c + A_m \sin \Omega t = A_c \left( 1 + \frac{A_m}{A_c} \sin \Omega t \right) \quad (2.14)$$

$$V'_{RF} = A_c (1 + m \sin \Omega t) \quad (2.15)$$

où :  $m = \frac{A_m}{A_c}$  = amplitude du signal basse fréquence / amplitude de la porteuse

$$\text{L'expression du signal modulé AM est donc : } S_{AM}(t) = V'_{RF} \sin \omega t \quad (2.16)$$

$$S_{AM}(t) = A_c (1 + m \sin \Omega t) \sin \omega t \quad (2.17)$$



**Fig 21** Signal modulé en amplitude

Avec :  $A_c (1 + m \cdot \sin \Omega t)$  présente l'enveloppe supérieur

-  $A_c (1 + m \cdot \sin \Omega t)$  présente l'enveloppe inférieur

#### 4. Taux de modulation m

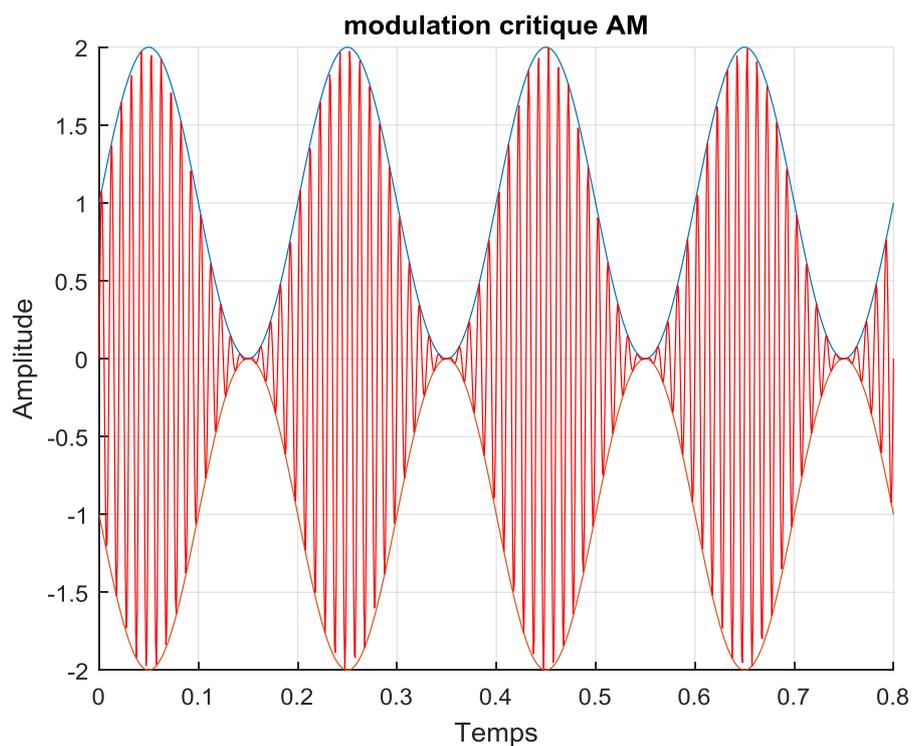
Le taux de modulation, noté m est la caractéristique du modulateur. Il représente l'amplitude du signal modulé par rapport à l'amplitude de la porteuse ; il est en général en %.

(2.18)

$$m = \frac{A_{AF}}{A_{RF}} = \frac{A_m}{A_c}, \quad m = \frac{\overline{MN} - \overline{PQ}}{\overline{MN} + \overline{PQ}}$$

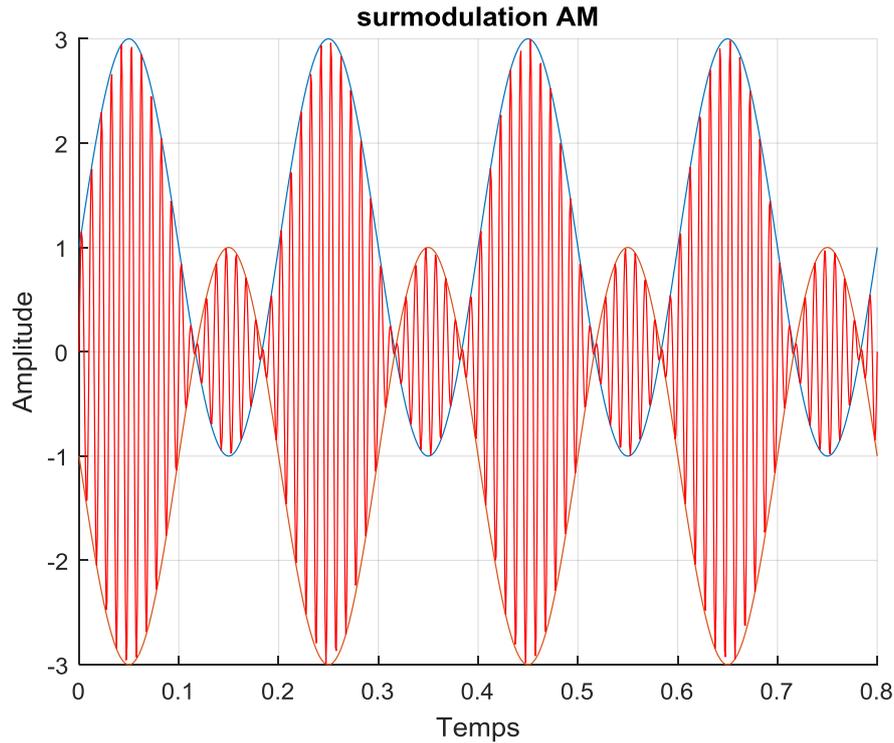
1- Dans le cas d'une modulation = 100% ( $m = 100\%$  ou  $m = 1$ )

Le signal a la forme suivant :



**Fig 22** signal AM avec un taux de modulation  $m = 100\%$

2- Dans le cas d'une sur-modulation si  $m > 100\%$  (c-à-d  $m > 1$ ), l'oscillogramme prend l'aspect suivant :



**Fig 23** forme du signal AM avec un taux de modulation  $m > 100\%$

### 5. Spectre de la Modulation AM

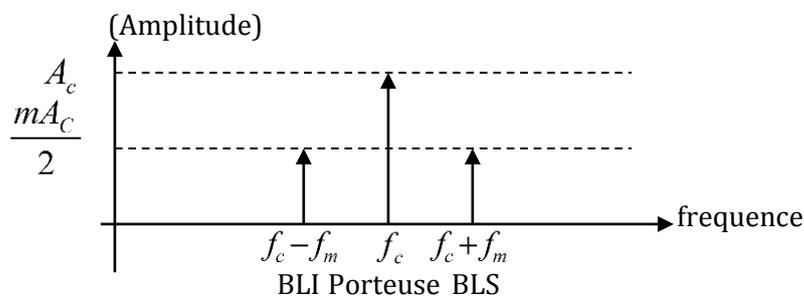
Soit  $v(t) = A_c \sin \omega t = A_c \sin 2\pi f_c t$  (Une onde HF sinusoidale). (2.19)

$m(t) = A_m \sin \Omega t = A_m \sin 2\pi f_m t$  (Une onde BF sinusoidale). (2.20)

$S_{AM}(t) = A_c (1 + m \cdot \sin \Omega t) \sin \omega t$  (2.21)

$S_{AM}(t) = A_c \sin 2\pi f_c t + \frac{m \cdot A_c}{2} \cos 2\pi (f_c - f_m) t - \frac{m \cdot A_c}{2} \cos 2\pi (f_c + f_m) t$  (2.22)

Donc on peut représenter le spectre de l'onde modulée dans le domaine des fréquences :



**Fig 24** Présentation Spectrale du signal AM

- La puissance totale dissipée dans l'antenne et donc émise vaut :

$$S_{AM}(t) = A_c \sin 2\pi f_c t + \frac{m.A_c}{2} \cos 2\pi(f_c - f_m)t - \frac{m.A_c}{2} \cos 2\pi(f_c + f_m)t \quad (2.23)$$

$$P_{Etotal} = \frac{\left(\frac{A_c}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} + 2 \frac{\left(\frac{mA_c}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} = P_p \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) = P_p + P_{BLS} + P_{BLI} \quad (2.24)$$

## 6. Bande occupée

La bande occupée correspond à la largeur de bande nécessaire à la transmission du signal après la modulation. La bande de largeur minimale est la bande spectrale minimale à transmettre pour être capable de récupérer le signal émis [4].

Nous pouvons déduire sa valeur à partir du spectre du signal modulé :

$$B = (f_c - f_m) - (f_c + f_m) = 2f_m, \text{ la bande passante est mesurée en Hertz}$$

L'objectif à atteindre en réalité est de réduire le maximum cette bande occupée afin de transmettre le maximum d'informations, ainsi le cout des circuits est un facteur important, on cherche toujours à utiliser des circuits simples et moins couteux.

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

### 6.1 Puissance émise

La puissance émise représente la puissance du signal modulé à l'entrée du câble ou à la sortie de l'antenne. La puissance est définie par [4] :

$$P_W = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt \quad (2.25)$$

La puissance s'exprime en Watt, avec la tension u en Volt et l'intensité i en Ampère. On préfère couramment exprimée cette notion en dB par la relation suivante :

$$P_{dB} = 10 * \log_{10}(P_W) \quad (2.26)$$

### 6.2 Puissance normalisée

En règle générale, on s'arrange pour que la puissance transmise soit réalisée via un élément purement résistif [4].

En appliquant la définition précédente, la puissance moyenne dissipée est :

$$P_w = \frac{1}{T} \int_0^T u(t).i(t)dt = \frac{1}{RT} \int_0^T u^2(t)dt = \frac{1}{R} \langle u(t)^2 \rangle \quad (2.27)$$

La puissance normalisée est définie pour  $R=1$ .

### **Théorème : Rappel de la formule de Parseval**

La puissance normalisée d'un signal périodique de période  $T$  est égale à la somme des carrés de chaque raie du spectre :

$$P_w = \frac{1}{T} \int_0^T u(t).i(t)dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} S^2(kf) \quad (2.28)$$

### **Conséquences**

- Le système d'émission ou le système de réception doit posséder une bande passante de largeur  $2f_m$  centrée sur  $f_c$ .
- Une émission voisine ne devra pas chevaucher la bande de fréquence  $[f_c-f_m, f_c+f_m]$

### **7. Types de Modulations d'amplitude**

Pour économiser la puissance transmise, on peut supprimer la raie à la fréquence porteuse et/ou supprimer une des deux bandes (**BLU**). La première technique s'appelle : **Modulation d'amplitude sans porteuse**, la seconde est la **modulation d'amplitude à Bande Latérale Unique**. L'avantage de la deuxième méthode est de réduire en plus l'occupation de la bande occupée.

### 7.1. Modulation d'amplitude sans porteuse

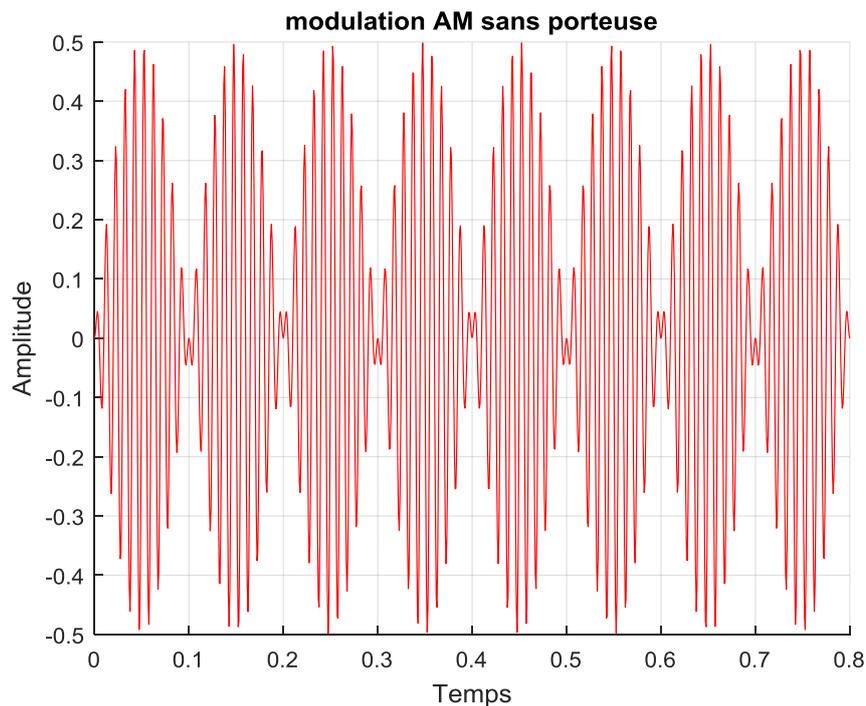
Comme son nom l'indique, la modulation d'amplitude sans porteuse consiste à émettre le signal modulé AM défini précédemment en supprimant le terme de la porteuse.

#### Théorème : Modulation d'amplitude sans porteuse

Cela revient donc à émettre le signal suivant :

$$S_{AM}(t) = k \cdot m(t) \cdot A_c \cdot \sin(2\pi \cdot f_c t) = K \cdot A_m \cdot \sin(2\pi \cdot f_m \cdot t) \cdot A_c \cdot \sin(2\pi \cdot f_c \cdot t) \quad (2.29)$$

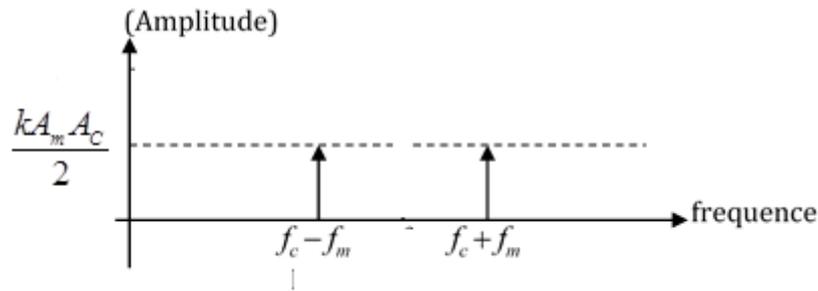
avec  $k$  est le gain du multiplicateur



**Fig 25** modulation sans porteuse

Sur la Figure 25 on distingue l'enveloppe extérieure du signal qui est égale au signal modulant et à l'intérieur un signal qui est la porteuse.

**Spectre :** La représentation fréquentielle est similaire à la courbe présentée précédemment exceptée la porteuse qui est supprimée, ce qui revient à :



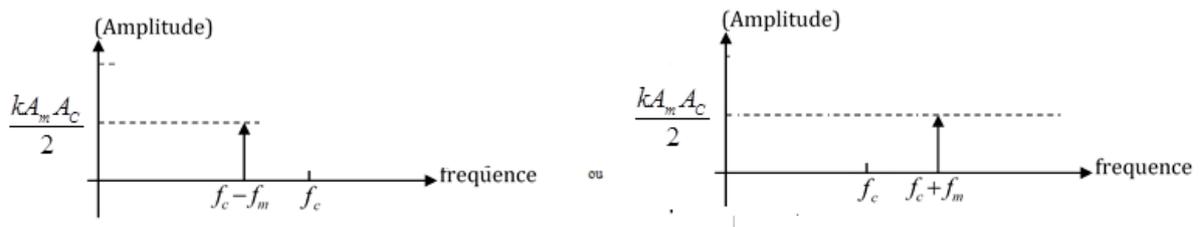
**Fig 26** Spectre de la *modulation sans porteuse*

## 7.2. Modulation BLU

Modulation d'amplitude à bande latérale unique (BLU)

Nous savons que moduler un signal autour d'une porteuse  $f_p$  par le biais d'une modulation d'amplitude consiste à translater le spectre en bande de base vers la fréquence porteuse. De ce fait, au regard de la Figure 27, l'information transmise autour de la porteuse est identique (BLS, BLI). Nous allons donc réduire l'occupation spectrale en ne transmettant qu'une seule bande sur les deux.

$$S_{AM}(t) = \frac{k \cdot A_m \cdot A_c}{2} \cos 2\pi(f_c + f_m)t \quad \text{ou} \quad S_{AM}(t) = \frac{k \cdot A_m \cdot A_c}{2} \cos 2\pi(f_c - f_m)t$$



**Figure 27** Représentation fréquentielle du signal modulé en amplitude à BLU

## 7.3. Démodulation non cohérente

On appelle démodulation incohérente, une démodulation qui ne nécessite pas la connaissance de la porteuse. La détection d'enveloppe n'est pas nécessaire [4].

### 6.1.1 Enveloppe d'un signal

Le signal modulé possède deux enveloppes, un supérieur et l'autre inférieure. Cette dernière est la forme Basse Fréquence du signal. Sur la figure ci-dessous, l'enveloppe du signal est représentée en trait plein et le signal modulé en pointillé.

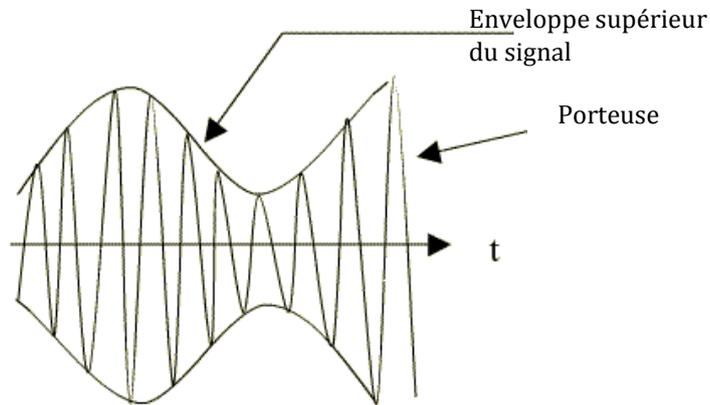


Fig 28 enveloppe du signal modulé

## 8. Récepteur AM

### 8.1 Introduction

Après Traitement, Modulation, Amplification du signal à l'émission, le signal résultant est transmis dans l'espace par l'intermédiaire d'une antenne (Faisceau Hertzien). A la réception une très faible partie du signal est captée par l'antenne du récepteur, ensuite acheminée vers l'entrée du récepteur pour la détection et traitement du signal informationnel [9].

### 8.2 Récepteur superhétérodyne : (ou à changement de fréquence)

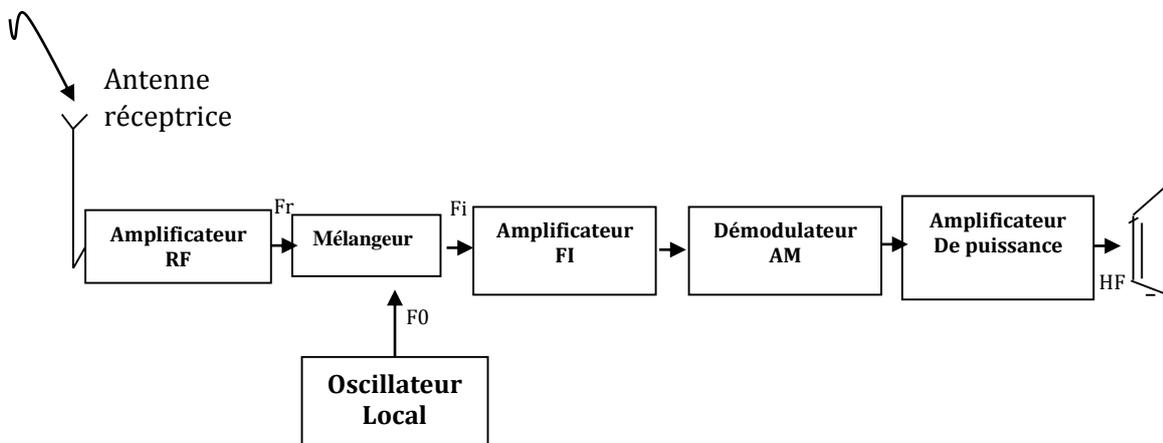
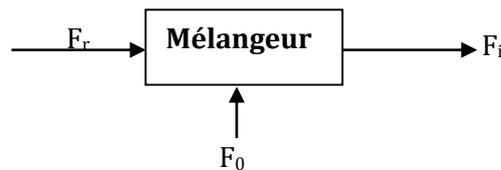


Fig 29 Récepteur AM

- **Antenne réceptrice :** a pour rôle de capter l'onde électromagnétique et de la transformer en un courant électrique.
- **Amplificateur RF :** Cet Amplificateur permet d'amplifier le signal modulé (c-à-d amplification de la porteuse).
- **Mélangeur :** Le mélangeur est un montage dans lequel la partie non linéaire de la caractéristique de l'élément actif est exploité

**Principe :** Soit le schéma synoptique suivant :

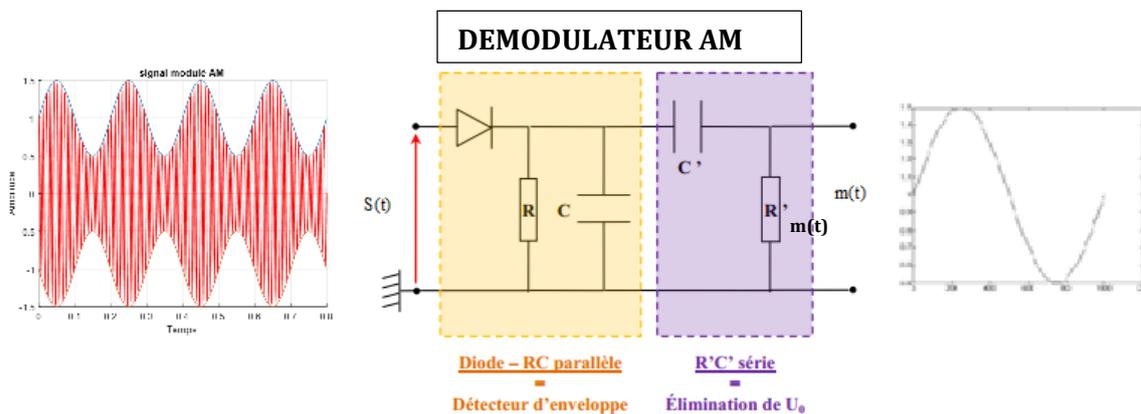


**Fig 30** principe du mélangeur

Le mélangeur reçoit deux signaux de fréquence  $F_0$  et  $F_r$ . Le signal de fréquence  $F_r$  est le signal issu de l'antenne et passant par le circuit d'entrée. Le signal de fréquence  $F_0$  est le signal délivré par un Oscillateur local.

**8.3 Démodulateur AM :** La démodulation d'un signal modulé en amplitude (détection) a pour but d'obtention d'un signal audiofréquence (AF, BF) à partir du signal (RF, HF), voir figure :

Le démodulateur AM est aussi appelé *Détecteur d'enveloppe*.

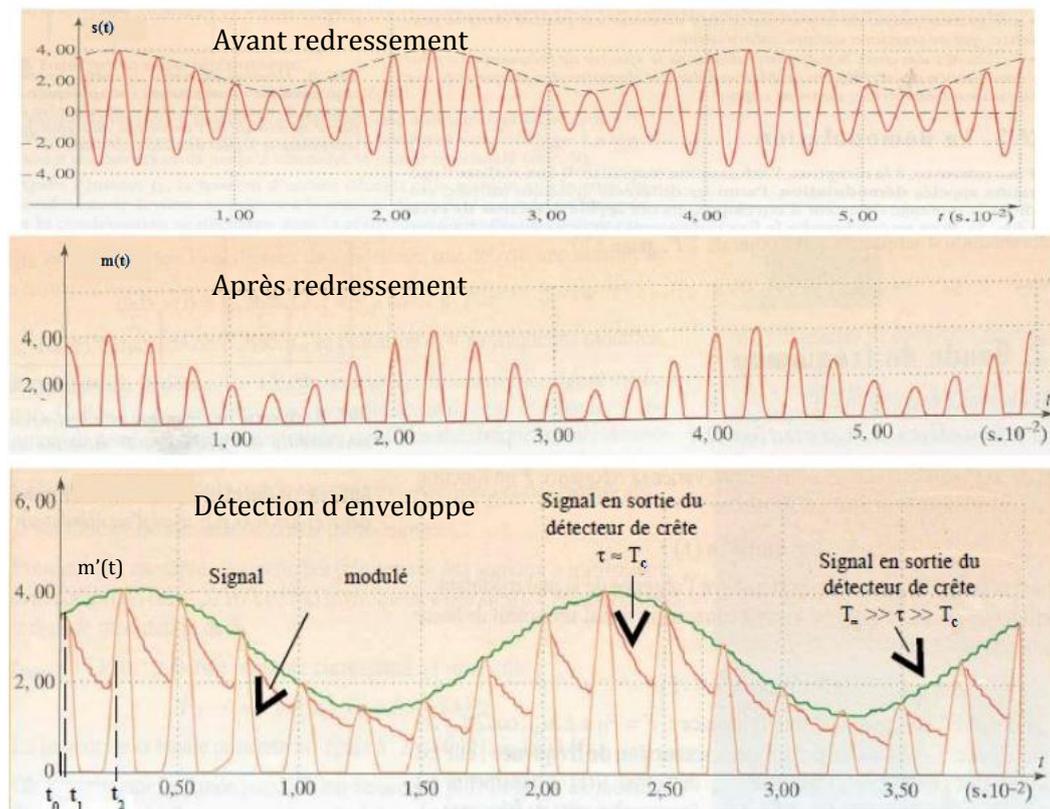


**Fig 31** Démodulation AM avec un détecteur d'enveloppe [10]

### 8.4 Détermination du détecteur d'enveloppe

Le détecteur d'enveloppe est utilisé pour démoduler des signaux modulés en amplitude (avec porteuse et double bande) et avec un indice de modulation  $m$  inférieur à 1. La porteuse est définie avec une fréquence  $f_c$ . Le signal modulant (information) est défini sur une gamme de

fréquence dont la fréquence max est  $f_{\max}$  [4]. Pour que la démodulation d'amplitude donne des résultats corrects, il faut choisir la résistance R et la capacité C du démodulateur d'enveloppe (tel que la constante de temps de charge/décharge du condensateur  $\tau=RC$  soit lente par rapport à la porteuse mais sensiblement égale à la fréquence maximale du signal modulant). Ainsi, on choisira :  $1/RC \ll f_c$  et  $1/RC > f_m$ .



Suppression de la composante continue du signal modulant  $m(t)$

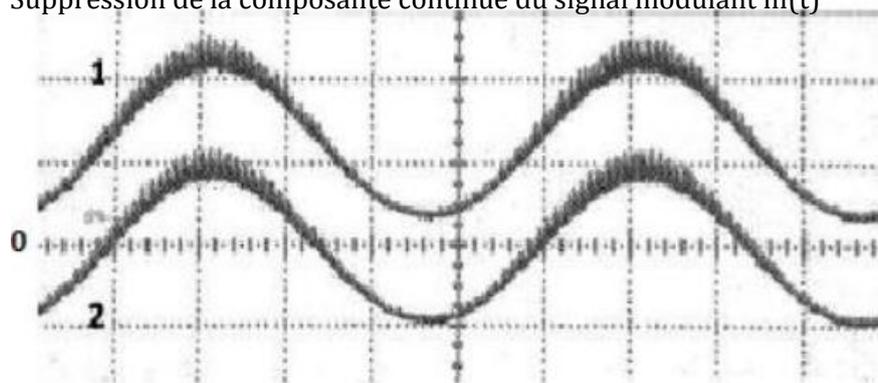


Fig 33 Etapes de démodulation du signal [10]

La durée de la décharge a une influence notable sur la forme du signal recueilli en sortie du montage « Détecteur de crête ».

Concernant la décharge du condensateur :

- ✓ plus la décharge est rapide, plus ce signal  $m'(t)$  ressemblera au signal modulé redressé
- ✓ plus la décharge est lente, plus ce signal  $m'(t)$  ressemblera à l'enveloppe du signal modulant.

Concernant la charge

- ✓ plus la charge est rapide, plus ce signal  $m'(t)$  ressemblera à l'enveloppe du signal modulant
- ✓ plus la charge est lente, plus ce signal  $m'(t)$  ressemblera au signal modulé redressé

### 8.5. Démodulation cohérente

La démodulation cohérente, appelée aussi démodulation synchrone nécessite de récupérer ou de reconstruire la porteuse. Une fois la porteuse reconstruite, on multiplie le signal reçu (signal modulé) avec la porteuse reconstruite et on filtre le signal par un filtre passe-bas car le signal multiplié se retrouve en bande de base [4] ;

## 9. Performance de la modulation AM en présence du bruit

Ce qui importe avant tout pour l'utilisateur d'un système de transmission, c'est la qualité du message reçu. Celui-ci devra être une réplique aussi semblable que possible au message émis. Or, le processus de transmission conduit inévitablement à une dégradation du message dont la cause incontournable est le *bruit* que l'on rencontre dans tous les équipements électroniques. Celui-ci va se superposer au signal reçu et perturber l'intelligibilité du message. Chaque modulateur présente un comportement différent vis-à-vis du bruit. Il convient d'examiner les effets du bruit sur la qualité de la transmission, en fonction des différentes techniques de modulation, pour aboutir à une esquisse de comparaison.

### 9.1 Mesure quantitative de la qualité d'une transmission

Le signal de sortie du récepteur peut s'écrire :  $y(t) = k s(t) + \text{termes de bruit}$

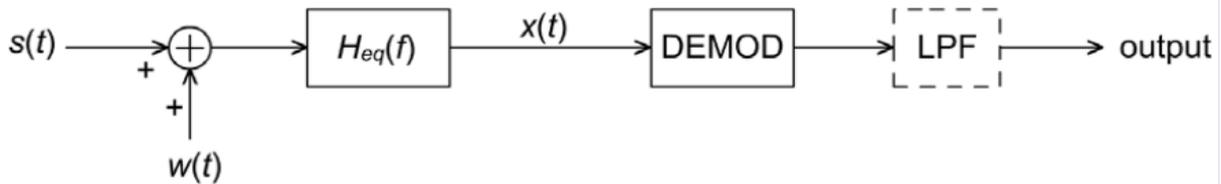
$S(t)$  étant le signal de modulation initial,

La qualité de la transmission sera d'autant meilleure que les termes de bruit seront faibles devant le terme de message.

- On évalue quantitativement cette qualité par le **rapport S/B**

### 9.1.1 Modèle de récepteur :

Pour étudier les performances du bruit, nous utiliserons un model simplifier de récepteur superhétérodyne de la figure 34 [11-13] :



**Fig 34** modèle de récepteur superhétérodyne [11]

- $H_{eq}(f)$  est le filtre équivalent IF;
- $S(t)$  est le signal modulé
- $W(t)$  est le BBGA de densité spectrale  $S_N(f) = N_0/2$
- $m(t)$  est le signal en bande de base de même puissance que  $S(t)$
- LPF : filtre passe bas
- $f_c$  : fréquence de la porteuse.
- Nous considérons que  $H_{eq}(f)$  est un filtre équivalent passe bas idéal à bande étroite avec une bande comprise entre  $[f_c - W, f_c + W]$  pour des modulations à double bande latérale.
- Pour le cas de la SSB, nous prenons la bande de filtrage soit entre  $[f_c - W, f_c]$  ou  $[f_c, f_c + W]$ ,
- La bande passante est de  $2W$  pour la modulation à double bande latérale DSB et  $W$  pour une modulation à bande latérale unique SSB,
- En outre, dans le présent contexte,  $f_c$  représente la fréquence de la porteuse mesuré à la sortie de mélangeur,
- $X(t)$  est le signal d'entrée du détecteur :  $x(t) = s(t) + n(t)$

### Rapport signal sur bruit et facteur d'amélioration

Le rapport signal sur bruit de sortie est défini par [11] :

$SNR_0$  = puissance moyenne du signal à la sortie du récepteur / puissance moyenne du bruit à la sortie du récepteur.

Le rapport signal sur bruit de référence est défini par :

$SNR_r$  = puissance moyenne du signal à l'entrée du récepteur / puissance moyenne du bruit dans la bande passante du message à l'entrée.

Dans le but de comparer différents systèmes de modulation, nous utilisons le facteur d'amélioration définie comme :  $\Delta SNR = SNR_0 / SNR_r$

Le signal  $x(t)$  est à bande étroite, il est défini comme :

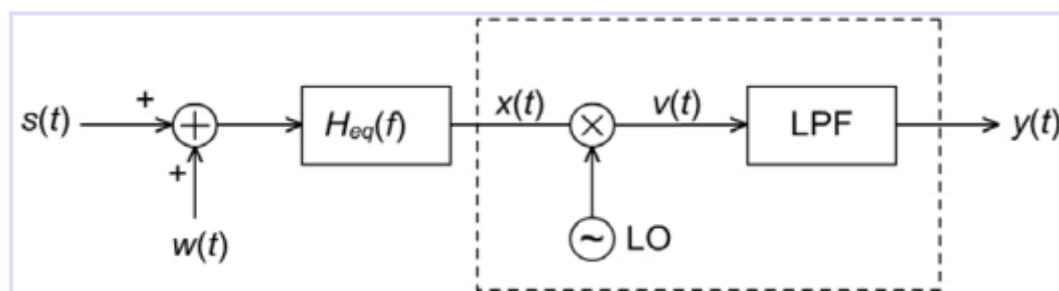
$$x(t) = \begin{cases} x_c(t) \cos(\omega_c t) - x_s(t) \sin(\omega_c t) \\ A(t) \cos[\omega_c t + \varphi(t)] \end{cases} \quad (2.30)$$

- $X_c$  et  $X_s$  sont respectivement les composantes en phase et en quadrature du signal d'entrée  $x(t)$
- $A(t)$  enveloppe du signal
- $\varphi(t)$  est la phase du signal

## 9.1.2 Démodulation Cohérente

### 9.1.2.1 DBL- PS

Le modèle de récepteur pour la détection cohérente des signaux **DBL- PS** est donné sur la figure 35 :



**Fig 35** modèle de récepteur AM [11]

Le signal **DBL- PS** est :  $S(t) = A_c m(t) \cos(\omega_c t)$

$m(t)$  est le signal modulant avec une densité spectrale de puissance  $S_M(f)$  limité (2.31)

$X(t) = s(t) + n(t)$  : signal à l'entrée du détecteur. (2.32)

$\Delta SNR = SNR_0 / SNR_r$  (2.33)

- Puissance moyenne du signal modulée :

$$S_s(f) = \text{TF}[R_s(\tau)] \quad (2.34)$$

La fonction d'autocorrélation du message  $s(t)$  :

$$R_s(\tau) = \frac{A_c^2}{2} R_M(\tau) \cos(\omega_c \tau) \quad (2.35)$$

Avec l'usage de la propriété de modulation, nous trouverons :

$$S_s(f) = \frac{A_c^2}{4} [S_M(f - f_c) + S_M(f + f_c)] \quad (2.36)$$

La puissance moyenne du signal est donnée par :

$$P_M = \int_{-\infty}^{\infty} S_M(f) df = \int_{-W}^W S_M(f) df \quad (2.37)$$

Donc :

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_s(f) df = 2 \frac{A_c^2}{4} \int_{f_c - W}^{f_c + W} S_M(f - f_c) df = \frac{A_c^2 P_M}{2} \quad (2.38)$$

La puissance moyenne du signal est :  $A_c^2 P_M / 2$  (2.39)

Avec la DSP du bruit est de  $N_0/2$  ( aux deux cotés ), alors la puissance moyenne dans la bande passante du message sera :  $2W * N_0/2 = W * N_0$  (2.40)

$$(SNR)_r = \frac{A_c^2 P_M}{2W N_0} \quad (2.41)$$

Calculons le  $(SNR)_0$  : (2.42)

$$X(t) = S(t) + n(t) ;$$

Exprimons  $n(t)$  en fonctions des composantes en phase et en quadrature :

$$x(t) = A_c m(t) \cos(\omega_c t) + n_c(t) \cos(\omega_c t) - n_s \sin(\omega_c t) \quad (2.43)$$

Admettons que la sortie de l'oscillateur est  $\cos(\omega_c t)$  alors la sortie du multiplicateur de détection donne le signal  $V(t)$  de forme :

$$v(t) = \frac{1}{2} A_c m(t) + \frac{1}{2} n_c(t) + \frac{1}{2} [A_c m(t) + n_c(t)] \cos(2\omega_c t) - \frac{1}{2} A_c n_s(t) \sin(2\omega_c t) \quad (2.44)$$

Le filtre passe bas LPF rejette les composantes spectrales autour de  $2f_c$ , nous aurons alors :

$$y(t) = \frac{1}{2} A_c m(t) + \frac{1}{2} n_c(t) \quad (2.45)$$

D'après cette équation, nous pouvons conclure que :

1/ le signal et le bruit qui sont additif à l'entrée sont aussi additif à la sortie du détecteur.

2/ le détecteur cohérent rejette complètement la composante en quadrature  $n_s(t)$ .

La composante du message à la sortie du récepteur est de :  $\frac{1}{2} A_c m(t)$  (2.46)

$$P_M = A_c^2 P_M / 4 \quad (2.47)$$

$$(\text{SNR})_0 = A_c^2 P_M / 2WN_0 \quad (2.48)$$

**Le facteur d'amélioration est donc :  $\Delta\text{SNR} = 1$ ,**

### 9.1.2.2 BLU-PS

Admettons que la bande Latérale inférieure BLI a été transmise ; nous pouvons écrire :

$$s(t) = \frac{A_c}{2} m(t) \cos(\omega_c t) + \frac{A_c}{2} \hat{m}(t) \sin(\omega_c t) \quad (2.49)$$

Signal DSB-SC

version déphasée

Où :  $\hat{m}(t)$  est la transformée d'Hilbert du message  $m(t)$ .

$$S(t) = \frac{A_c}{2} M(t) \cos(\omega_c t) + \frac{A_c}{2} \hat{M}(t) \sin(\omega_c t). \quad (2.50)$$

$$R_s(\tau) = \frac{A_c^2}{4} [R_M(\tau) \cos(\omega_c \tau) + \hat{R}_M(\tau) \sin(\omega_c \tau)] \quad (2.51)$$

La puissance moyenne du signal est :

$$R_s(0) = \frac{A_c^2}{4} P_M \quad (2.52)$$

Alors :

$$(SNR)_r = \frac{A_c^2 P_M}{4W N_0} \quad (2.53)$$

$$n(t) = n_c(t) \cos(\omega_c t) - n_s(t) \sin(\omega_c t) \quad (2.54)$$

$$y(t) = \frac{1}{4} A_c m(t) + \frac{1}{2} n_c(t) \quad (2.55)$$

La puissance moyenne est :  $A_c^2 P_M / 16$  et la puissance moyenne du bruit =  $1/4 (W * N_0)$

$$\begin{aligned} (SNR)_0 &= \frac{A_c^2 P_M}{16} \times \frac{4}{W N_0} \\ &= \frac{A_c^2 P_M}{4W N_0} \end{aligned} \quad (2.56)$$

**Le facteur d'amélioration est donc :  $\Delta SNR = 1$ ,**

Nous pouvons conclure que sous la détection synchrone, les performances de la DBL-PS et BLU-PS en terme de SNR sont identiques lorsque les deux fonctionnent avec le même SNR à l'entrée de leurs détecteurs.

### **Conclusions – révision deuxième cours**

**Ce deuxième cours est dédié aux modulations analogiques d'amplitude. Les caractéristiques ainsi que les types de cette dernière sont détaillés avec leurs schémas d'illustration. A ce stade, l'étudiant devra être capable de comprendre les principes de la modulation d'amplitude à savoir la modulation à porteuse supprimée ou celle à bande latérale supérieur ou inférieur ainsi que la conception du modulateur et démodulateur ainsi que leurs performances en présence du bruit au niveau des récepteurs.**



## Exercices d'application

### 1/ Généralités sur la transmission

#### Exercice 1 : Exemple de la déformation d'un amplificateur

Supposons qu'un générateur délivre plusieurs sinusoïdes de fréquence  $f_1$ ,  $3f_1$ ,  $5f_1$ . De même amplitude  $A$ .

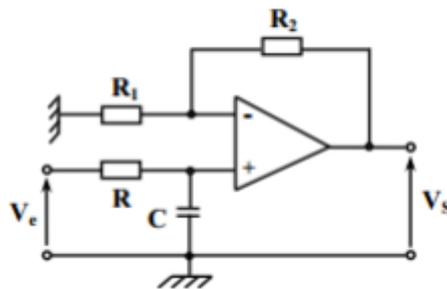
1/ Tracez le spectre de ce signal.

Supposons que l'amplificateur soit un amplificateur faible bande limité à  $f_1$ . Le spectre du signal en sortie de l'amplificateur est multiplié par  $G$  pour la fréquence  $f_1$ , par  $G/3$  à la fréquence  $3f_1$ , par  $G/5$  à la fréquence  $5f_1$ , et ainsi de suite.

2/ Représentez le spectre à la sortie de l'amplificateur.

#### Exercice 2 : Les filtres

On considère le filtre dont le schéma est représenté ci-contre :



1. Quel est le type de ce filtre ?
2. Etablir la fonction de transfert du filtre et la mettre sous la forme :

$$T = T_0 \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_0}}$$

3. Tracez le diagramme de Bode en gain et en phase

### Exercice 3 : Initiation aux Transmissions Analogiques

1) Calculez la dimension d'une antenne  $\frac{1}{4}$  d'onde pour les applications suivantes :

CB : 26 MHz

FM : 100 MHz

2) Calcul produit de deux sinusoides

Soit un signal  $V_1(t)=V_1\cos(2\pi f_1t)$ , et  $V_2(t)=V_2\cos(2\pi f_2t)$ , faites le produit des deux Co-sinusoides. Exprimez ce produit comme une somme de signaux co-sinusoidaux.

Sachant que le spectre du signal co-sinusoidal  $V_1(t)$  est represente par une raie a la frequence  $f_1$  et d'amplitude  $V_1$ , tracez le spectre du produit des deux Co-sinusoides.

3) Calcul d'un signal module en amplitude autour d'une porteuse  $f_p$ .

Soit  $V_m(t)=V_m\cos(2\pi f_mt)$ , un signal de frequence  $f_m=100$  Hz. Supposons une porteuse a la frequence  $f_p=1$  kHz.  $V_p(t)=V_p\cos(2\pi f_pt)$ .

Le signal module s'ecrit :  $v(t)=V_p[1+V_m\cos(2\pi f_mt)]\cos(2\pi f_pt)$ . Tracer le spectre de la fonction  $v$ .

On suppose maintenant que  $V_m(t)=V_1\cos(2\pi f_1t)+V_2\cos(2\pi f_2t)$ . Le signal module s'ecrit :

$v(t)=V_p[1+V_m(t)]\cos(2\pi f_pt)$ , calculez le spectre de  $v$ .

### Exercice 3 : Melangeur

**Exemple 1:** Soient deux sinusoides, de frequences  $f_1$  et  $f_2$ . Calculez le produit des deux sinusoides :  $v_1(t) = A\sin(2\pi f_1t)$  et  $v_2(t) = B\sin(2\pi f_2t)$

## 2/ Modulations d'amplitudes

### Exercice 1 :

On donne une onde modulee en Amplitude a 50% d'un signal sinusoidal de frequence 10Khz. L'onde porteuse a une amplitude de 5mV et une frequence de 10Mhz ( $k = 1$ ).

1- Donner l'equation de cette onde et l'amplitude du signal modulant ?

2- Représenter ce signal AM ?

- 3- Donner l'expression du taux de modulation ?
- 4- Représenter le spectre du signal ?

**Exercice 2 :**

Un émetteur de 100wat transmis en AM (Modulation d'Amplitude) avec un pourcentage de modulation de 100%.

- 5- Calculer les puissances contenues dans la porteuse  $P_p$  et dans chaque bande latérale ?
- 6- Reprendre le problème, si l'onde AM est transmise avec un pourcentage de 70% ?

**Exercice 3 :**

Soit le signal AM :  $5 \cos(106t) + 3.5 \cos(103t)\cos(106t)$ .

Questions :

- a) Quelle est la fréquence de porteuse ?
- b) Quelle est la fréquence modulante ?
- c) Quel est le taux de modulation ?

**Exercice 4 :**

Un émetteur transmet 10Kwat lorsque la porteuse est émise et 11,2Kwat lorsqu'une 1ere onde est émise. Une seconde onde modulée à 60% est transmise simultanément.

- Calculer la puissance totale transmise ?

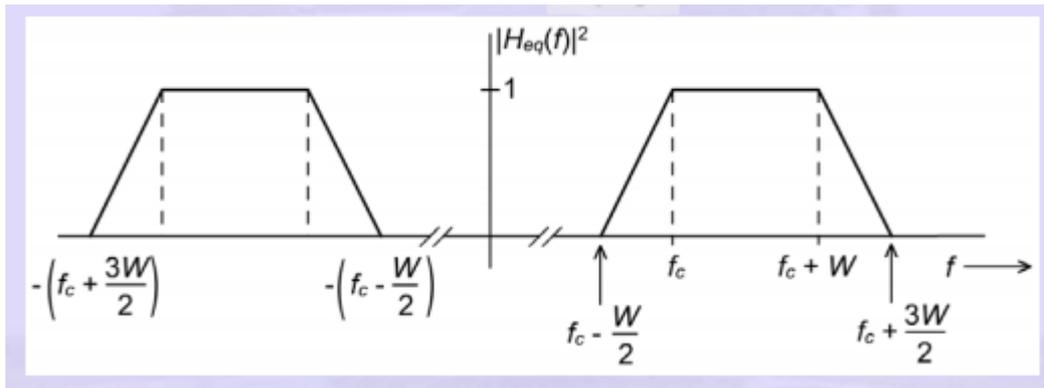
**Exercice 5 :**

Le courant mesuré à l'antenne d'un émetteur AM est de 7A lorsque la porteuse est transmise et de 7,8A lorsque l'onde AM est transmise.

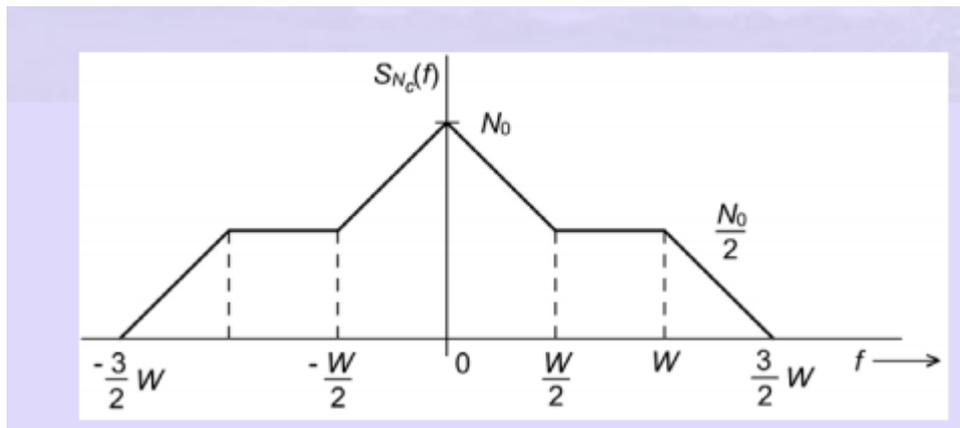
- 1- Calculer l'indice de modulation  $m$  ?
- 2- Déterminer le courant d'antenne quand l'indice de modulation est 0,8 ?

**Exercice 5 :**

Dans un récepteur destiné à la démodulation des signaux SSB, ( $H_{eq}$ ) a la caractéristique montrée à la **Fig1**. En supposant que le BLS a été transmis, trouvons le facteur d'amélioration du système.



**Fig. 1: Filtre (Heq)**



**Fig. 2 : densité spectrale de puissance de bruit**

## CHAPITRE 3 : MODULATION ANGULAIRE

### Objectif

Dans ce troisième chapitre, l'étudiant étudie la modulation angulaire qui repose sur la modulation de phase et de fréquence. Les modulateurs et démodulateurs seront étudiés ainsi que les caractéristiques de la bande spectrale.

### 1. Introduction

La modulation d'amplitude repose sur la variation de l'amplitude de la porteuse en fonction de l'information à transmettre. Le signal est ainsi très sensible au bruit et à l'atténuation (ex : tunnel). Pour la modulation de phase et de fréquence, l'amplitude est fixe, l'information est portée par la variation de la phase ou de la fréquence. Ces deux types de modulations sont aussi dénommées Modulation Angulaire. Cette dernière repose sur la variation de la phase instantanée de la porteuse :  $\theta(t) = \omega_p \cdot t + \varphi(t)$  (3.1)

### 2. Modulation de phase

La modulation de phase est un procédé qui consiste à faire varier la phase d'un signal porteur sinusoïdal en fonction d'un message à transmettre.

$$V(t) = A_c \cdot \cos(\omega t + \varphi(t)) \quad \text{avec } \omega = 2\pi f_c t \quad (3.2)$$

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

$\varphi(t) = k \cdot m(t)$ , où  $m(t)$  est le signal à transmettre (signal d'information en bande de base).

Le signal modulé est donné par la figure 36:

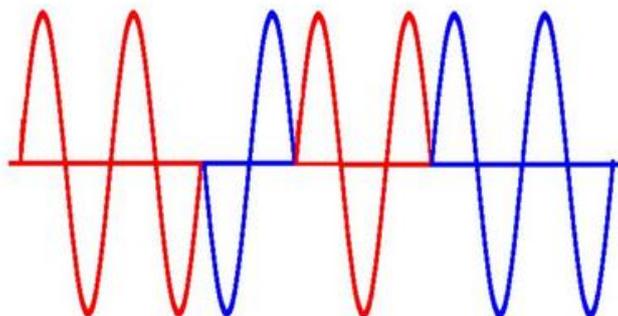


Fig 36. Modulation de phase

## 2.1 Limite de la PM

Si les deux modulations sont identiques, le choix se portera sur l'une ou l'autre en fonction de l'indice de modulation dans le cas de modulation analogique [3-4]. Elle se prête néanmoins très bien aux modulations à "grande vitesse" mais la phase initiale doit être connue.

## 3. Modulation de fréquence

Pour la modulation de fréquence, la fréquence de la porteuse est modifiée en fonction du signal modulant. Toutefois, la porteuse est définie à une fréquence fixe, appelée fréquence porteuse. On ne peut pas en principe modifier la porteuse du signal. Pour cette raison nous allons étudier la relation entre la phase et la fréquence afin de comprendre le principe de cette variation.

### 3.1 Relation entre la Phase et la Fréquence

#### Relation entre phase et fréquence.

La fréquence est liée à la pulsation par la relation  $\omega = 2\pi f$  (3.3)

La pulsation est liée à la phase par :  $\omega = \frac{\partial \phi(t)}{\partial t}$  (3.4)

Ainsi, la fréquence est liée à la phase par la relation suivante :  $f = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi(t)}{\partial t}$  (3.5)

De manière équivalente, on peut exprimer la relation inverse :

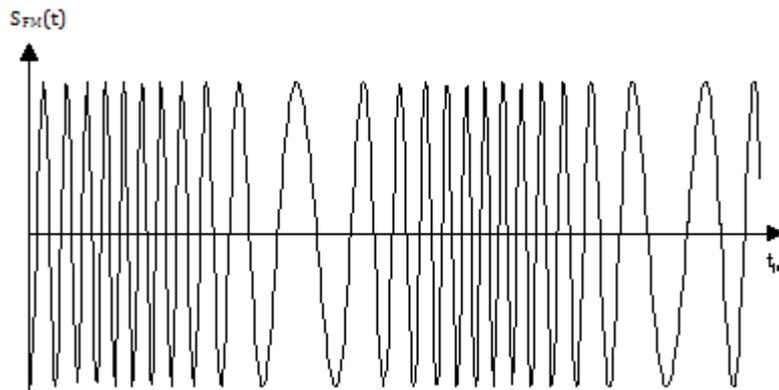
$$\phi(t) = 2\pi \int_0^t f(t) dt \quad (3.6)$$

Le signal modulé en fréquence peut s'écrire alors :

$$S_{FM}(t) = A_c \cdot \cos(\omega_c t + \phi(t)), \quad \phi(t) = 2\pi k_f \int m(t) dt \quad (3.7)$$

$$S_{FM}(t) = A_c \cdot \cos(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int m(t) dt) \quad (3.8)$$

Où  $m(t)$  est le signal à transmettre. Le signal modulé en fréquence est donné par la figure 37 :



**Fig 37** signal modulé en fréquence

#### 4. Indice de Modulation m

Soit le signal en bande de base :  $m(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f_m t)$  (3.9)

✓ **Modulation de phase** :  $m = k \cdot A_m$  (3.10)

✓ **Modulation de fréquence** : On note la déviation fréquentielle :

$$\Delta f = k_f \cdot A_m \quad (3.11)$$

L'indice de modulation s'écrit :  $m = \Delta f / f_m$  avec :  $A_m$  : amplitude signal en bande de base

$f_m$  est la fréquence du signal en bande de base.

#### 5. Occupation spectrale

L'occupation spectrale est plus difficile à déterminer que celle définie pour la modulation d'amplitude, car cette dernière s'obtenait en translatant le spectre de la bande de base autour de la porteuse.

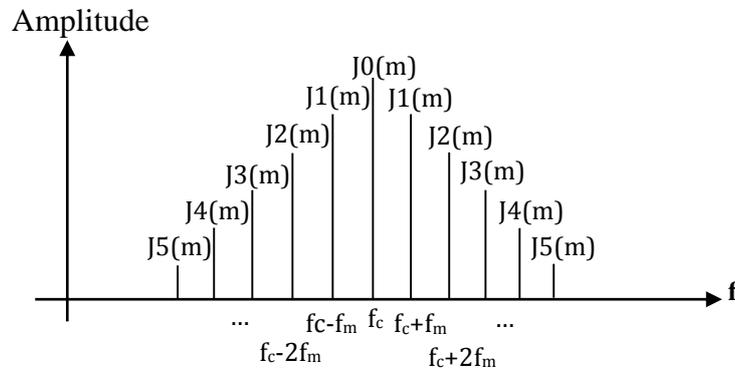
Nous avons  $S_{FM}(t) = A_c \cdot \cos(2\pi f_c \cdot t + 2\pi k_f \int m(t) dt)$  (3.12)

Avec  $m(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f_m t)$  (3.13)

Le développement mathématique de la relation :  $S_{FM}(t) = A_c \cdot \cos(2\pi f_c \cdot t + (k_f \cdot A_m / f_m) \sin(2\pi f_m t))$

Permet de voir que le courant résultant est constitué des termes ayant les fréquences suivantes :  $f_c$  ;  $f_c + f_m$  ;  $f_c - f_m$  ;  $f_c + 2f_m$  ;  $f_c - 2f_m$  ; .... Cela montre qu'il existe une infinité de bandes latérales

(du fait de la modulation de fréquence) de part et d'autre de la porteuse  $f_c$ , mais leurs amplitudes décroissent assez rapidement pour devenir bientôt négligeable.



**Fig 38** *Spectre du signal modulé en fréquence*

Les valeurs de crête sont données par  $J_0(m)$ ,  $J_1(m)$ ,  $J_2(m)$ . Où  $J_n(m)$  est une fonction de Bessel d'ordre  $n$ . Quand on a besoin des valeurs de crête des composantes spectrales, on consulte les valeurs de  $J$  dans la table des fonctions Bessel.

Table of Bessel functions

Beta	J(0)	J(1)	J(2)	J(3)	J(4)	J(5)	J(6)	J(7)	J(8)	J(9)	J(10)	J(11)	J(12)	J(13)	J(14)
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.25	0.9844	0.124	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.9385	0.2423	0.0306	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.75	0.8642	0.3492	0.0671	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.7652	0.4401	0.1149	0.0196	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.25	0.6459	0.5106	0.1711	0.0389	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5	0.5118	0.5679	0.2321	0.061	0.0118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.75	0.369	0.5802	0.294	0.0919	0.0209	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.2239	0.5767	0.3528	0.1289	0.034	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.25	0.0927	0.5484	0.4047	0.1711	0.0515	0.0121	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.4	0.0025	0.5202	0.431	0.1981	0.0643	0.0162	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.5	-0.0484	0.4971	0.4461	0.2166	0.0738	0.0196	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.75	-0.1641	0.426	0.4739	0.2634	0.1007	0.0297	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-0.2801	0.3391	0.4861	0.3091	0.132	0.043	0.0114	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5	-0.3801	0.1374	0.4566	0.3668	0.2044	0.0804	0.0254	0	0	0	0	0	0	0	0
4	-0.3971	-0.066	0.3641	0.4302	0.2811	0.1321	0.0491	0.0152	0	0	0	0	0	0	0
4.5	-0.3205	-0.2311	0.2178	0.4247	0.3484	0.1947	0.0843	0.03	0.0091	0	0	0	0	0	0
4.75	-0.2551	-0.2892	0.1334	0.4015	0.3738	0.228	0.1063	0.0405	0.0131	0	0	0	0	0	0
5	-0.1776	-0.3276	0.0466	0.3648	0.3912	0.2611	0.131	0.0534	0.0184	0	0	0	0	0	0
5.5	-0.0068	-0.3414	-0.1173	0.2561	0.3967	0.3209	0.1868	0.0666	0.0337	0.0113	0	0	0	0	0
6	0.1506	-0.2767	-0.2429	0.1148	0.3676	0.3621	0.2468	0.1296	0.0566	0.0212	0	0	0	0	0
6.5	0.2801	-0.1538	-0.3074	-0.0353	0.2748	0.3736	0.2999	0.1601	0.086	0.0366	0.0133	0	0	0	0
7	0.3001	-0.0047	-0.3014	-0.1676	0.1578	0.3479	0.3392	0.2336	0.128	0.0569	0.0235	0	0	0	0
7.5	0.2663	0.1352	-0.2303	-0.2581	0.0238	0.2835	0.3541	0.2632	0.1744	0.0889	0.039	0.0151	0	0	0
8	0.1717	0.2346	-0.113	-0.2911	-0.1054	0.1888	0.3376	0.3206	0.2235	0.1263	0.0608	0.0256	0.0096	0	0
8.5	0.0419	0.2731	0.0223	-0.2626	-0.2077	0.0671	0.2867	0.3376	0.2694	0.1694	0.0694	0.041	0.0167	0	0
9	-0.0903	0.2453	0.1448	-0.1809	-0.2655	-0.055	0.2043	0.3275	0.3051	0.2149	0.1247	0.0522	0.0274	0.0108	0
9.5	-0.1939	0.1613	0.2279	-0.0653	-0.2691	-0.1613	0.0993	0.2668	0.3233	0.2577	0.165	0.0697	0.0427	0.0182	0
10	-0.2459	0.0435	0.2546	0.0594	-0.2341	-0.0145	0.2167	0.3179	0.2919	0.2075	0.1231	0.0634	0.029	0.012	0
10.5	-0.2365	-0.0789	0.2216	0.1633	-0.1283	-0.2611	-0.1203	0.1296	0.2851	0.3108	0.2477	0.1611	0.0898	0.0441	0.0195
11	-0.1712	-0.1768	0.139	0.2273	-0.015	-0.2383	-0.2016	0.0184	0.225	0.3089	0.2804	0.201	0.1216	0.0643	0.0304
11.5	-0.0677	-0.2284	0.0279	0.2381	0.0963	-0.1711	-0.2451	-0.0846	0.1421	0.2823	0.2998	0.239	0.1575	0.0897	0.0454
12	0.0477	-0.2234	-0.0849	0.1951	0.1825	-0.0735	-0.2437	-0.1703	0.0451	0.2304	0.3005	0.2704	0.1953	0.1201	0.065
12.5	0.1469	-0.1655	-0.1734	0.11	0.2262	0.0347	-0.1984	-0.2252	-0.0638	0.1563	0.2789	0.2699	0.2314	0.1543	0.0896

## 5.1 Formule de Bessel

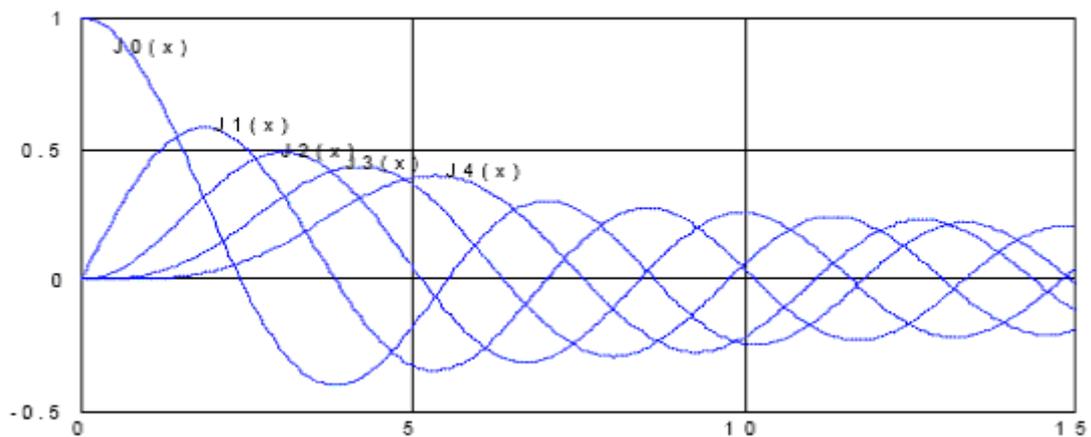
### Formule de Bessel

$$\cos [x \cdot \sin (2\pi f_0 t)] = J_0(x) + 2J_2(x) \cdot \cos (2 \cdot 2\pi f_0 t) + 2J_4(x) \cos(4 \cdot 2\pi f_0 t) + \dots \quad (3.14)$$

$$\sin [x \cdot \sin (2\pi f_0 t)] = 2J_1(x) + 2J_3(x) \cdot \sin(2\pi f_0 t) + 2J_5(x) \cos(5 \cdot 2\pi f_0 t) + \dots \quad (3.15)$$

La fonction  $\cos(x \cdot \sin(2\pi f_0 t))$  s'écrit donc comme une somme infinie de cosinus. Si a représenté une fréquence, on voit apparaître tous les harmoniques paires, pondérées par un facteur de Bessel, nommé J.

Pour calculer les coefficients  $J_k(x)$ , on se ramène à l'abaque suivant. Celle-ci représente les 5 premières fonctions de Bessel en fonction de l'amplitude x (dénommée m dans l'équation de Bessel) [10].



**Fig 39** fonction de Bessel

## 5.2 Règle de CARSON

### Théorème : Règle de Carson

La règle de Carson indique la bande spectrale du signal après modulation angulaire pour laquelle on trouve au moins 98% de l'énergie transmise [3-4-12].

Si l'indice de modulation est faible, la bande spectrale occupée est égale à  $2\Delta f$

Si l'indice de modulation est élevé, la bande spectrale occupée est égale à  $2(\Delta f + f_m)$

## 6. Modulateur FM

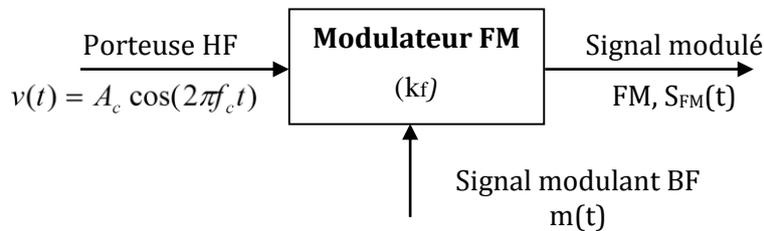


Fig 40 Modulateur FM

Où :

$$S_{FM}(t) = A_c \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(t) dt\right) \quad (3.16)$$

$k_f$ : Constante qui dépend du Modulateur.

La fréquence instantanée du signal modulé FM :

$$2\pi F_{in}(t) = \frac{d}{dt} \left( 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(t) dt \right) \quad (3.17)$$

$$F_{in}(t) = f_c + k_f \cdot m(t)$$

Exemple : Si  $m(t) = A_m \sin 2\pi f_m t$

$$F_{inst}(t) = f_c + k_f \cdot A_m \sin 2\pi f_m t \quad (3.18)$$

$$f_c - k_f \cdot A_m \leq F_{inst}(t) \leq f_c + k_f \cdot A_m \Rightarrow f_c - \Delta f \leq F_{inst}(t) \leq f_c + \Delta f$$

## 6.1 Exemple d'une chaîne d'émission FM

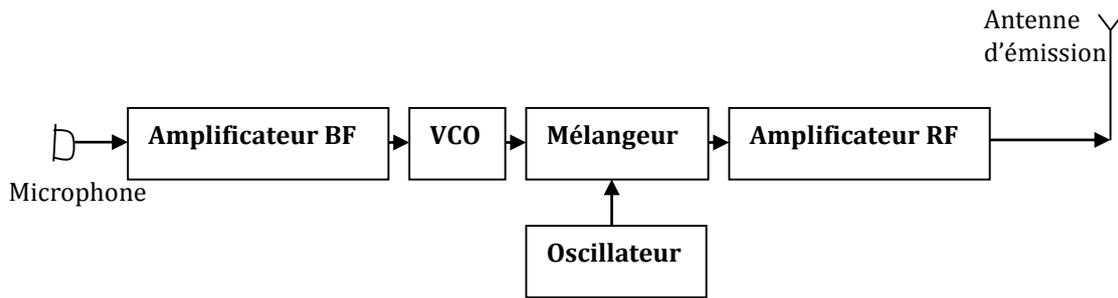


Fig 41 Emetteur FM

## 6.2 Récepteur FM

### I – Principe

Il s'agit d'extraire l'onde modulé en fréquence, la BF intégrée à celle-ci ; c-à-d, transformer une variation de fréquence en une variation d'amplitude au rythme de la modulation BF. Les circuits réalisant la démodulation FM sont dits *Discriminateurs*.

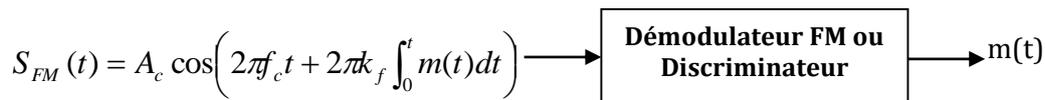


Fig 42 Récepteur FM

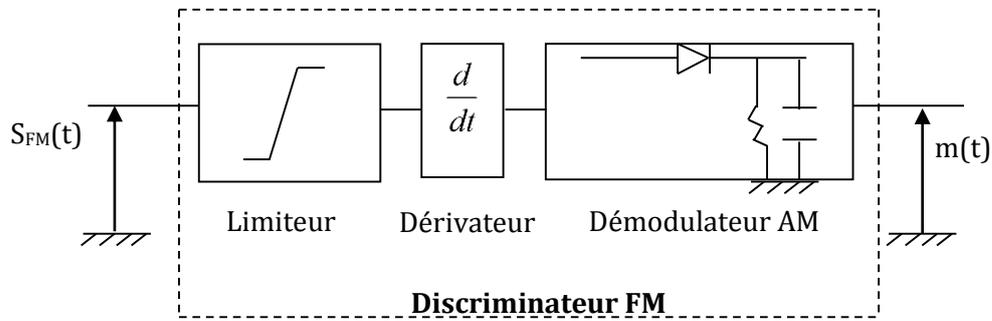
Soit l'expression du signal modulé FM [10] :

$$S_{FM}(t) = A_c \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(t) dt\right)$$

$$\frac{dS_{FM}(t)}{dt} = -(2\pi f_c + 2\pi k_f \cdot m(t)) \cdot A_c \sin\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(t) dt\right) \quad (3.19)$$

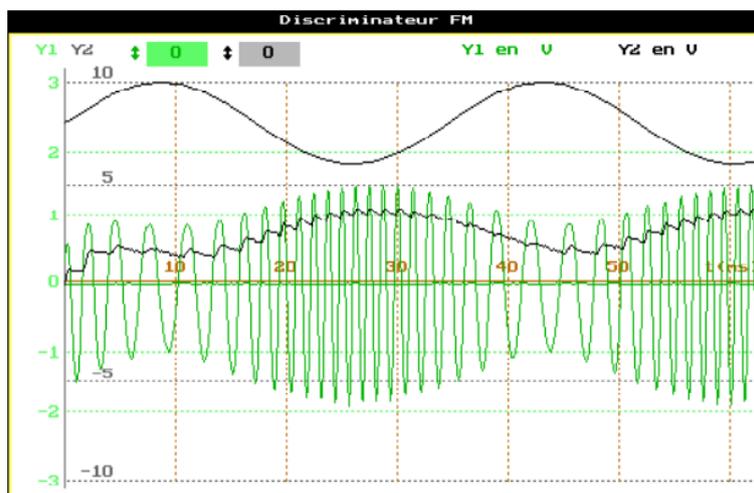
$$= -2\pi A_c (f_c + k_f \cdot m(t)) \cdot \sin\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(t) dt\right)$$

Donc en dérivant un signal modulé FM, l'information  $m(t)$  se trouve sur l'amplitude de signal dérivé c-à-d qu'on se retrouve avec un signal modulé AM, d'où le schéma bloc suivant :



**Fig 43** *démodulateur FM*

Le principe du discriminateur est de transformer la modulation de fréquence ou de phase en modulation d'amplitude et d'effectuer une détection d'enveloppe (voir figure 44) ;

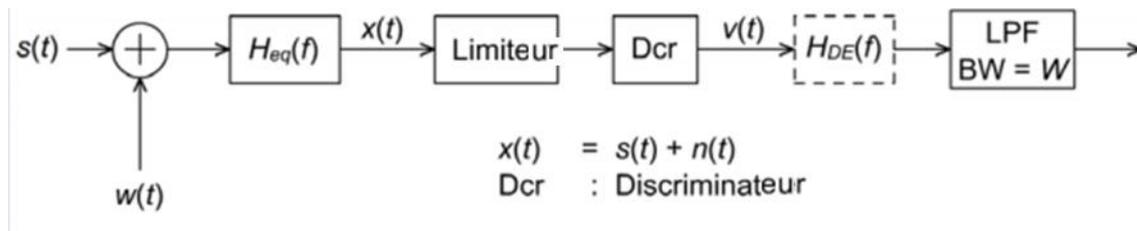


**Fig 44** : *principe du discriminateur [12]*

## 7. Performance des modulations angulaire en présence du bruit

### 7.1 Model de Réception

Le modèle de récepteur à utiliser dans l'analyse du bruit de la modulation angulaire est représenté sur la Figure 45 [11-13].



**Fig 45** : *Modèle de récepteur pour l'évaluation de la performance du bruit [11]*

- Le rôle de  $H_{eq}(f)$  est similaire à ce qui a été mentionné dans le contexte précédent, avec des changements appropriés dans la fréquence centrale et la Bande passante de transmission.

- La fréquence centrale du filtre est  $f_c = FIF$ , qui pour la FM commerciale est de 10,7 MHz. La bande passante du filtre est la largeur de bande de transmission de la modulation angulaire, qui est d'environ 200 kHz pour la FM commerciale.
- Néanmoins, nous considérons  $H_{eq}(f)$  comme un filtre passe-bande à bande étroite qui transmet la composante du signal  $s(t)$  sans aucune distorsion alors que  $n(t)$  est la composante de bruit à sa sortie est la fonction échantillon d'un processus de bruit à bande étroite avec un spectre plat dans la bande passante.
- Le limiteur supprime toute variation d'amplitude dans la sortie du filtre IF équivalent.
- Le facteur d'amélioration est le même défini dans la section précédente :

$$\frac{(SNR)_0}{(SNR)_r}$$

Calcul du facteur d'amélioration :

$$s(t) = A_c \cos[\omega_c t + \varphi(t)] \quad (3.20)$$

Où

$$\varphi(t) = \begin{cases} k_p m(t) & , \text{ PM} \\ 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau & , \text{ FM} \end{cases} \quad (3.21)$$

La sortie du filtre est :

$$\begin{aligned} x(t) &= s(t) + n(t) \\ &= A_c \cos[\omega_c t + \varphi(t)] + r_n(t) \cos[\omega_c t + \psi(t)] \end{aligned} \quad (3.22)$$

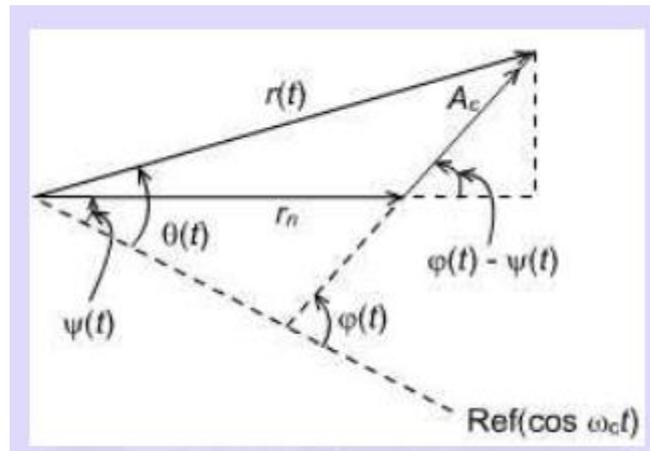
$$\text{La puissance moyenne du signal d'entrée est de : } A_c^2 P_M / 2 \quad (3.23)$$

$$\text{Et celle du bruit : } 2W * N_0 / 2 = WN_0 \quad (3.24)$$

Pré détection à Fort SNR :

$$\theta(t) \approx \psi(t) + \frac{A_c}{r_n(t)} \sin[\varphi(t) - \psi(t)] \quad (3.25)$$

Avec  $\theta(t)$  est l'angle de la résultante de phase :



**Figure46.** Diagramme de phase [11]

Ainsi, lorsque le signal FM est beaucoup plus fort que le bruit, il supprimera les petites variations aléatoires de phase causées par le bruit ; Alors le signal FM est sensé de capturer Le détecteur [11-13].

$V(t)$  : la sortie du discriminateur est donnée par :

$$\begin{aligned}
 v(t) &= k_d \theta(t) && \text{Détecteur de phase} && (3.26) \\
 &= \frac{k_d}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} && \text{Détecteur de fréquence} &&
 \end{aligned}$$

Où  $k_d$  est la constante de gain du détecteur considéré.

## 7.2 Performance de la modulation de phase

$$\varphi(t) = k_p m(t) \tag{3.27}$$

Soit  $K_p \cdot K_d = 1$  alors nous aurons :

$$v(t) \approx m(t) + \frac{k_d r_n(t)}{A_c} \sin[\psi(t) - \varphi(t)] \tag{3.28}$$

La puissance de sortie est :  $R_M(0)$ , soit :

$$n_P(t) = \frac{k_d r_n(t)}{A_c} \sin[\psi(t) - \varphi(t)] \quad (3.29)$$

Pour calculer la puissance de bruit de sortie, nous avons besoin de la DSP de  $n_P(t)$ , ça va causer des difficultés comme  $n_P(t)$  contient le  $\varphi(t)$ , l'analyse devient facile si nous prenons le  $\varphi(t) = 0$ , donc :

$$\begin{aligned} n_P(t) &= \frac{k_d r_n(t)}{A_c} \sin[\psi(t)] \\ &= \frac{k_d}{A_c} n_s(t) \end{aligned} \quad (3.30)$$

Par conséquent :

$$S_{N_P}(f) = \left(\frac{k_d}{A_c}\right)^2 S_{N_s}(f) \quad (3.31)$$

Mais :

$$S_{N_s}(f) = \begin{cases} N_0, & |f| \leq \frac{B_T}{2} \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.32)$$

Le filtre passe bas LPF ne transmet que les composantes spectrales entre  $[-W, W]$ , par conséquent :

La puissance du bruit de sortie est :

$$\left(\frac{k_d}{A_c}\right)^2 2W N_0 \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} (SNR)_{0,PM} &= \frac{P_M}{2W N_0 \left(\frac{k_d}{A_c}\right)^2} \\ &= \frac{A_c^2}{2W N_0} k_p^2 P_M \end{aligned} \quad (3.33)$$

Comme :

$$(SNR)_{r,PM} = \frac{(A_c^2)/2}{N_0 W} \quad (3.34)$$

Nous aurons alors :  $\Delta SNR = k_p^2 P_M$ .

### 7.3 Performance de la modulation FM

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{k_d}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \\ &= k_f k_d m(t) + \frac{k_d}{2\pi A_c} \frac{dn_s(t)}{dt} \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$v(t) = m(t) + \frac{k_d}{2\pi A_c} \frac{dn_s(t)}{dt} \quad (3.36)$$

La puissance de sortie est  $P_M$  et comme :

$$n_F(t) = \frac{k_d}{2\pi A_c} \frac{dn_s(t)}{dt} \quad (3.37)$$

Alors :

$$S_{N_F}(f) = \left( \frac{k_d}{2\pi A_c} \right)^2 |j2\pi f|^2 S_{N_S}(f) \quad (3.38)$$

L'étape ci-dessous découle le fait que  $dn_s(t)/dt$  peut être obtenue en passant  $n_s(t)$  via un différenciateur avec la fonction de transfert  $j2\pi f$  ainsi :

$$S_{N_F}(f) = \frac{k_d^2 f^2}{A_c^2} S_{N_S}(f) \quad (3.39)$$

Le filtre de détection élimine les composantes spectrales au-delà de  $f > W$ , par conséquent :

La puissance du bruit :

$$\int_{-W}^W \frac{k_d^2 f^2 N_0}{A_c^2} df = \frac{k_d^2 N_0}{A_c^2} \left( \frac{2}{3} \right) W^3$$

Nous constatons alors que :

$$\begin{aligned} (SNR)_{0, FM} &= \frac{3A_c^2 P_M}{2k_d^2 N_0 W^3} \\ &= \frac{3}{2} k_f^2 \frac{A_c^2 P_M}{N_0 W^3} \\ &= \left( \frac{A_c^2}{2N_0 W} \right) \frac{3k_f^2 P_M}{W^2} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Le facteur d'amélioration est donc :

$$\Delta SNR = \frac{3k_f^2 P_M}{W^2} \quad (3.41)$$

### Conclusion

**L'importance d'une modulation est de pouvoir transmettre avec une qualité appréciable un signal analogique.** La modulation devra s'adapter au canal de transmission. Ce dernier peut affecter des déformations au signal transmis à causes des perturbations et du bruit des composants électroniques. Le choix d'un certain type de modulation est très pertinent. Nous devons se baser sur des critères tel que : l'encombrement spectral, la puissance consommé ou émise, le rapport signal sur bruit et enfin la complexité et le cout des émetteurs et récepteurs. Le bruit affecte généralement l'amplitude d'un signal analogique, alors si la distance parcourue est très grande, le choix de la modulation AM n'est pas très évident. L'objectif recherché dans tous types de transmission est le débit qui doit être plus grand ainsi que la qualité de transmission. Dans les systèmes de transmissions analogiques, la qualité de transmission est mesurée par le rapport signal sur bruit. Les performances de chaque type de modulations sont évaluées en présence du bruit. L'usage de la PM dans différentes applications présente une bonne immunité contre le bruit de transmission.

**Pour conclure, choisir une modulation est un compromis entre raison économique et choix techniques [3].**

## Exercices d'application

### Exercice 1 :

Un signal  $s(t)$  de fréquence 1 MHz d'amplitude 1 volt est modulé en fréquence. L'onde modulante est une onde sinusoïdale d'amplitude  $ABF = 2,5$  V et de fréquence  $f_{BF} = 500$  Hz. L'excursion de modulation est 5,5 kHz.

Ecrire l'expression mathématique du signal modulé, déterminer l'indice de modulation

### Exercice 2 :

Soit le signal modulé en fréquence suivant  $s(t) = V_0 \cos(\omega_1 t + 0.5 \sin(\omega_2 t))$  V

On prendra  $V_0 = 1$  V,  $\omega_1 = 107$  rad/s et  $\omega_2 = 10^4$  rad/s.

1 – Donner la fréquence de la porteuse, la fréquence modulante, l'excursion en fréquence, l'indice de modulation et l'encombrement spectral.

2 – Représenter l'allure du spectre  $S(F)$  de  $s(t)$ . Donner la bande de fréquence occupée par  $S(F)$ .

### Exercice 3 :

L'excursion en fréquence d'un signal **FM** est de **150 kHz** et la fréquence modulante est de **15 kHz**.

1- Quel est l'indice de modulation  $\delta_f$  ?

2- Quelle est la bande de fréquences de ce signal **FM** ?

### Exercice 4 :

Quelles sont les composantes spectrales du signal **FM** :

$$S(t) = 10 \cos(2\pi 10^6 t + \sin(2\pi 10^3 t)) \text{ V ?}$$

### Exercice 5 :

La tension instantanée d'une émission **FM** est :  $s(t) = 2000 \sin(2\pi 10^8 t + 5 \sin(\pi 10^4 t))$  Volt.

1- Que vaut l'indice de modulation  $\delta_f$  ?

2- Quelle est la fréquence modulante ?

3- Quelle est l'excursion de fréquence  $\Delta f$  ?

- 4- Quelles sont les fréquences présentes dans le spectre du signal ?
- 5- Que devient l'indice de modulation si la fréquence modulante triple et que l'amplitude du message modulant double ?

Déterminer la bande de fréquence du signal **FM** dans les deux cas ?

**Exercice 6 :**

Un émetteur **FM** transmet une puissance de **100 kwat** lorsqu'il est modulé par une fréquence de **1 kHz** et lorsque l'indice de modulation est  $\delta_f = 25$ .

Quelle est la puissance émise lorsque le signal modulant est nul ?

**Exercice 7 :**

Comparer le facteur d'amélioration de la PM et FM quand  $m(t) = \cos(2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 t)$ .

La variation de fréquence produite dans les deux cas est 50KHz,

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Christophe More**, « Transmission de signaux : cours et exercices d'électronique », Tec & Doc Lavoisier, 1995
- [2] **François de Dieuleveult**, « Electronique appliqué aux hautes fréquences », Dunod, Paris, 1999-2008.
- [3] **M. T. BENHABILES**, « Télécommunications fondamentales, cours et TD », Université des Frères Mentouri Constantine 1.
- [4] **Launey Frederic**, « Cours modulations analogique », Cours 2007.
- [6] **Jean-philippe muller**, « les Oscillateurs Sinusoïdaux », Physiques appliquée.
- [7] **Jean-philippe muller**, « les Mélangeurs », Physiques appliquée.
- [8] **Kerry Lacanette**, “A Basic Introduction to Filters: Active, Passive, and Switched-Capacitor”, National Semiconductor Application Note 779, April 1991
- [9] **Mc Graw HILL Fr**, « Communications analogiques et numérique », série de Schaum, 2000
- [10] **Huwei P.Hsu**, « Communications analogiques et numérique », série de Schaum, 1993
- [11] **Pr.Vencata Rao**, “Noise Performance of Various Modulation Schemes”, principles of communications, Indian institut of technology, MADRAS, 2007
- [12] **B. Pontalier**, « Préparation Agrégation Sciences Physiques », Académie de Martinique.
- [13] **S. Labandji**, « performance des systèmes de communications », Université LAVAL, 2015.

## Sites WEB

[1] **Claude GIMENES**, « Communications analogiques » ; <http://claude-gimenes.fr/signal/communications-analogiques>; 2013.

[2] **Marc VAN DROOGENBROECK**; « principe des télécommunications analogiques et numériques » ; [http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/total1/elen008/out\\_tf.html](http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/total1/elen008/out_tf.html), Février 2005.

[3] « **Filtrage analogique** », [http://ressources.unisciel.fr/TraitementDuSignal/Semaine03/co/module\\_Semaine03\\_1.html](http://ressources.unisciel.fr/TraitementDuSignal/Semaine03/co/module_Semaine03_1.html)

## Acronyme et abréviation

**AM** : Amplitude modulation

**FM** : Frequency modulation

**PM**: Phase modulation

**HF**: Haute fréquence

**BF**: Basse fréquence

**RF**: Radio fréquence

**AF**: Audio fréquence

**BLS** : Bande latérale supérieur

**BLI** : Bande latérale inférieur

**BLU** : Bande latérale unique

**SNR** : Signal Noise Ratio (rapport signal sur bruit)

**DBL-PS** : Double bande latérale à porteuse supprimée

**TF** : Transformée de Fourier

**BLU-PS** : Bande Latérale unique à porteuse supprimée

**LPF** : Low Pass Filter (filtre passe bas)

**FI** : Fréquence intermédiaire

## *Liste des symboles*

- $A_c$  : Amplitude de la porteuse  
 $f_c$  : Fréquence de la porteuse  
 $A_m$  : Amplitude du signal modulant  
 $f_m$  : Fréquence du signal modulant  
 $S/B$  : Signal sur bruit  
 $\lambda$  : Longueur d'onde  
 $m(t)$  : Signal modulant  
 $v(t)$  : Porteuse  
 $s(t)$  : Signal modulé  
 $k$  : Constante de modulateur  
 $P_p$  : Puissance de la porteuse  
 $P_{BLS}$  : Puissance de la bande latérale supérieure  
 $P_{BLI}$  : Puissance de la bande latérale inférieure  
 $m$  : Indice de modulation  
 $B$  : Bande passante  
 $T_c$  : Période de la porteuse  
 $T_m$  : Période du signal modulant  
 $\tau$  : Constante de temps