



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغزور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Télécommunications Avancées

THEME

**Etude Théorique Et Pratique De La
Modulation d'amplitude AM Et La
Modulation de fréquence FM**

Réalisé par :

- BOUTAMINE Mourad
- ZERROUK Houda

Dirigé par :

Dr. HASSAD Mourad

Promotion 2015/2016

Remerciement

Nous remercions en premier lieu ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la santé et le pouvoir d accomplir ce modeste travail.

Nous remercions nos parents pour leur patience, leurs encouragements et leur soutien.

Nous remercions vont à Mr le Docteur Mourad Hassad d'avoir accepté de nous encadrer, pour ces précieux conseils et sa disponibilité.

Nous tenons, aussi, à remercier les membres du jury de nous faire honneur de lire et dévaluer ce travail.

Nous remercions vont aussi à tous les enseignants du département sciences et technologie ainsi qu'à tous les enseignants qui ont participé à notre formation.

Dédicaces

À mes chers parents pour leur amour, leurs sacrifices et leurs encouragements qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

À mon très chers frère Zaki.

À ma sœur Ahlem qui n'a jamais cessé de m'encourager pour qui je souhaite que du bonheur du monde.

A tous mes collègues de la promotion avec qui j'ai partagé les joies et les difficultés durant ces années.

A toute personne qui me connaisse et me considère comme une amie.

À tous ceux qui aiment la science.

HOUDA

Résume :

La transmission d'un message $m(t)$ par un canal de communication (ligne téléphonique)

Liaison satellite impose généralement la transposition du message (la bande de base) dans la bande fréquence (bande passante) propre au canal, cette transposition effectuée à l'aide d'une modulation d'un signal porteuse (appelée porteuse). par le message $m(t)$ ou distingue type d'un modulation d'amplitude.

ملخص:

لنقل رسالة عبر قناة اتصال مثلا (خط هاتفي) يتطلب الامر عموما الربط مع قمر اصطناعي ستلايت من اجل نقل الرسالة في نطاق تردد خاص بهذه القناة اي قناة الاتصال فتتم عملية النقل هذه بمساعدة من طرف اشارة نقل (تسمى ناقل للرسالة) او عن طريق احد انواع البرامج الخاصة بإعادة تشكيل او تعديل حجم و سعة الرسالة.

Abstract:

The transmission of a message $m(t)$ by a communication channel (line telephony)

Satellite link imposes generally the transposition of the message (the basic band(strip)) in the band(strip) frequency (bandwidth) appropriate(peculiar) to the channel(canal), this transposition to make by means of an expanding(carrier) modulation of a signal (called a carrier) .par the message $m(t)$ or distinguishes type(chap) of one amplitude modulation.

LISTE DES FIGURES :

Fig. I-1 la présentation temporelle de $s(t)$	02
Fig. I-1-2 Specters d'un signal AM.....	03
Fig. I-2 Spectre d'un signal $u(t)$ et spectre d'un signal (t)	05
Fig. I-3 Détecteur crête.....	06
Fig. I-4 Principe de modulation synchrone.....	07
Fig. I-5 Signal sinusoïdal modulé en amplitude sans porteuse.....	08
Fig. I-6 principe de la modulation SSB.....	10
Fig. I-7 Le spectre du signal VSB.....	11
Fig. II-1 Présentation temporelle de FM.....	16
Fig. II-2 Aérations des fonctions de Bessel de première espèce.....	17
Fig. II-3 Fonctions de Bessel $J_n(B)$	18
Fig. II-4 Spectre FM.....	19
Fig. II-5 Principe d'une démodulation FM.....	21
Fig. II-6 Schéma principe de la PLL.....	21
Fig. III-1 Spectre du message.....	26
Fig. III-2 Exemple de schéma fonctionnel	26
Fig. III-3 la plaquette de la modulation AM.....	27
Fig. III-3 Additionneur.....	27
Fig. III-4 Module multiplicateur	28
Fig. III-5 Modulation d'amplitude avec porteuse $m < 1$ et avec résidu de porteuse $m > 1$	30
Fig. III-6 Principe du taux de modulation.....	31
Fig. III-7 Le taux de modulation $m < 100\%$, $m=100\%$, $m > 100\%$	32
Fig. IV-1 Le spectre FM.....	41
Fig. IV-2 Signal modulant de fréquence FM.....	42
Fig. IV-3 Onde porteuse de fréquence	42

LISTE DES ABREVIATIONS :

PLL : Boucle à verrouillage de phase (phase locked loop).

VC : Oscillateur contrôlé en tension (Voltage controled oscillator).

FM : Modulation de Fréquence (Frequency modulation).

AM : Modulation d'amplitude

AM-P : Modulation d'amplitude sans porteuse

NFM : Modulation de fréquence en bande étroite (Narrow FM).

WFM : Modulation de fréquence en bande large (Wilde FM).

VSB: Vestigial Sideband Modulation (VSB)

SSB: Single-side band modulation (SSB)

DBAP: Double bande avec porteuse

DBSP: Double bande sans porteuse

BLU: Bande la truelle unique

BLI : Bande la truelle inferieur

BLS : Bande la truelle supérieure

Chapitre 2 : Etude théorique de la modulation FM

2.1. Introduction.....	14
2.2. Principe de la modulation de fréquence.....	14
2.3. Représentation temporelle du signal FM.....	16
2.4. Représentation fréquentielle d'un signal FM, cas d'un signal modulant sinusoïdal.....	17
2.4.1. Les fonctions de Bessel.....	17
2.4.2. Spectre du signal modulé.....	18
2.5. Puissance.....	20
2.6. Modulation par circuit oscillant à diode vari cap.....	21
2.2. Technique de démodulation de signaux FM.....	22
2.7. Démodulation par utilisation d'une Boucle à verrouillage de phase	22
2.8. Application de la modulation de fréquence.....	23
2.9. Les avantages et inconvénients de la modulation FM.....	23
2.10. Inconvénients.....	24
2.11. Conclusion.....	24

Chapitre 3 : Etude pratique de la modulation AM

3.1. Introduction	26
3.1.1. Préparation.....	26
3.1.2. Modulation DBSP	26
3.1.3 Modulation DBAP.....	26
3.1.4. Modulation BLU.....	26
3.2. Description du matériel.....	27
3.2.1. Description de la plaquette.....	27
3.3. Additionneur (ADDER).....	28
3.4. Multiplificateur (MULTIPLIER).....	29
3.5. Description de l'oscilloscope 5062DC.....	29
3.6. Manipulation.....	30

3.6.1. Modulation DBAP	30
3.6.2. Cas d'une modulation d'amplitude avec $m > 1$	32
3.6.3. Etude du taux de modulation.....	32
3.6.4. Analyse fréquentielle.....	33
3.7. Modulation DBSP.....	34
3.8. Modulation BLU	35
3.9. Conclusion	36

Chapitre 4 : étude pratique de la modulation FM

4.1. Introduction	38
4.2. Modulateur de fréquence	39
4.3. Oscillateur commandé en tensions vco.....	41
4.3.1.Définition.....	41
4.3.2. Préaccentuation - désaccentuation en FM.....	41
4.3.3.présentation d'un signal FM.....	42
4.5. Un peu de théorie.....	42
4.6..propriété remarquables d'un spectre FM	43
4.7. Conclusion	43
4.8. Introduction	45
4.8.1. La modulation d'amplitude dans Matlab.....	45
4.8.2. Représentation mathématique de 'AM'.....	46
4.8.3 Programme en AM.....	46
4.9.L A modulation de fréquence (FM) dans Matlab.....	51
4.10. Représentation mathématique du signal FM.....	51
4.11. P programme Matlab pour FM.....	52
4.12. Résultat de la simulation FM.....	53
4.12. Conclusion.....	54

Conclusion général

INTRODUCTION GENERALE

Au cours du développement des dispositifs de télécommunication, il est rapidement apparu indispensable de coder l'information à transmettre, soit pour adapter l'information au canal de transmission (fibre optique, câble coaxial, faisceaux hertziens), soit pour transmettre simultanément plusieurs signaux informatifs sur un seul et même canal. De fait, le Codage de l'information s'est révélé être un point-clef qui fait aujourd'hui encore l'objet de Recherches et de normalisation. L'une des formes de codage de l'information parmi les plus simples et les plus anciennes consiste à effectuer une translation en fréquence du signal informatif. Ce type de codage est appelé modulation. Il est d'usage de distinguer trois types de modulations analogiques : Modulation d'amplitude AM (Amplitude Modulation) Modulation de phase PM (Phase Modulation) modulation de fréquence FM (Fréquence Modulation) Ces deux modulations PM, FM sont des modulations angulaires Le fonctionnement de ces trois modulations repose sur la modification d'une des caractéristiques (fréquence, phase ou amplitude) d'un signal sinusoïdal haute fréquence qui est transmis tel quel en l'absence de signal informatif. Ce signal prend la dénomination de porteuse (Carrier en anglais) et sa fréquence est appelée fréquence porteuse. Elle sera notée f_p (la Pulsation porteuse $\omega = 2\pi \cdot f_p$). Par ailleurs, dans tous les cas, nous ne considérerons que le signal à transmettre ($u(t)$ signal

Informatif ou signal utile) est à spectre fini. A titre d'exemple, sont présentées ci-dessous quelques signaux courants, le type de modulation utilisé et la bande passante du signal informatif.

L'idée de moduler non pas l'amplitude (AM) d'un signal porteur, mais sa fréquence (FM) ou

Sa phase (PM) n'est pas récente. Les modulations FM et PM ont été toujours été développées afin de pallier certains inconvénients de la modulation AM. Assez curieusement cependant, un concept tout à fait erroné est à l'origine des études sur les modulations angulaires FM et PM. On s'est en effet d'abord intéressé à la modulation FM dans le but de réduire l'encombrement en fréquence du signal modulé par rapport au cas de la modulation AM. L'idée était alors que si l'on faisait dévier de $\pm \Delta f$ la valeur de la fréquence instantanée f_i d'un signal autour de la fréquence porteuse f_0 , l'encombrement en fréquence du signal modulé devait être limité à $2\Delta f$ quelle que soit la fréquence de la modulante imposant les variations de f_i . Assez rapidement, on s'est aperçu que ce n'était pas du tout le cas, et qu'au contraire la modulation FM est plus exigeante en largeur de bande nécessaire à la transmission que la modulation AM. En 1922, Carson fit l'étude mathématique de la FM et formalisa ce problème

(nous retrouverons Carson un peu plus loin). On s'est alors dit que la modulation FM ne servait à rien, puisque un plus grand encombrement en fréquence devait *a priori* conduire à une puissance de bruit plus importante qu'en AM. Or, en 1936, Armstrong a démontré au contraire que la modulation FM est potentiellement bien plus efficace que la modulation AM quand le rapport signal à bruit en entrée du récepteur est grand c'est finalement pour cette raison que les modulations angulaires ont été développées, malgré leur «gourmandise" en bande passante.

1.1. Introduction

Des techniques de modulations analogiques, la modulation d'amplitude fut la première employée. Comme nous le verrons par la suite, elle se caractérise par une grande mise en œuvre. On la trouve fréquemment pour les transmissions hertziennes (stations radiophoniques grandes ondes par exemple).

1.2 Description du signal AM. Cas d'un signal sinusoïdal :

1.2.1 Signal AM dans le domaine temporel :

Comme son nom l'indique, un signal $s(t)$ (courant ou tension) modulé en amplitude est un signal constitué par une porteuse sinusoïdale de fréquence f_p dont l'amplitude A_p est modifiée suivant une loi linéaire par le signal informatif $u(t)$. Si nous prenons le cas d'un signal modulant sinusoïdal, l'expression de $s(t)$ est donc

$$s(t) = A_p \times \cos(\omega_p t) + k \times A_m \times \cos(\omega_m t) \times \cos(\omega_p t) \dots\dots\dots (1.1)$$

où k est le facteur de proportionnalité du modulateur. k est parfois appelé sensibilité du modulateur. La grandeur de k de la grandeur A_m et A_p . Dans le cas général l'expression d'un signal modulé en amplitude est $s(t) = A_p \times (1 + m \times u(t)) \times \cos(\omega_p t)$ (1.3) Où m est un paramètre essentiel appelé taux de modulation. Il est d'usage d'exprimer m en %. La représentation temporelle de $s(t)$ est illustrée par la figure 1. La courbe en pointillés est appelée l'enveloppe de $s(t)$.

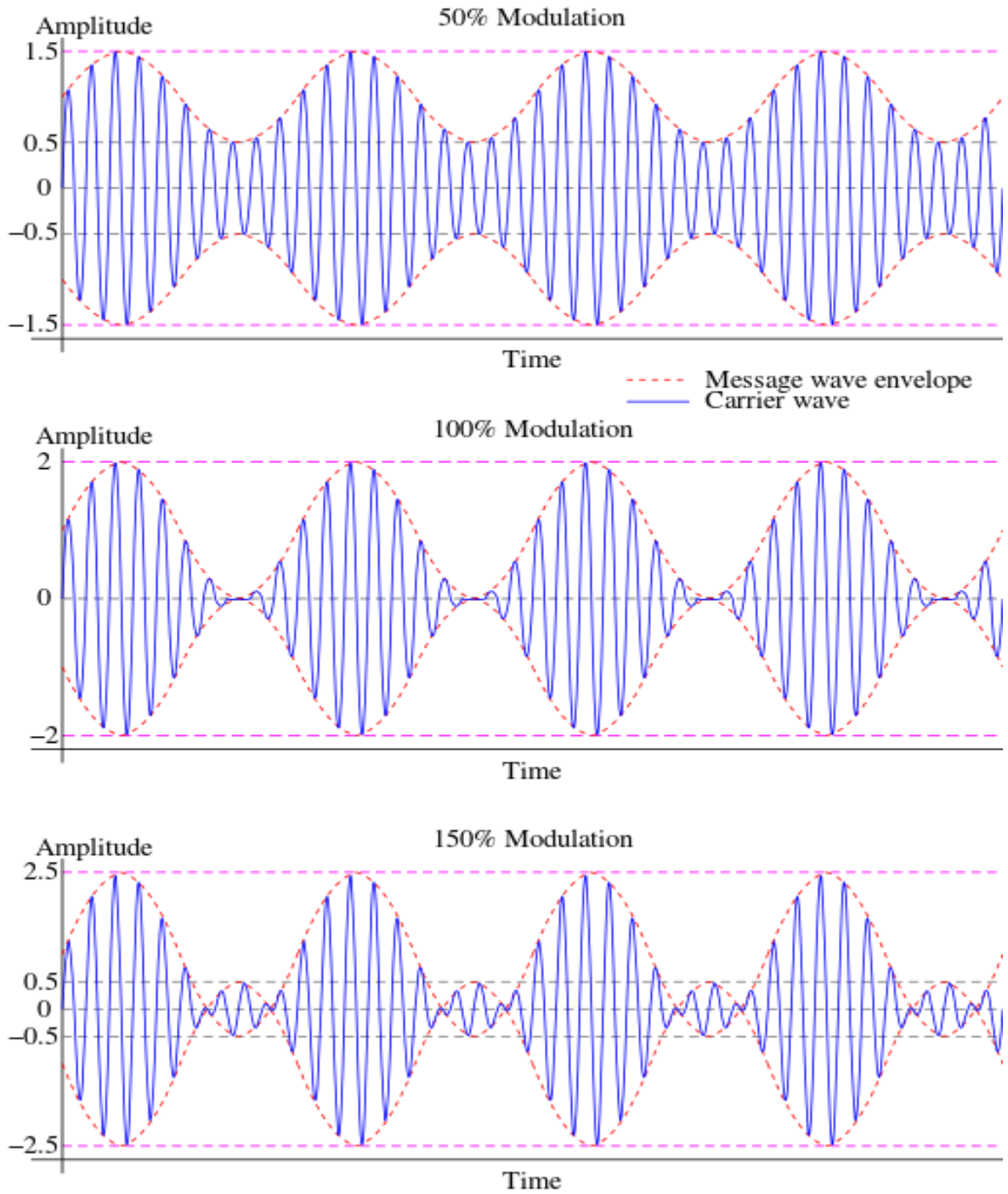


Fig. I-1 : La représentation temporelle de $s(t)$

Dans le cas où m est inférieur à 1 ($m < 100\%$), l'enveloppe de $s(t)$ est identique à $u(t)$. m est défini par le rapport entre l'excursion en amplitude et l'amplitude en l'absence de signal informatif ($u(t)=0$).

$$M = \frac{\Delta s}{2 \cdot A_p} \text{ ou encore } = \frac{s_{max} - s_{min}}{s_{max} + s_{min}}$$

1.2.2 Signal AM dans le domaine fréquentiel :

Le signal modulé $s(t)$ prend la forme : $s(t) = A_p \cdot (1 + m \cdot u(t)) \cdot \cos(\omega_p t)$ (1.4)

Supposons que le signal utile soit de la forme $u(t) = \cos(\omega_m t)$. En développant l'équation précédente nous avons successivement :

$$s(t) = A_p \cdot (1 + m \cdot \cos(\omega_m t)) \cdot \cos(\omega_p t) \dots\dots\dots (1.5)$$

$$s(t) = A_p \cdot \cos(\omega_p t) + m \cdot A_p \cdot \cos(\omega_m t) \cdot \cos(\omega_p t) \dots\dots\dots (1.6)$$

$$s(t) = A_p \cdot (\cos(\omega_p t) + \frac{m}{2} (\cos((\omega_p + \omega_m)t) + \cos((\omega_p - \omega_m)t))) \dots\dots\dots (1.7)$$

Le spectre du signal est donc composé de 3 raies. L'une d'amplitude A_p à la fréquence f_p , les 2 autres sont d'amplitude $\frac{m}{2} A_p$ aux fréquences $f_p - f_m$ (appelée bande latérale inférieure ou, dans la littérature anglo-saxonne Lower Side Band : LSB) et $f_p + f_m$ (appelée bande latérale supérieure ou Upper Side Band : USB). La bande passante requise pour transmettre le signal $u(t)$ en préservant son intégrité est appelée bande de fréquence B et vaut donc $B_{pAM} = Df = 2 f_m$.

La représentation spectrale de signal $s(t)$

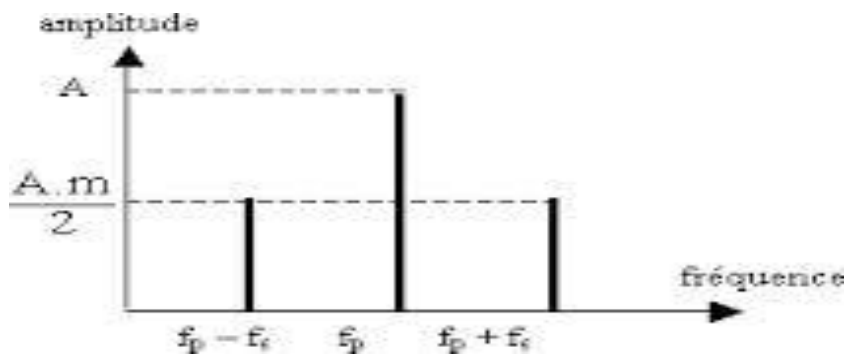


Fig. I-1.2 : Spectre d'un signal $s(t)$

1. 3. Puissance :

La puissance nécessaire à la transmission du signal est obtenue en élevant le signal au carré. S'il s'agit d'une tension (d'un courant), il suffit de diviser (multiplier) par la résistance de charge, souvent constituée par l'antenne de l'émetteur. A un facteur constant près la modulation AM en, courant ou en tension est donc identique. Calculons la puissance moyenne du signal $s(t)$. Nous nommerons P_p la puissance en l'absence de signal modulant ($u(t)=0$). Pour cela nous prendrons le cas d'un signal modulant $u(t)$ sinusoïdal. Le signal $s(t)$ est périodique de période T . On a alors : $P = \alpha \int_T S^2(t) \cdot dt \dots\dots\dots (1.8)$

$$P = \int_T [(1 + m \cdot \cos(wmt))(AP \cdot \cos(wpt))]^2 \cdot dt \dots\dots\dots(1.9)$$

en développant, on obtient :

$$P = \alpha \int_T (1 + 2 \cdot m \cdot \cos(wmt) + (m^2 \cdot \cos^2(wmt)) \cdot Ap^2 \cos^2(wpt) \cdot dt \dots\dots (1.10)$$

Les termes en $\cos^2(x)$ peuvent être mis sous la forme $(1 + \cos(2x))/2$, puis en

Développant l'équation précédente et en remarquant que les termes en $\cos(2x)$ de l'intégrale

Sont nuls, on obtient :
$$p = \alpha \frac{Ap^2 [2 + m^2]}{2} \dots\dots\dots (1.11)$$

$$p = \alpha \left(\frac{Ap}{\sqrt{2}}\right)^2 \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \dots\dots\dots (1.12)$$

Le terme en $p = \alpha \frac{Ap^2}{2}$ représente la puissance en l'absence de signal modulant. C'est la puissance qui est constamment nécessaire pour transmettre au moins la porteuse. Le terme en

$$P = \alpha \frac{m^2 Ap^2}{2} \dots\dots\dots (1.13)$$

Est la puissance effectivement utilisée pour le signal informatif $u(t)$. Notons que le signal $u(t)$ est "présent" deux fois : dans la bande latérale inférieure d'une part mais également dans la bande inférieure On peut donc écrire

$$P_t = P_p \left[1 + \frac{m^2}{2}\right] \text{ et } P_{LSB} = P_{USB} = P_p = \frac{m^2}{2} \dots\dots\dots (1.14)$$

Si l'on considère maintenant le courant envoyé, par exemple à une antenne d'impédance R , il est possible d'établir une relation entre puissances et courants, donc :

$$\frac{p_t}{p_p} = \frac{\frac{1}{2} R I_t^2}{\frac{1}{2} R \cdot I_p^2} = \left(\frac{I_t}{I_p}\right)^2 = \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \text{ d'où } I_t = I_p \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}} \text{ Par un raisonnement identique}$$

$$U_t = U_p \sqrt{1 + m^2/2}.$$

1.4 Cas de plusieurs signaux modulateurs :

Si une porteuse est modulée par plusieurs signaux sinusoïdaux de fréquences ($f_{m1}, f_2, f_{m3}, \dots, f_{mn}$), chacun étant caractérisé par sa propre amplitude, à chacun correspond un taux de modulation ($m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$). L'opération de modulation AM va alors superposition de signaux aux fréquences ($f_p \pm f_{m1}, f_p \pm f_{m2}, f_p \pm f_{m3}, \dots, f_p \pm f_{mn}$) plus la revenir à la porteuse à la fréquence f_p . Par un raisonnement identique au précédent, on définit un taux de modulation

total m_t tel que : $m_t^2 = \sum_{i=1}^n m_i^2$ d'où $m_t = \sqrt{\sum_{i=1}^n m_i^2}$.

1.5 Cas d'un signal modulant quelconque :

Dans le cas où $u(t)$ est un signal quelconque, il nous faut reprendre quelques définitions en général, $u(t)$ est un signal aléatoire. On doit alors faire appel à des notions relativement complexes pour déterminer la représentation spectrale de $u(t)$ et de $s(t)$. Il faut alors utiliser le concept de Densité Spectrale de Puissance c'est-à-dire, la transformée de Fourier de la fonction d'auto-corrélation du signal. Retenons que le spectre présente alors l'allure suivante.

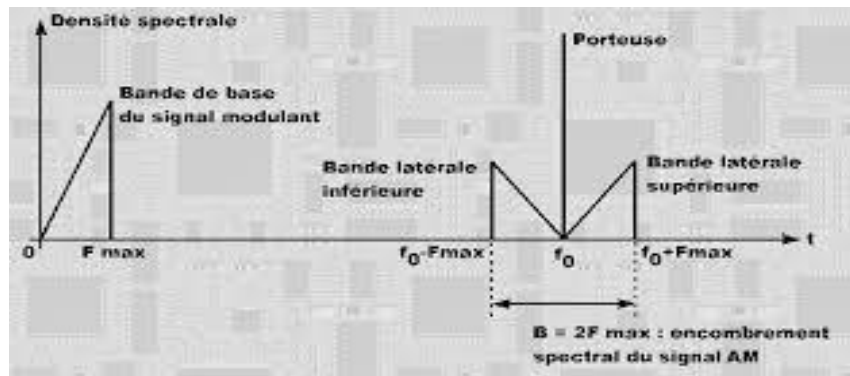


Fig I-2 : Spectre du signal $u(t)$ et spectre du signal $s(t)$

1.6 Modulateurs :

La génération d'un signal AM sort du domaine de ce cours mais il suffit de savoir qu'il existe un grand nombre de multiplicateurs électroniques. En effet les diodes et les transistors bipolaires ont des caractéristiques courant/tension exponentielles (l'addition des deux courants) suivie de la conversion logarithmique. Les modulateurs les plus fréquemment rencontrés sont les modulateurs en anneaux constitués de 4 diodes et de transformateurs (ces derniers sont principalement employés en HF) multiplieurs à découpage, Multiplieurs Gilbert, 2 ou 4 quadrants, employant des transistors bipolaires.

1.7 Démodulation :

La démodulation est l'opération qui consiste à retrouver le signal $u(t)$ à partir du signal $s(t)$. Dans le cas de la modulation d'amplitude, plusieurs techniques peuvent être utilisées pour la démodulation par détection d'enveloppe. Lorsque le taux de modulation m est inférieur à 1, l'enveloppe de $s(t)$ est identique au signal modulant $u(t)$. Le procédé le plus simple consiste à extraire l'enveloppe de $s(t)$, cela, il suffit de remarquer que l'enveloppe est constituée tous les $T_p = 1/f_p$ par le maximum du signal $s(t)$. La réalisation électronique d'un tel dispositif est simple puisqu'il s'agit d'un détecteur crête dont le schéma de principe est donné ci-dessous.

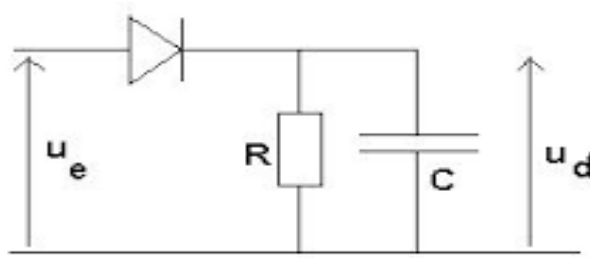


Fig. I-3 : Détecteur crête

Le principe en est simple :

Lorsque la diode est passante, le condensateur est chargé à la tension du signal d'entrée, dès que le signal d'entrée décroît la diode se bloque, car la tension aux bornes du condensateur devient supérieure à la tension du signal d'entrée, le condensateur ne pouvant se décharger que "lentement" dans la résistance. Tant que la diode est bloquée, le condensateur se décharge lentement dans la résistance. Ce type de démodulation ne peut-être se décharge appliquée quand le taux de modulation est bloqué. Pour aborder l'autre technique de modulation m reste supérieur à 1. Démodulation cohérente ou par détection synchrone. La démodulation consiste à remarquer que le spectre du signal modulé $s(t)$ comprend le spectre du signal $u(t)$ transposé en fréquence. La démodulation va donc consister à effectuer un changement de fréquence sur le signal $s(t)$ de façon à faire réapparaître le signal modulant $u(t)$ aux basses fréquences tandis que le signal de la porteuse sera rejeté en haute fréquence. Pour cela $s(t)$ est multiplié par un signal de même fréquence et de même phase que la porteuse. Le résultat de la multiplication est un signal intermédiaire $i(t)$.

1.7.1. Démodulation cohérente ou par détection synchrone :

Pour aborder l'autre technique de démodulation consiste à remarquer que le spectre du signal modulé $s(t)$ comprend le spectre du signal $u(t)$ transposé en fréquence. La démodulation va donc consister à effectuer un changement de fréquence sur le signal $s(t)$ de façon à faire réapparaître le signal modulant $u(t)$ aux basses fréquences que le signal de la porteuse sera rejeté en haute fréquence. Pour cela $s(t)$ est multiplié par un signal de même fréquence et de même phase que la porteuse. Le résultat de la multiplication est un signal intermédiaire $i(t)$. De ce fait :

$$i(t) = S(t) \cdot \cos(\omega_p t) \dots \dots \dots (1.15)$$

$$i(t) = [(1+m \cdot u(t) \cdot A_p \cos(\omega_p t))] \cdot \cos(\omega_p t) \dots \dots \dots (1.16)$$

En développant le terme en $\cos^2(x)$, on obtient :

$$i(t) = [1 + m \cdot u(t)] \times Ap \frac{1 + \cos(2\omega_p t)}{2} \dots \dots \dots (1.17)$$

En filtrant le signal $i(t)$ à l'aide d'un filtre passe-bas, le terme en $\cos(2\omega_p t)$ est supprimé et il ne reste plus que le terme en $u(t)$ auquel s'ajoute un terme continu. Le signal multipliant $s(t)$ étant rigoureusement en phase avec la porteuse, on parle alors de **Voyons maintenant le cas où le signal modulé n'est pas rigoureusement en phase avec la Porteuse du signal modulé :**

$$i(t) = s(t) \times \cos(\omega_p t + \varphi) \text{ ou } \varphi : \text{déphasage entre la porteuse et le terme en } \cos(\omega_p t)$$

$$i(t) = [(1 + m \cdot u(t)) \times Ap \cos(\omega_p t)] \times \cos(\omega_p t + \theta) \dots \dots \dots (1.18)$$

Développant le produit $\cos(\omega_p t) \cos(\omega_p t + \varphi)$, on obtient :

$$i(t) = (1 + m \cdot u(t)) \times Ap \frac{\cos(\varphi) + \cos(2\omega_p t + \varphi)}{2} \dots \dots \dots (1.19)$$

Après le filtrage, le déphasage φ entre la porteuse et le terme en $\cos(\omega_p t)$ si la phase est traduit le fait que le terme en $u(t)$ est multiplié par un terme en $\cos(\varphi)$. p constante mais aléatoire, le terme démodulé peut être nul ou proche de zéro (phase f voisine de $\pi/2 + k \times \pi$).

Parasite cette technique de démodulation impose donc de disposer d'un signal rigoureusement en la porteuse suffisamment stable en fréquence pour rester constamment synchrone avec la porteuse du signal émis. Pour réaliser une démodulation synchrone, la technique phase avec la porteuse à partir du signal modulé. Cette technique fait appel à un employée consiste à générer un signal en dispositif appelé PLL (Phase Locke Loop) ou Boucle à Verrouillage de Phase) qui permet de synthétiser un signal en phase avec l porteuse. Le schéma de démodulation revient à celui présenté ci-dessous

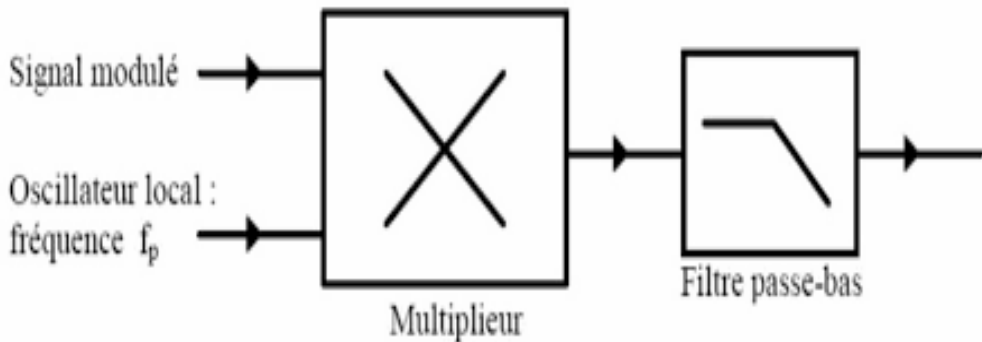


Fig. I-4 : Principe de la démodulation synchrone

1.8 Modulation d'amplitude sans porteuse :

1.8.1 Principe :

Nous avons vu que la modulation d'amplitude se traduit par la transmission d'une raie à fréquence de la porteuse. Cette raie contenant la porteuse ne contient aucune information, utile la puissance utilisée pour la transmettre n'est apparemment pas indispensable La modulation sans porteuse, appelée AM-P. (ou DSB-SC : Double Side Band Suppressed Carrier), consiste à ne transmettre que les bandes latérales. Lors de la démodulation, il faudra

Pouvoir reconstituer la porteuse pour restituer le signal modulant $u(t)$. En modulation AM nous avons : $s(t) = A_p \times \cos(wpt) + A_p \times m \times u(t) \times \cos(w pt) \dots\dots\dots (1.20)$

La suppression de la porteuse, dans le spectre uniquement, revient à supprimer le terme. La génération d'un signal AM-P revient donc à produire un signal $s(t)$ de la forme $s(t) = A_p \times u(t) \times \cos (w pt) \dots\dots\dots (1.21)$

1.8.2 Représentation temporelle d'un signal AM-P :

La représentation temporelle de $s(t)$ est simple à tracer à partir du signal modulant $u(t)$ puisque les valeurs de $s(t)$ sont toutes comprises entre $u(t)$ et $-u(t)$. Dans le cas où $u(t)$ est un signal sinusoïdal, nous avons :

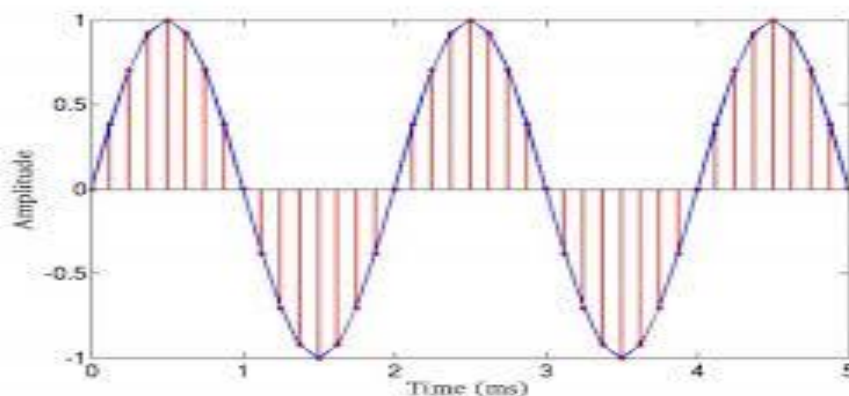


Fig. I-5 : signal sinusoïdal modulé en amplitude sans porteuse

L'enveloppe de $s(t)$ est constituée par la valeur absolue de $u(t)$. A chaque changement de signe de $u(t)$, la porteuse change de signe. Une autre façon de voir les choses est de dire qu'à chaque changement de signe de $u(t)$, la phase de la porteuse varie de.

1.8.3. Spectre d'un signal AM-P :

En suivant un raisonnement analogue à celui qui nous avait permis de déterminer le spectre du signal AM, c'est-à-dire en prenant un signal $u(t) = \cos(wmt)$ nous déduisons le spectre du signal AM-P : $s(t) = A_p \times \cos(wmt) \times \cos(w_p t)$ (1.22) soit :

Le spectre du signal est donc composé de 2 raies. Toutes les 2 sont d'amplitude $\frac{m}{2}A_p$ aux fréquences $f_p - f_m$ (appelée Lower Side Band LSB) et $f_p + f_m$ (appelée Upper Side Band USB). La bande passante requise pour transmettre le signal $u(t)$ en préservant son intégrité est donc $s(t) = A_p \cdot \frac{m}{2} (\cos((w_p + w_m)t) + \cos((w_p - w_m)t))$ (1.23)

Le spectre du signal est donc composé de 2 raies. Toutes les 2 sont d'amplitude $(A_p \frac{m}{2})$ aux fréquences $f_p - f_m$ (appelée Lower Side Band LSB) et $f_p + f_m$ (appelée Upper Side Band USB). La bande passante requise pour transmettre le signal $u(t)$ en préservant son intégrité est donc. $B_{pAM} \Delta f = 2f_m$.

Puissance L'amélioration du rendement en puissance est sensible puisque toute la puissance est consacrée au signal. Toutefois, il faut noter que le signal utile est transmis deux fois une dans la LSB et l'autre dans la USB, chaque bande contenant : $\propto \frac{A_p^2}{4}$.

1.8.4. Démodulation d'un signal AM-P

L'enveloppe de $s(t)$ n'étant pas une fonction bijective du signal modulant, la démodulation du signal AM-P ne peut se faire que par démodulation synchrone. Du fait de la complexité de produire un signal rigoureusement en phase avec la porteuse et ses conséquences sur la qualité signal démodulé, la modulation AMP-P n'est pas utilisée pour la transmission de signaux audio.

1.9. Modulation à Bande Latérale Unique

Il a été vu précédemment que, pour les modulations AM et AM-P, les deux bandes latérales sont porteuses de la même information, $u(t)$. Il est donc envisageable de n'en transmettre qu'une des deux, ce qui permet d'une part de réduire la bande de fréquence allouée pour transmettre le signal, et d'autre part, de réduire la puissance à émettre transporter la même quantité d'information. Ce type de modulation est appelé Modulation à Bande Latérale Unique ou BLU (SSB : Single Side Band).

1.9.1. Principe de la modulation en Bande Latérale Unique

La technique la plus simple et la plus communément employée pour obtenir un signal en modulation SSB consiste à réaliser une AM-P puis à filtrer l'une ou l'autre des deux bandes. Pour conserver l'USB (respectivement la LSB), il serait théoriquement en pratique des filtres possible de n'utiliser qu'un filtre passe-haut (respectivement passe- bas). Néanmoins, sont employés afin de réduire la puissance de bruit. Le schéma de principe d'un modulateur SSB est donné ci-dessous :

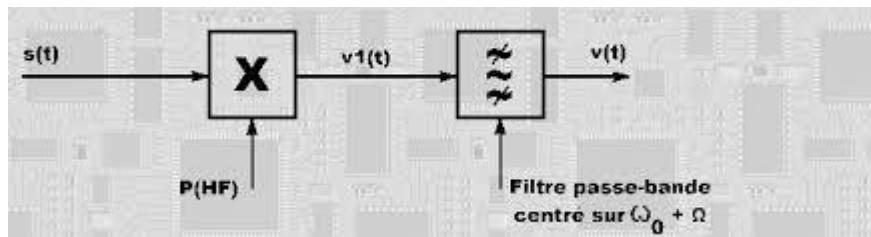


Fig. I-6: Principe de la modulation SSB

1.9.2. Spectre d'un signal SSB :

Prenons un signal $u(t) = \cos(\omega_m t)$ dont nous déduirons le spectre du signal SSB. Nous appellerons $i(t)$ le signal intermédiaire modulé AM-P :

$$i(t) = A_p \times \cos(\omega_m t) \times \cos(\omega_p t) \dots \dots \dots (I.24)$$

Pour obtenir une SSB-USB, on introduit un filtre passe-bas chargé de supprimer toutes les composantes fréquentielles de $i(t)$ supérieures à f_p . Après filtrage il ne reste que Le spectre du signal est donc composé :

$$S(t) = A_p \times \frac{m}{2} (\cos((\omega_p + \omega_m)t) + \cos((\omega_p - \omega_m)t) \dots \dots \dots (I.25)$$

Pour obtenir une SSB-LSB, on introduit un filtre passe-haut chargé de supprimer les composantes fréquentielles de $i(t)$ supérieures à f_p . Après filtrage il ne reste que

$$S(t) = A_p \times \frac{m}{2} \cos((\omega_p + \omega_m)t) \dots \dots \dots (1.26)$$

Le spectre du signal est donc composé d'une seule raie. En fait, on constate que dans le cas de la SSB-USB, le spectre du signal $s(t)$ est simplement formé du spectre du signal $u(t)$ décalé en fréquence de f_p (Attention, ce n'est pas le cas pour la SSB-LSB puisque les composantes hautes fréquences de $u(t)$ deviennent les composantes basses pour $s(t)$). La bande passante requise pour transmettre le signal $u(t)$ en préservant son intégrité est donc : $BP_{AM} = \Delta f = f_m$. Dans le cas général, le spectre d'un signal modulé SSB est le suivant : Notons que l'introduction du filtre passe-bande entraîne des contraintes sur la forme de $u(t)$. En effet,

il ne sera pas possible de réaliser des filtres dont les pentes soient infiniment raides. De ce fait Comme le filtre passe-bande ne doit laisser passer que des signaux dans la bande il est $f_p < B < f_p + f_m$ Max, nécessaire que $u(t)$ ne contiennent pas de composantes très basses fréquences.

1.9.3. Démodulation d'un signal SSB :

Nous avons vu que la modulation d'amplitude SSB revient à effectuer un changement de fréquence. Le procédé de démodulation sera donc, comme pour la modulation AM-P, une démodulation synchrone. Nous raisonnerons en nous appuyant sur le cas d'un signal $u(t)$ sinusoïdal. Nous avons donc : $i(t) = s(t) \cdot \cos(\omega_p t + \varphi)$ où φ : déphasage entre la porteuse et le terme en $\cos(\omega_p t)$. En développant le produit $\cos((\omega_p - \omega_m)t) \cos(\omega_p t + \varphi)$, on obtient $i(t) = A_p \frac{\cos(\omega_m t + \varphi) + \cos(\omega_m t + 2\omega_p t + \varphi)}{2}$ (I.27)

Après filtrage passe-bas de $i(t)$, on retrouve bien le signal $u(t)$ à une erreur de phase près est insensible aux déphasages. Le fait de renoncer à une erreur de phase nulle permet de simplifier la réalisation des démodulateurs. La SSB est donc utilisée en téléphonie où ses avantages (bande minimum, pas de signaux basses Fréquences, puissance utile optimisée) ne sont pas contre balancés par son à défaut Savoir l'erreur de phase unique.

1.10. Modulation à Bande Latérale Résiduelle :

La transmission des signaux vidéo à introduits des contraintes supplémentaires par rapport au cas des signaux audio. En effet, pour une image télévision, le signal vidéo se caractérise par une bande passante importante (5 à 6 MHz selon les normes). Le spectre de ce signal comporte d'importantes composantes basses-fréquences qu'il n'est pas question de filtrer. Enfin, le signal reçu doit être conforme. Il n'est donc pas possible d'utiliser des modulations SSB, ni AM-P. Recourir à une modulation AM limiterait considérablement le nombre de canaux utilisables et nécessiterait des émetteurs sensiblement plus puissant Il faut donc trouver un compromis entre AM et SSB, c'est la modulation à bande Latérale résiduelle (VSB : Vestigial Side Band). Pour obtenir un signal VSB, la technique employée consiste à réaliser une modulation AM suivie d'un filtre qui atténuera sensiblement les composantes fréquentielles inférieures à f_p . L'une des bandes (souvent la LSB) se trouve donc partiellement atténuée. Le spectre du signal VSB est donc le suivant :

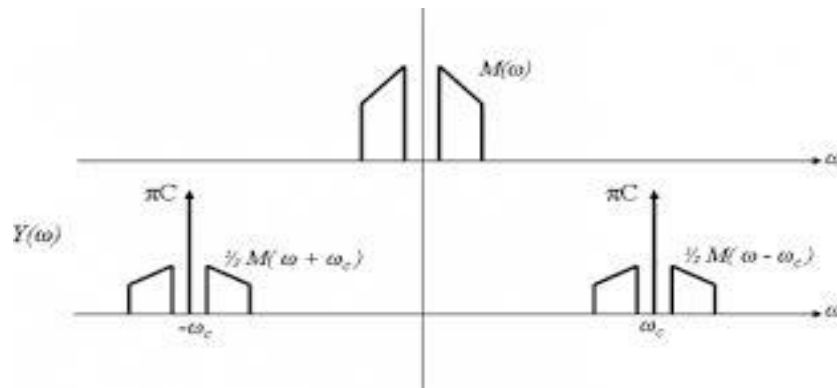


Fig. I-7 : Le spectre du signal VSB

1.11 Conclusion :

Type de modulation	Puissance totale	puissance utile	démodulation
AM	$A_p^2/2(1+2m^2/4)$	2fois $A_p m^2/4$	simple
AM-P	$A_p^2/2$	2 fois $A_p^2/4$	Très simple
SSB	$A_p^2/4$	$A_p^2/4$	Complex
VSB	$>A_p^2 /2(1+m^2/4)$	$A_p m^2/4$	simple

Appliquée à la diode VARICAP. Un signal harmonique (porteur d'information) dont l'amplitude est constante mais la fréquence varie en fonction de la valeur d'un autre signal (message), représente un signal modulé en fréquence. Comme dans tous les cas de modulation, le message est un signal Basse fréquence (BF) et la porteuse un signal haute fréquence (HF). L'intérêt principal de ce procédé résulte du fait que les parasites atmosphériques, qui provoquent une forte modulation d'amplitude par l'intermédiaire d'une atténuation variable dans le temps, ne provoquent qu'une faible déviation (modulation) de la fréquence. un signal FM est donc plus robuste au bruit lors de la transmission par voie hertzienne qu'un signal AM. Dans ce chapitre on explore les bases de la modulation FM en insistant sur la complexité du spectre obtenu. Soit $v(t) = V_0 \cos(\Omega t) = V_0 \cos(2\pi Ft)$ la porteuse, de fréquence F , en l'absence de signal modulateur. Le signal modulé en fréquence aura la forme générale : $V_{FM}(t) = V_0 \cos[\varphi(t)] = V_0 \cos[\Omega t + \varphi(t)]$ (II.5)

Où la phase $\varphi(t)$ du signal à l'instant t est égale à la somme de la phase de la porteuse non modulée, t , et d'un autre terme $\varphi(t)$ provenant de la modulation. La modulation de fréquence n'est donc qu'une forme spéciale de la modulation de phase. La fréquence instantanée d'un signal $\cos[\varphi(t)]$ étant définie comme $F_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}$. On peut calculer la fréquence instantanée du signal de la relation (1) :

$$F_i(t) = \frac{1}{2\pi} \left[\Omega + \frac{d\varphi(t)}{dt} \right] = F + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \dots \dots \dots (II.6)$$

On voit que la fréquence instantanée, proportionnelle au rythme de variation de $\varphi(t)$, est égale à la fréquence de la porteuse F (sans modulation) à laquelle s'ajoute un terme de déviation, proportionnel au rythme de variation de $\varphi(t)$. On note $m(t)$ le message (de forme générale) BF à transmettre. Dans le cas d'une modulation de fréquence, c'est la déviation de la fréquence instantanée qui est proportionnelle au message, ce qui implique que la dérivée temporelle de la phase du signal modulé est proportionnelle au signal modulateur $m(t)$, soit $d\varphi(t)/dt = \alpha m(t)$. La fréquence instantanée du signal FM s'écrit alors

$$F_i(t) = F + \frac{1}{2\pi} \alpha m(t) = F + \alpha' m(t) \dots \dots \dots (II.7)$$

Où la constante $\alpha' = \alpha/2$, exprimée en Hz^{-1} , est une caractéristique de l'oscillateur commandé en tension (VCO) qui génère la modulation elle correspond à la pente de sa caractéristique fréquence-tension autour de la fréquence F . Si l'on se place dans le cas simple où $m(t)$ est un signal harmonique de fréquence f et d'amplitude v_0 :

$M(t) = V_0 \cos w(t) = v_0 \cos(2\pi f t)$ On obtient l'expression de la fréquence instantanée du signal modulé :

$$F_i(t) = \frac{1}{2\pi} [\Omega + K \cos(\omega t)] = F + \frac{1}{2\pi} k \cos(\omega t) \dots \dots \dots (II.8)$$

$K = \alpha v_0$ dans ce cas simple, la fréquence instantanée du signal modulé oscille autour de la fréquence F de la porteuse ; la fréquence de l'oscillation est égale à f et son amplitude (déviaton maximale de fréquence) égale à $k/2\pi$. La phase du signal modulé est alors donné par :

$$\varphi(t) = 2\pi \int f_i(t) dt = \Omega t + \frac{k}{\omega} \sin(\omega t) \dots \dots \dots (II.9)$$

Le terme t représente la phase du signal non modulé. L'excursion maximale de phase par rapport à la phase du signal non modulé, c'est-à-dire la valeur maximale de $\varphi(t)$, est définie comme l'indice de modulation

$$B = \frac{k}{\omega} = \frac{\alpha v_0}{2\pi f} = \frac{\alpha' v_0}{f} \dots \dots \dots (II.10)$$

Et dépend du coefficient α' (propre au modulateur) et des caractéristiques (amplitude et fréquence) du signal modulant. Si l'on note $\Delta\Omega_i$ et Δf_i les excursions maximales de pulsation et de fréquence instantanées Par rapport à Ω et F , respectivement, on obtient une relation entre l'indice de modulation, l'excursion maximale de pulsation ou de fréquence et la pulsation ou la fréquence du signal modulant (Eque. (4) et (6)) :

$$B = \frac{\Delta\Omega_i}{\omega} = \frac{\Delta f_i}{f}$$

2.3. Représentation temporelle du signal FM :

Prenons le cas d'un signal modulant sinusoïdal $u(t) = A_m \cos(\omega_m t)$ avec $\omega_m \ll \omega_p$. L'expression du signal $s(t)$ est alors :

$$S(t) = A_p \cos(\omega_p t + 2\pi \cdot v \cdot \int A_m \cos(\omega_m t) \cdot dt \dots \dots \dots (II.11)$$

$$S(t) = A_p \cos(\omega_p t + \frac{2\pi v}{\omega_m} \cdot A_m \sin(\omega_m t)) \dots \dots \dots (II.12)$$

En reprenant l'expression de la pulsation (ou de la fréquence) instantanée, il est possible d'en déduire la fréquence instantanée $f_s(t)$ du signal FM $s(t)$

$$f_s(t) = f_p + v \cdot A_p \cos(\omega_m t) \dots \dots \dots (II.13)$$

L'excursion en fréquence Δf_s de $s(t)$ est donc : $\Delta f_s = v \cdot A_m$ L'expression de la phase instantanée est immédiate $\varphi_s(t) = \omega_p t + \frac{2\pi v}{\omega_m} \cdot A_p \sin(\omega_m t)$ ou également

$$\varphi_s(t) = \omega_p t + \frac{A_p v}{f_m} \cdot \sin(\omega_m t) \dots \dots \dots (II.14)$$

L'excursion en phase $\Delta\varphi_s$ de $s(t)$ est donc : $\Delta\varphi_s = \frac{2\pi v \cdot A_p}{\omega_m} = \frac{v \cdot A_p}{f_m}$ on en déduit alors la relation qui lie l'excursion de phase à l'excursion de fréquence : $\Delta\varphi_s = \frac{\Delta f_s}{f_m}$ Il est d'usage d'appeler indice de modulation le terme

$$\delta = \delta = \Delta\varphi_s = \frac{\Delta f_s}{f_m} \dots \dots \dots (II.15)$$

Possible de réécrire le signal modulé FM $s(t)$ sous la forme : $s(t) = A_p \cos(\omega_p t + \delta \cdot \sin(\omega_m t))$

Il est essentiel de remarquer que l'indice de modulation d , contrairement au taux démodulation AM m , dépend à la fois de la fréquence et de l'amplitude du signal modulant $u(t)$. L'allure d'un signal FM, typiquement un signal de bande intermédiaire (FI-FM) audio Est donc donné ci dessous

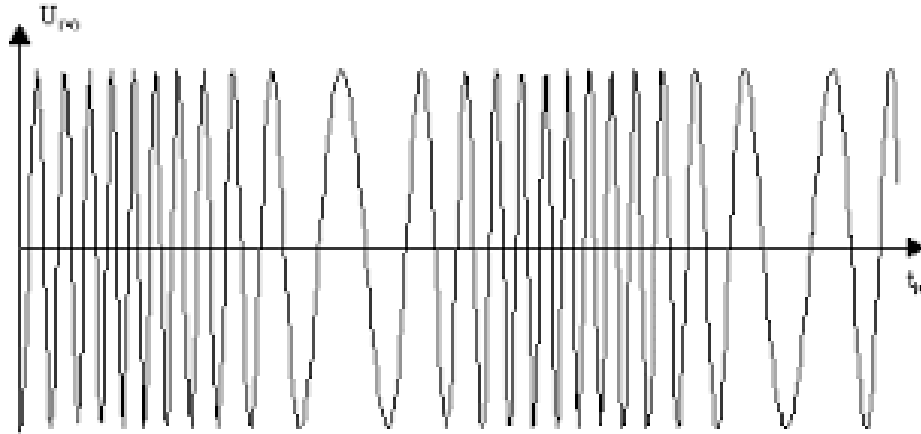


Fig. II_1 : Représentation temporelle du signal FM

2.4 Représentation fréquentielle d'un signal FM, cas d'un signal modulant sinusoïdal :

Pour déterminer le spectre de $s(t)$, nous prendrons $u(t)$ sinusoïdal. Nous avons alors :

$$S(t) = A p \cos(\omega p t + \delta \times \sin(\omega m t)).$$

A l'aide de la formule de Moivre, il est possible de mettre l'expression précédente sous la forme :

$$S(t) = A p \frac{e^{j(\omega p t + \delta \cdot \sin(\omega m t))} + e^{-j(\omega p t + \delta \cdot \sin(\omega m t))}}{2} \dots \dots \dots (II.16)$$

$$S(t) = A p \frac{e^{j\omega p t} e^{j\delta \sin(\omega m t)} + e^{-j\omega p t} e^{-j\delta \sin(\omega m t)}}{2} \dots \dots \dots (II.17)$$

Trouver le spectre de $s(t)$ revient à calculer $S(\omega)$ la transformée de Fourier de $s(t)$. Pour cela il faut commencer par calculer la transformée de Fourier d'un des deux produits d'exponentielles. de ce fait, il faut développer en série de Taylor le terme $e^{j\delta \cdot \sin(\omega t)}$ il est alors possible de démontrer que

$$e^{j\delta \cdot \sin(\omega m t)} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} e^{jk \cdot \omega m t} \cdot J_k \dots \dots \dots (II.18)$$

Où la fonction $J_k(x)$ est appelée fonction de Bessel de première espèce et $J_k(x)$ est Définie par

$$J_k(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(k \cdot \theta - x \sin(\theta)) d\theta \dots \dots \dots (II.19)$$

2.4.1. Les fonctions de Bessel :

Les fonctions de Bessel sont les solutions particulières de l'équation différentielle :

$$y'' + \frac{y'}{x} \left(1 - \frac{n^2}{x^2}\right) \cdot y = 0$$

$$J_n(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+n}}{k!(k+n)!} \dots\dots\dots (II.20)$$

Les fonctions de Bessel vérifient plusieurs propriétés intéressantes notamment :

$$J_n(x) = (-1)^n \cdot J_{-n}(x) \dots\dots\dots (II.21)$$

Il est simple de vérifier que : $\sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k^2(x) = 1 \dots\dots\dots (II.22)$

Harmonique (1) s'écrit alors sous la forme :

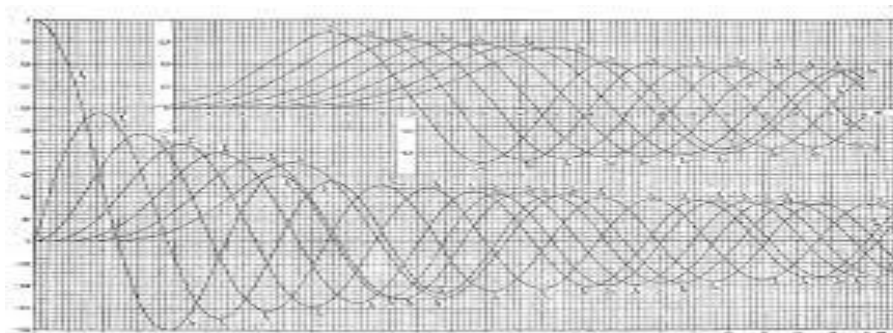


Fig. II_2 : Aérations des fonctions de Bessel de première espèce.

Par ailleurs, étant donné que $e^{j\delta \cdot \sin(x)}$ est une fonction périodique, il est possible de la développer en série de Fourier. On a alors :

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} e^{jk\theta} \cdot C_k \text{ Avec } C_k = \int_0^{2\pi} e^{jx\sin(\theta)} e^{-jk\theta} d\theta \dots\dots\dots (II.23)$$

2.4.2. Spectre du signal modulé

À l'aide des relations (5) et (6), une porteuse modulée en fréquence par un signal $v_{fm} = v_0 \cos [\Omega t + B \sin (w t)] \dots\dots\dots (II.24)$

Et en développant le cosinus de la somme on a :

$$v_{fm} = v_0 \cos (\Omega t) \cos [B \sin (wt)] - v_0 \sin (\Omega t) \sin [B \sin (wt)] \dots\dots\dots (II.25).$$

Les termes $\cos [B \sin (W t)]$ et $\sin [B \sin (w t)]$ sont des fonctions périodiques et se développent en série de Fourier, dont les coefficients sont donnés par des fonctions de Bessel (Sans démonstration. . .) peut écrire

$$\cos [B \sin (wt)] = J_0(B) + 2J_2(B) \cos (2wt) + 2J_4(B) \cos 4wt + \dots$$

$$\sin [B \sin (w t)] = 2J_1(B) \sin w(t) + 2J_3(B) \sin (3wt) + \dots \text{ par conséquent on peut écrire dans (8) sans forme}$$

$$v_{fm}(t) = v_0 J_0(B) \cos (\Omega t) + \dots\dots\dots (II.26)$$

$$+ v_0 J_1(B) \{ \cos [(\Omega + w) t] - \cos [(\Omega - w)t] \} +$$

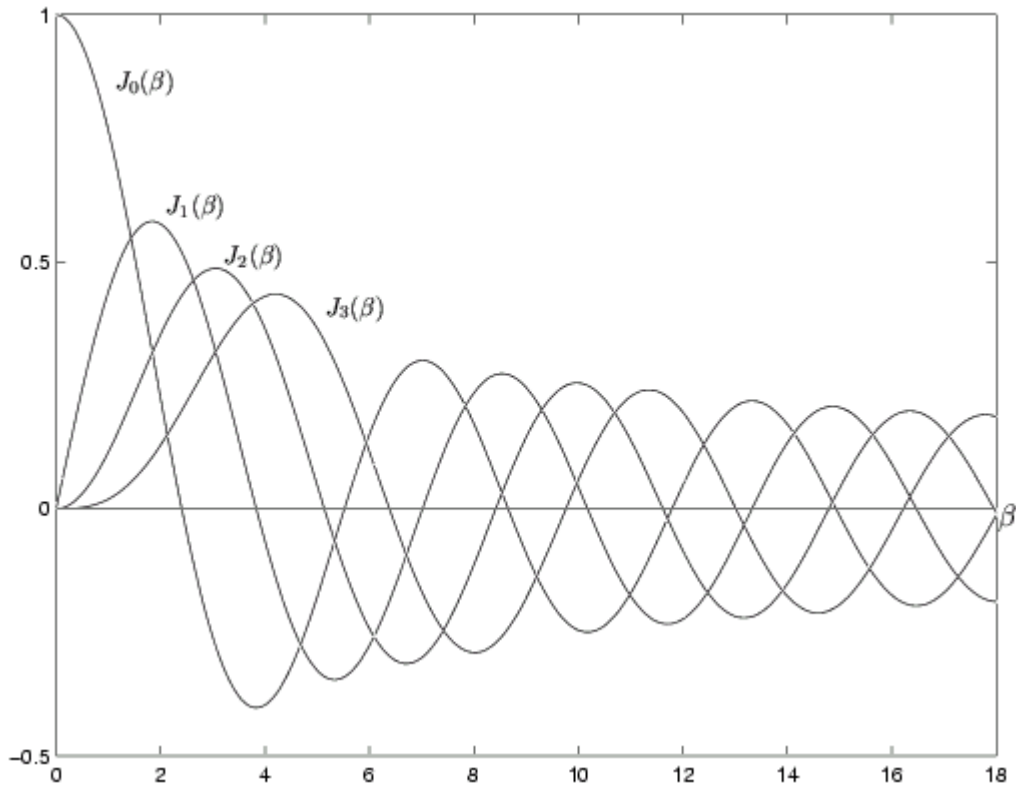


Fig. II_3 : Fonctions de Bessel $J_n(\beta)$, $n=1, 2, 3, 4$

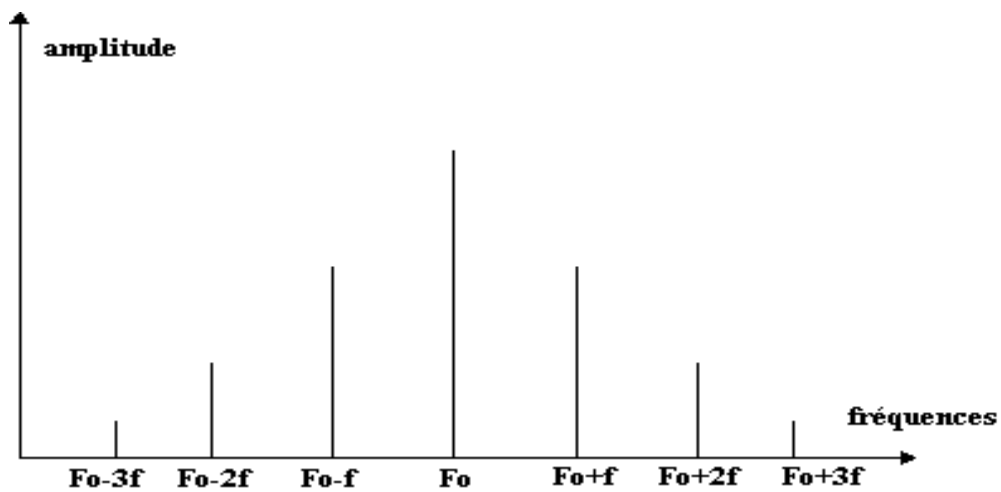


Fig. II_4 : spectre FM

2. 5.Puissance :

Nous avons vu précédemment que : de ce fait, la puissance du signal FM $s(t)$ se répartit dans l'ensemble des raies et est égale à la puissance de la porteuse en l'absence du signal modulant $u(t)$. Cela revient à : $\sum_{k=-\infty}^{+\infty} J^2 k(\delta) = 1$

$$P_s = \alpha \frac{AP^2}{2} \forall \delta$$

L'interprétation physique de ce résultat est simple : seule la fréquence du signal varie, et non son amplitude. Etant donné que l'amplitude de la raie à la fréquence de la porteuse est donnée par $J_0(\delta)$, certains indices de modulation d conduisent à une absence de raie à la fréquence de la porteuse. Théoriquement, le signal FM nécessite une bande infinie. En pratique, seules les N raies de part et d'autre de f_p (soit au total $2N+1$ raies) qui contribuent à 99% de la puissance sont prises en compte lors de la détermination de la bande de fréquence de $s(t)$. Pour cela, il est d'usage de considérer trois cas :

$$1) \delta \ll 1, \text{ La bande de fréquence est alors } B = 2 \times fm.$$

Le spectre du signal FM $s(t)$ est voisin de celui d'un signal AM et l'on parle de modulation à bande étroite (Narrow Band Modulation).

2) $0,3 \leq \delta \leq 20$, La bande de fréquence est alors $B = 2 \times N \times fm$ où N représente les N raies dont l'amplitude est supérieure à 0,01 de A_p .

3) $\delta > 20$, l'approximation $B = 2 \cdot [\Delta f + 2fm]$ est alors utilisée. Très souvent, on a recours à une règle empirique dite règle de Carson :

$$B = 2 \cdot [\delta + 1] \cdot fm$$

2.6. Modulation par circuit oscillant à diode vari cap :

L'un des montages les plus simples permettant d'obtenir un signal modulé est de placer une diode à capacité variable (vari cap) dans un circuit oscillant. En effet toute diode semi conducteur polarisée en inverse présente une capacité de transition : $CT = \frac{k}{v^a}$ où K est une constante, V est la tension aux bornes de la diode et a dépend du type de diode ($a = 1/2$ pour une jonction abrupte). Lorsque l'on place une diode polarisée en inverse dans un circuit oscillant (Fig.3) On peut alors faire varier la fréquence du circuit oscillant simplement en modifiant la tension de polarisation V . La capacitance C_1 évite le passage du courant de polarisation dans le circuit oscillant. En prenant pour valeur de CT par exemple :

$$CT = \frac{k}{v^{\frac{1}{2}}}$$

La capacité du circuit oscillant sera

$$C = \frac{C_1 CT}{C_1 + CT}$$

Et la fréquence des oscillations

$$F = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Pour de petites variations de V autour de sa valeur initiale, on aura :

$$\frac{dF}{F} = -\frac{1}{2} \frac{dC}{C}$$

Ave

$$\frac{dC}{C} = \frac{C_1}{C_1+C_T} \frac{dC_T}{C_T}$$

Soit

$$\frac{dC_T}{C_T} = \frac{1}{2} \frac{dV}{V}$$

$$\frac{dF}{F} = \frac{C_1}{4(C_1+C_T)} \frac{dV}{V}$$

D'où on obtient finalement

$$F(t) = F_c \exp \left[\frac{C_1}{4(C_1+C_T)} v(t) \right]$$

D'après la dernière équation, les petites variations de V (t) autour d'une tension centrale (DC) donneront des variations de la fréquence d'oscillation F(t) autour d'une Fréquence centrale, ce qui correspond à une modulation de fréquence : la composante continue de la tension V(t) détermine la fréquence de la porteuse et sa partie alternative constitue le signal modulant.

2.7. Technique de démodulation de signaux FM

Démodulation par dérivation et détection d'enveloppe pour démoduler un signal modulé FM, il est nécessaire de recourir à dispositif dont la tension (ou le courant) de sortie varie linéairement avec la fréquence. L'opérateur mathématique qui permet cette opération est évidemment la dérivation. En récupérant l'enveloppe du signal dérivé on obtient le signal modulant. L'un moyen les plus simple revient alors au synoptique suivant :

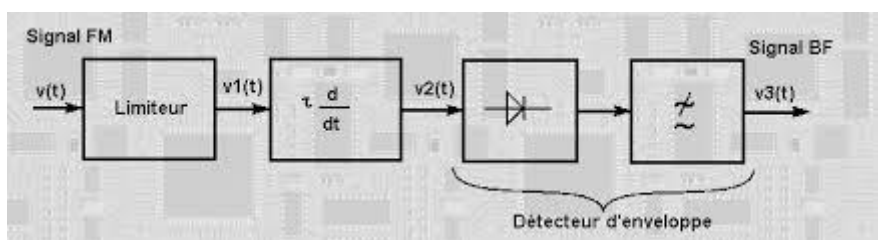


Fig. II_5 : Principe d'un démodulateur FM

Afin d'avoir des signaux qui varient proportionnellement à la fréquence, il est nécessaire d'employer un dérivateur. L'sécriteur permet d'avoir des signaux d'amplitude constante avant dérivateur et donc de s'affranchir des éventuelles variations d'amplitude du signal modulé. Il ne reste plus ensuite qu'à effectuer une détection crête.

2.8. Démodulation par utilisation d'une Boucle à verrouillage de phase :

Nous avons vu, lors de l'étude des démodulateurs AM, qu' la PLL est un dispositif maintenant constant l'écart de phase entre le signal qu'elle délivre et le signal d'entrée .

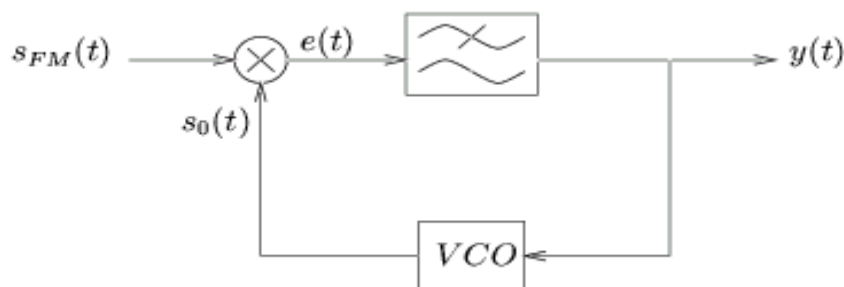


Fig. II_6 : Schéma de principe de la PLL

Nous avons vu qu'après filtrage, le signal $e(t)$ sert d'entrée au VCO (VCO qui revient à un modulateur FM de pulsation porteuse ω_c). Or : $\omega_e - \omega_s = \omega_c$ ce qui implique :

$$\frac{d}{dt}(\omega_e - \omega_s) = 0 \text{ Ou encore : } f_e - f_s = 0 \text{ donc La fréquence}$$

instantanée du signal d'entrée est donc identique à la fréquence instantanée du signal produit par le VCO. Etant donné que la fréquence instantanée du signal d'entrée de la PLL est une fonction linéaire du signal modulant $u(t)$, le signal de commande du modulateur FM de la PLL suit exactement le signal $u(t)$.

2.9. Application de la modulation de fréquence :

Comme nous l'avons vu les principaux avantages de la modulation FM résident dans le fait que la puissance est constante quel que soit le signal modulant, le signal démodulé dépend très peu du niveau du signal modulé présent à l'entrée du démodulateur. Lorsque les indices de modulation sont élevés, un signal FM est également plus robuste vis-à-vis des perturbations qu'un signal AM. En revanche la bande de fréquence est toujours supérieure à celle du signal AM. De ce fait la modulation FM est utilisée lorsque le signal reçu est caractérisé par un affaiblissement variable (radiocommunications mobiles en milieu urbain), que la largeur de bande est élevée qui une bonne qualité de signal démodulé est nécessaire. On rencontre donc les signaux FM à des hautes fréquences (VHF, UHF) dans les liaisons par satellites, dans la radio diffusion FM (stéréo) ou dans les téléphones mobiles.

2. 10. Les avantages et inconvénients de la modulation FM :

I- Les avantages :

La modulation FM comporte de nombreux avantages par rapport à les autres modulations (AM, PM), dont parmi :

A- Largeur de la bande passante étendue :

La largeur de la bande passante est beaucoup plus grande en modulation de fréquence qu'en modulation d'amplitude. La restitution de la basse fréquence sera plus étendue en FM qu'en AM. On peut des signaux dont la fréquence atteint 15kHz sans dépasser la largeur de 300kHz (largeur maximale admise pour chaque canal). Cette possibilité d'émettre des fréquences allant jusqu'à 15 Hz, c'est à-dire les harmoniques de la fréquence la plus élevée des sons audibles, constitue un des principaux avantages de la modulation FM par rapport à la modulation AM. Pour cette dernière, la fréquence maximale possible d'émettre est limitée à 4.5Khz

B- Moins sensible aux bruits parasites :

La modulation FM est pratiquement insensible aux parasites industriels et atmosphériques. Les parasites affectent plus l'amplitude des ondes que la fréquence. Dans le cas des parasites intenses, il peut se produire de légères variations de fréquence. Celle-ci pourrait donc perturber la réception AM, dans les mêmes conditions. Il faut préciser que les parasites affectent surtout les fréquences les plus élevées du signal BF.

C- Très faible bruit de fond :

Le bruit de fond est dû à des faibles tensions parasites prenant naissance dans les circuits et les tubes électroniques ou transistors. Les fréquences de ces parasites peuvent prendre toutes les valeurs de la basse fréquence, elles seront partiellement éliminées par amplification d'amplitude.

D- Excellent rendement l'émetteur:

En modulation de fréquence, la puissance fournie à l'antenne est constante. De plus, le modulateur ne doit fournir aucune puissance, car il ne doit faire varier que la fréquence de la porteuse. Il s'agit donc d'un minimum de gaspillage d'énergie.

Inconvénients :

La faible portée des transmissions en FM, est due principalement au fait que l'on ne peut utiliser que des ondes ultracourtes par suite de la largeur de bande passante élevée. L'émission est donc liée aux propriétés de propagation de ces ondes, lesquelles ont une portée

Directe ou optique, d'une centaine de kilomètre. Pour transmettre à longue distance, il faudra donc utiliser des relaie.

II - Inconvénients :

Faible portée des transmissions en FM, est du principalement au fait que l'on peut utiliser que des ondes ultracourtes par suite de la largeur de bande passante élevée. Émission est donc liée aux propriétés de propagation de ces ondes, les quelles ont une portée directe ou optique, d'une centaine de kilomètre. Pour transmettre à langue distance, il faudra donc utiliser des relais.

2.11 Conclusion :

La télécommunication : comprend l'ensemble des moyens techniques l'acheminement d'information d'un point à un point à un autre .l'information peut prendre plusieurs formes : parole, image, texte, donné.....

Dans ce chapitre nous avants réalisé un système de transmission FM pour la transmission du signal.

III-1 INTRODUCTION

La transmission d'un message $m(t)$ par un canal de communication (ligne téléphonique, liaison satellite...) impose généralement la transposition du message (la bande de base) dans la bande de fréquence (bande passante) propre au canal. Cette transposition s'effectue à l'aide d'une modulation d'un signal porteur (généralement appelé porteuse) par le message $m(t)$. On distingue plusieurs types de modulation d'amplitude. Durant ce chapitre nous étudierons – la **Modulation DBSP (double bande sans porteuse)** : le signal modulé est simplement le produit du message et d'un signal porteur – **Modulation DBAP (double bande avec porteuse ou DBAP), appelé souvent C'est la modulation d'amplitude la plus courante (généralement appelée AM Par opposition à FM, fréquence modulation)**. Le principe de cette modulation est de laisser la porteuse dans le signal modulé en additionnant le message et une tension continue avant la multiplication avec le signal porteur – **Modulation BLU (bande latérale unique)** : dans ce cas, le signal modulé est un signal modulé DBSP auquel on supprime l'une des deux bandes latérales à l'aide d'un filtre passe-bande. Reporter "soigneusement" les courbes ainsi obtenues l'une en dessous de l'autre⁴. En déduire la relation entre les fréquences des harmoniques du signal DBSP, et la fréquence du message et de la porteuse d'amplitude

III-1-1 Préparation

On souhaite transmettre un message $m(t)$, dont le spectre est représenté par la figure.

III-1-2 Modulation DBSP

Déterminer l'expression du spectre du signal modulé $DBSP(f)$ pour une porteuse de fréquence f_p . Tracer le spectre du signal modulé obtenu.³ En déduire la largeur de la bande transmise, en justifiant votre réponse sur le dessin.

III-1-3 Modulation DBAP

1. Déterminer l'expression du spectre DBAP (f) du signal modulé DBAP, et tracer le (toujours en fonction du spectre de la figure (3.1.3.)).

2. En déduire la largeur de la bande transmise, en justifiant votre réponse sur le dessin.

III-1-4 Modulation BLU

Représenter graphiquement le spectre fréquentiel BLU(f) d'un signal modulé BLU aux différentes étapes de sa conception, à partir du spectre fréquentiel $M(f)$ du message de la Fig. III-1 . Calculer la largeur de la bande transmise du signal modulé BLU, et la comparer avec celle d'un signal modulé DBSP ou DBAP.)

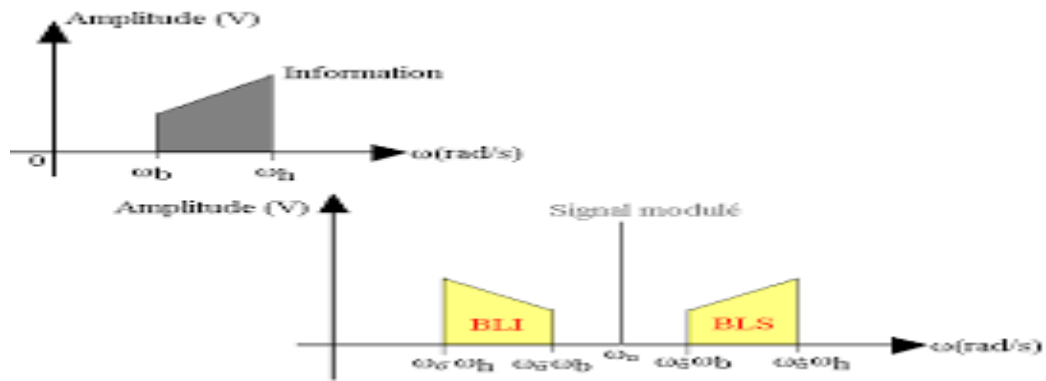


Fig. III-1 Spectre du message.

III-2 Description du matériel

III-2-1 Description de la plaquette d'AM

Dans l'étude pratique de la modulation AM, vous allez principalement utiliser la plaquette AM conçue pour aider les étudiants à comprendre les principes télécommunications matérialisé Sant des schémas fonctionnels. Un schéma fonctionnel (appelé aussi parfois schéma bloc) est une représentation simplifiée d'un système complexe.

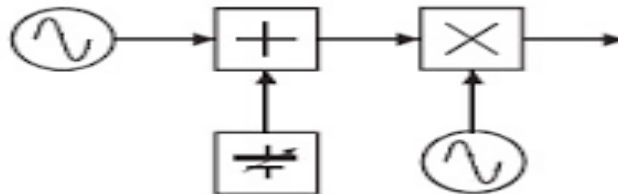


Fig. III-2 Exemple de schéma fonctionnel.

Les schémas fonctionnels permettent d'expliquer le principe de fonctionnement de systèmes électroniques (un émetteur radio par exemple) sans se préoccuper du circuit est des composants. Est doté de plusieurs blocs (ou modules) que vous pouvez relier entre eux pour former de nombreux systèmes de télécommunications. Chaque bloc effectue une tâche spécifique et est dénommée en conséquence. On trouve ainsi des additionneurs, des multiplicateurs, des oscillateurs, etc. Attention : la plaquette et ses accessoires sont chers et fragiles ! Je vous rappelle donc de manipuler tout ce matériel avec soin. Tous les modules respectent les conventions suivantes :

- Les connecteurs situés côté gauche sont utilisés pour les entrées.
 - Les connecteurs situés sur le coté droit sont utilisés pour les Sorties.
 - Les connecteurs ronds _ sont réservés aux signaux analogiques.
 - Les signaux analogiques sont généralement proches du niveau de référence de plaquette qui est de 4 V crête-à-crête.
 - Les connecteurs carrés _ produisent des signaux numériques, et sont de niveau [0 ; 5] Volts.
- Les connecteurs ronds portant l'inscription **GND** correspondent à la **masse**.

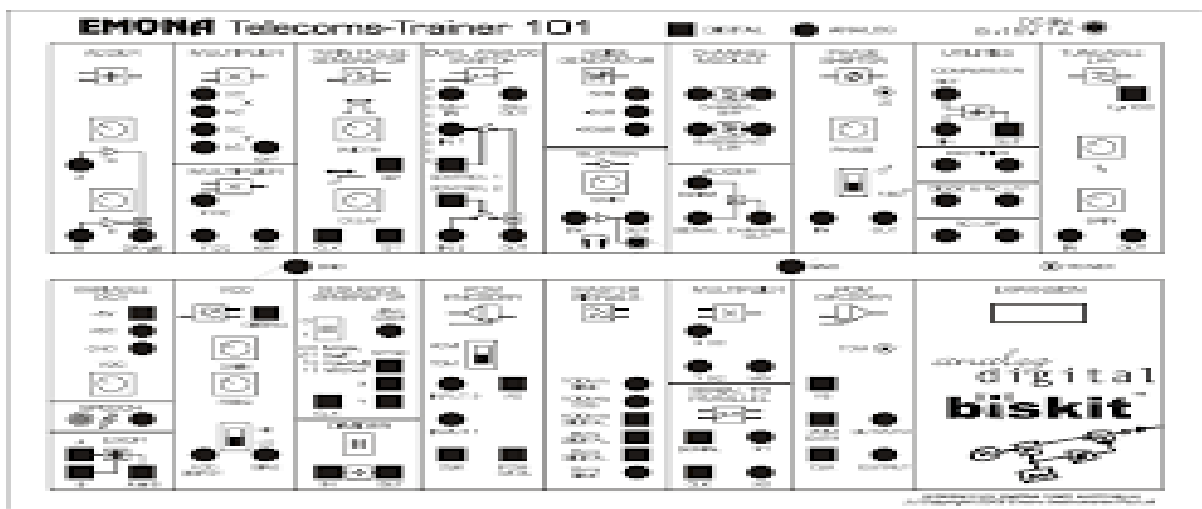


Fig. III-3 la plaquette de la modulation AM

III-3 Additionneur (ADDER) :

L'additionneur sert à additionner deux signaux en temps réel (voir figure). Deux signaux analogiques $A(t)$ et $B(t)$ peuvent être additionnés dans des proportions variables grâce aux gains G et g appliqués sur chacune des entrées (gains variant entre 0 et 2).

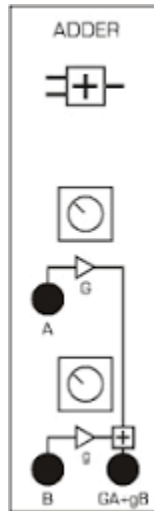


Fig. III-4 Module additionneur

III-4 Multiplicateur (MULTIPLIER) :

Le multiplicateur sert à multiplier deux signaux analogiques $X(t)$ et $Y(t)$. Le produit est affecté d'un facteur d'environ 1/2 afin de ne pas surcharger les modules suivants. Cette maquette comprend trois multiplicateurs indépendants, comme illustré figure 2.8 : les deux premiers (multiplicateurs I et II, à gauche sur la figure) sont situés l'un en dessous de l'autre dans la partie supérieure de la maquette. Le troisième multiplicateur (III) est situé sur la partie inférieure de la maquette. Le premier multiplicateur comprend des entrées couplées en CA et en CC, contrairement aux deux autres qui ont uniquement des entrées couplées en CC (les entrées CA suppriment la composante continue du signal d'entrée).

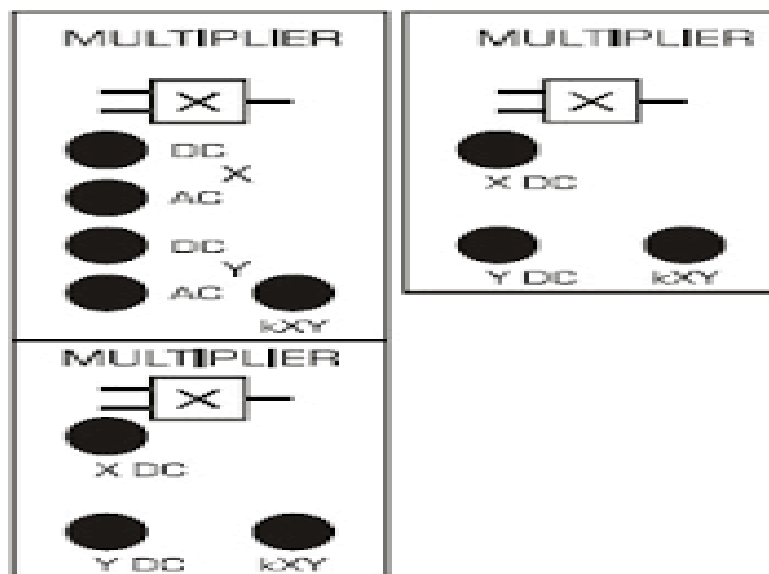
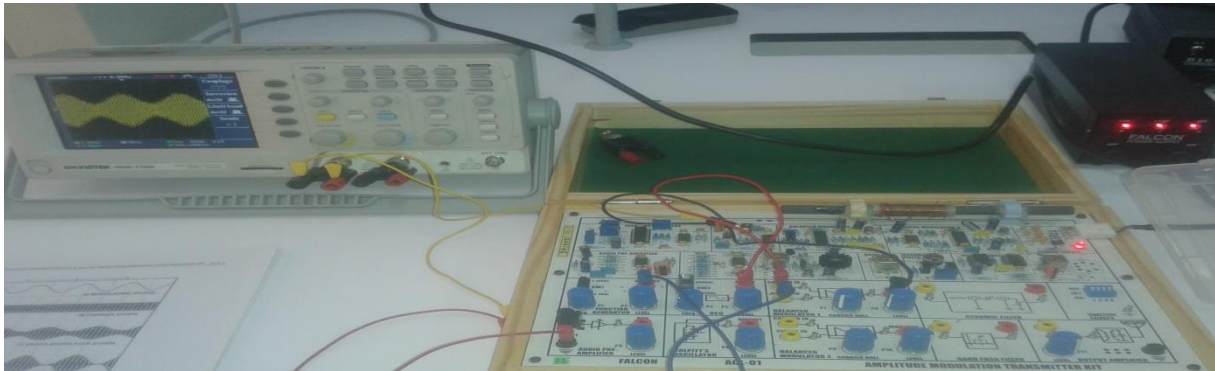


Fig. III-5 Module multiplicateur

III-5 Description de l'oscilloscope 5062DC :

Vous disposez également de l'oscilloscope 5062DC afin de visualiser et de faire des mesures sur les différents signaux étudiés. Cet oscilloscope vous permettra aussi d'étudier l'aspect fréquentiel (bande transmise, valeur de la fréquence porteuse, etc.) des afférents signaux grâce à la fonction FFT, qui permet d'afficher le spectre fréquentiel des signaux injectés aux deux voies de l'oscilloscope.



III-6 Manipulation

III-6.1 Modulation DBAP

On souhaite transmettre un message $m(t)$ de forme sinusoïdale (fréquence $2kHz$) à l'aide d'un modulateur DBAP, dont le principe général peut être défini de la manière suivante : $DBAP = (A + m(t)) \cdot \text{signal porteuse}$ où A est un signal continu, et $DBAP$ le signal modulé que l'on pourra transmettre par la suite. Analyse Temporelle.

1. On va commencer par générer le signal $A + m(t)$ en effectuant les branchements nécessaires entre les modules master signal variable, variable DCV et ADDER pour générer le signal $m(t)$, utiliser le signal 2KHZ SINE, connecté à l'entrée A de l'additionneur. – Pour générer le signal continu A , utiliser la sortie VDC, connecté à l'entrée B de l'additionneur, et régler le bouton de contrôle VDC vers la gauche quasiment jusqu'au bout.
2. Régler les boutons de contrôle des gains G et g de l'additionneur vers la gauche, c'est-à-dire à leur minimum (vers la gauche : valeur min, vers la droite : valeur max). Appelez l'enseignant pour vérifier les branchements.
3. Visualiser la sortie de l'additionneur sur la voie 1 de l'oscilloscope. Vous devriez avoir un signal nul puisque les gains g et G sont nuls.
4. On souhaite les valeurs numériques suivantes $A=1\text{Volt}$; amplitude crête à crête de

$m(t) = 1\text{Volt}$. Régler le bouton de contrôle g jusqu'à obtenir la bonne valeur pour A. Astuce : avant de faire varier g , régler l'amplitude de la voie 1 à l'échelle 500mV/div , et positionner verticalement la voie 1 au milieu de l'écran. Ne pas hésiter non plus à utiliser la fonction "mesure" de l'oscilloscope qui affiche à l'écran valeur moyenne, amplitude crête à crête, etc., de chaque voie.

5. Une fois le gain g réglé, utilisé le bouton G pour régler correctement l'amplitude crête à crête du message.

6. Connecter la sortie du multiplicateur à la voie 2 de l'oscilloscope, et régler l'affichage de cette voie à 1V/div , et l'échelle temporelle à $100\mu\text{s}$.

7. Reporter "soigneusement" les courbes ainsi obtenues l'une en dessous de l'autre sur votre rapport.

8. Faire varier maintenant le gain G en tournant le bouton vers la gauche et la droite.

9. Toujours en faisant varier G , relever sur l'oscilloscope la valeur de l'amplitude écrête à crête du message à partir de laquelle la modulation ne fonctionnera plus.

10. Reporter "soigneusement" les courbes ainsi obtenues l'une en dessous de l'autre sur votre rapport. Appelez l'enseignant pour valider.

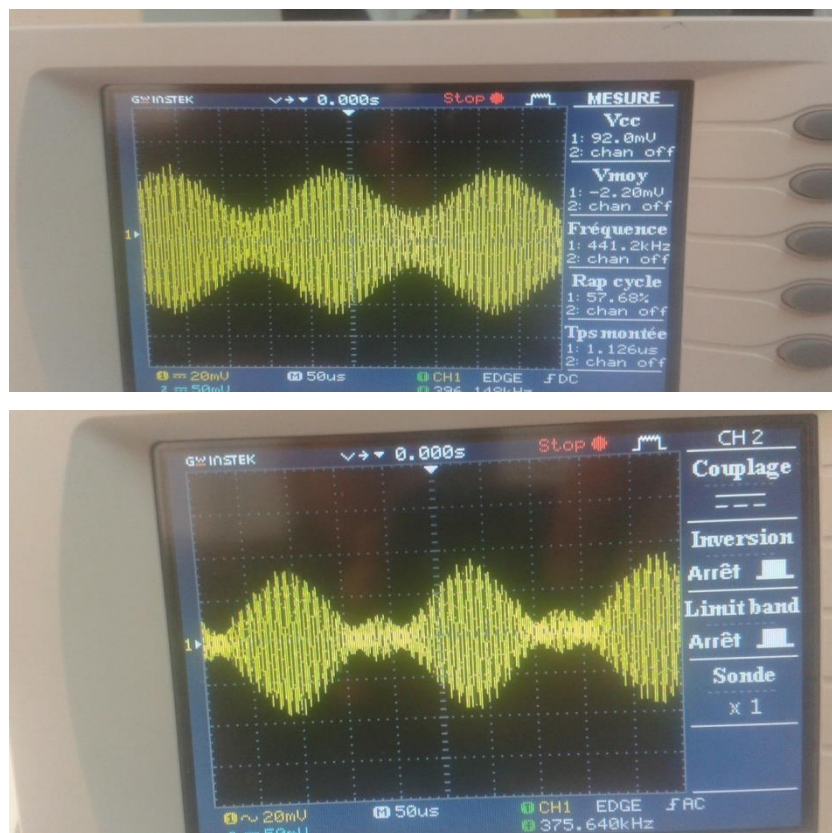


Fig. III-5 Modulation d'amplitude avec porteuse $m < 1$ et avec résidu de porteuse $m > 1$

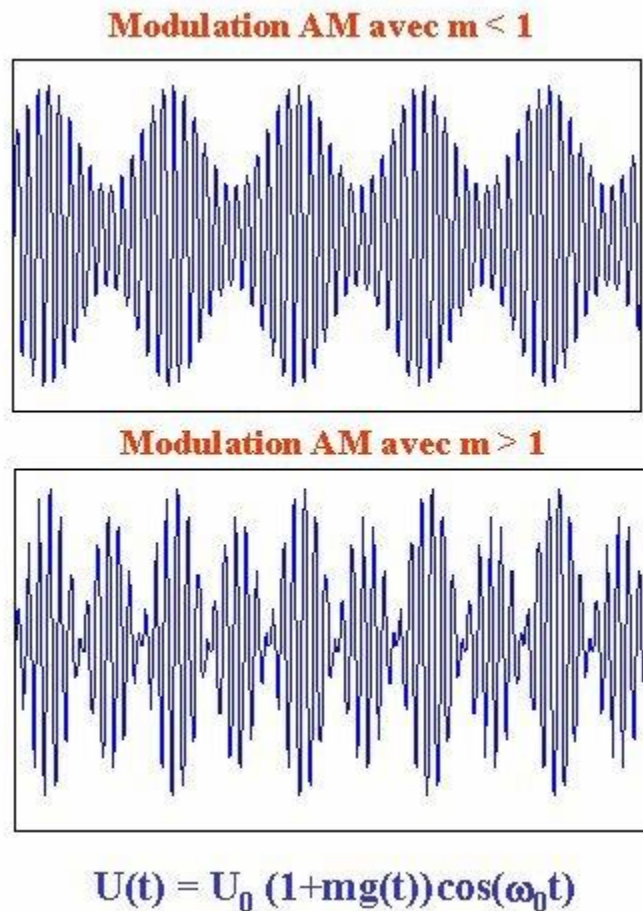


Fig. III-5 Modulation d'amplitude avec porteuse $m < 1$ et avec résidu de porteuse $m > 1$

L'étude de la stabilité autour du point A est conduite en posant : θ Correspondant à un écart autour du point A au temps $t' = 0$, l'objectif est de calculer la valeur θ_∞ prise par θ quand t tend vers l'infini en intégrant l'équation suivante :

$$\frac{d\theta}{dt} = -c[1+mg(t)]\sin\theta$$

Le déroulement du calcul est proposé en annexe A, nous ne présentons ici que les résultats obtenus. La solution finale est donc donnée par $\theta_\infty = 2\pi k$ ou bien $\varphi_\infty = \frac{\pi}{2}$ Il y a donc équilibre stable autour du point A. Par un raisonnement analogue, l'équilibre au point B est étudié en posant : $\varphi = \varphi_B + \theta = \frac{\pi}{2} + \theta$

On trouve alors comme résultat $\theta_\infty = \pi + 2\pi k$ et donc que $\varphi_A = \frac{\pi}{2}$ La conclusion de ce calcul est alors que le point A est le seul point stable de la PLL. En résumé, après un

régime transitoire, la phase φ de l'OCT se fixe à la valeur $\frac{\pi}{2}$ par rapport au signal d'entrée $u(t)$ indépendamment de ses variations d'amplitude.

III-6-2 Cas d'une modulation d'amplitude avec $m > 1$:

Le calcul s'effectue de la même façon que dans le cas précédent, il est décrit en annexe B. Dans le cas d'une modulation sans porteuse ($m=\infty$), avec signal modulant sinusoïdal de pulsation Ω , l'entrée s'écrit $U(t)=U_0 \cos (\Omega t) \cos (w_0 t)$.

On montre alors qu'il n'existe pas de solution asymptotique stable. θ_∞ Dans ce cas, il est fait appel à un double boucle à verrouillage de phase ou boucle de Costas.

III-6-3 Etude du taux de modulation

Le *taux de modulation* est une mesure intéressante pour caractériser une modulation d'amplitude. Mesurer ce taux nous permet entre autres : i) de savoir la modulation fonctionnera pour un message et une porteuse donnés (selon les fréquences et les amplitudes des signaux) ; ii) de connaître la répartition de la puissance du signal DBAP entre la porteuse et le message. Le taux de modulation μ se calcule de la manière suivante : avec v_{min} et v_{max} .

1. Régler de nouveau les gains g et G afin de retrouver le message initial (amplitude crête à crête et valeur moyenne à 1 Volt). En déduire la condition limite sur m .

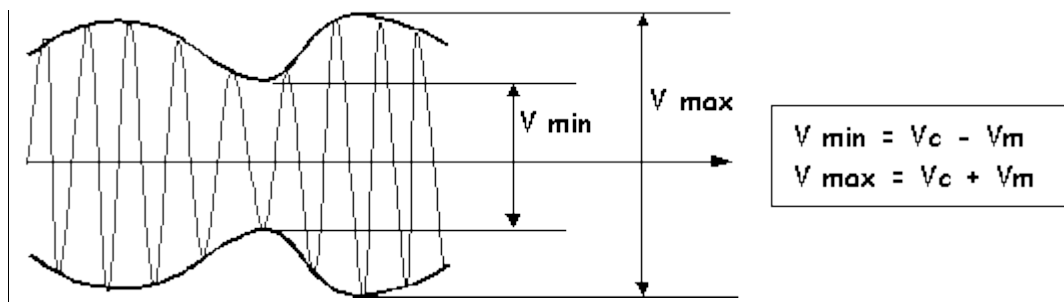


Fig. III-6 Principe du taux de modulation.

$m = \frac{V_m}{V_c} = \frac{V_{max}-V_{min}}{V_{max}+V_{min}}$ Le rapport $m = V_m / V_c$ exprimé en pourcentage est appelé "taux de modulation" (on utilise aussi le terme de profondeur de modulation ou indice de modulation). La figure suivante montre l'allure du signal modulé pour différentes valeurs de m .

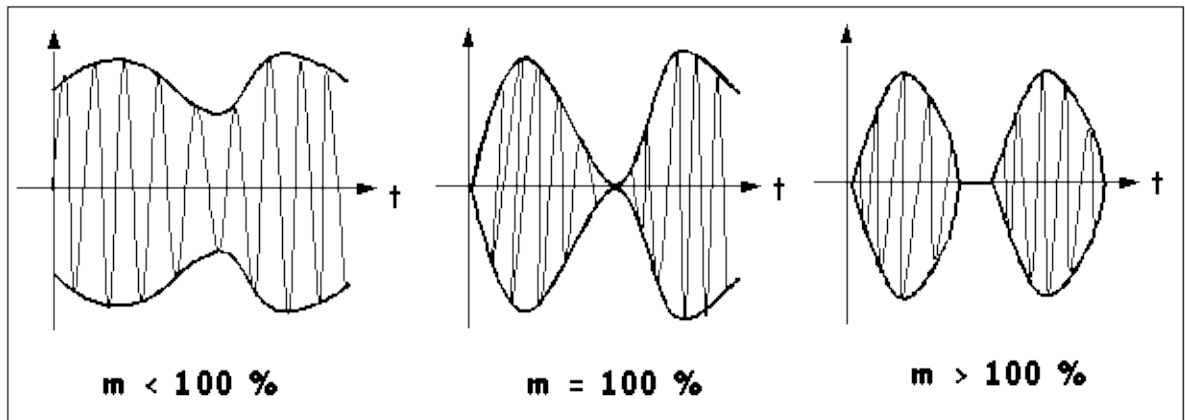


Fig. III-7 Le taux de modulation $m < 100\%$, $m=100\%$, $m > 100\%$

Un taux de modulation voisin de 100 % cause de la la distorsion (ou déformation) du signal au voisinage du creux de modulation. Si m est supérieur à 100 %, il y a sur modulation. Il apparaît “des coupures” dans le signal, ce qui se traduit par des déformations importantes. Ceci se produit lorsque l’amplitude du signal modulant est supérieure à l’amplitude de la porteuse | signal modulant sinusoïdal : si le signal modulant est sinusoïdal, le signal modulé en amplitude est en fait la superposition de trois ondes sinusoïdales pures : La première d’amplitude V_c est l’onde porteuse originelle; La deuxième d’amplitude $m V_c/2$, de fréquence $F_C - F_m$ est l’onde latérale inférieure; La troisième d’amplitude $m V_c/2$, de fréquence $F_C + F_m$ est l’onde latérale supérieure.

III-6-4 Analyse fréquentielle :

On souhaite maintenant étudier les caractéristiques fréquentielles du signal modulé DBAP. Pour cela, on va utiliser la fonction FFT de l’oscilloscope.

1. Utiliser la fonction FFT (voir instruction ci-dessous) afin d’afficher correctement le Spectre fréquentiel du signal DBAP. Fonctionnement de la fonction FFT :
 - vérifier que le message est bien sur la voie 1, et le signal DBAP sur la voie 2.
 - Appuyer sur la commande "Math" de l’oscilloscope. Le menu correspondant apparaît sur la partie droite de l’écran.
 - Sélectionner le mode FFT en appuyant sur F1 le nombre de fois nécessaire.
 - Sélectionner la voie que vous souhaitez analyser grâce au bouton F2.
 - Régler F4 et F5 afin d’avoir une bonne représentation spectrale du signal modulé.
2. Dessiner le spectre théorique sur votre rapport.

3. En utilisant les curseurs, relever la fréquence des différentes harmoniques composant ce signal DBAP.
4. En déduire la relation entre la fréquence de chaque harmonique du signal DBAP, et la fréquence du message et de la porteuse.
5. En déduire la largeur de bande transmise.
6. Déterminer les 2 caractéristiques de ce spectre qui nous permettent d'affirmer.
7. faites maintenant varier le gain G .

III-7 Modulation DBSP :

On souhaite maintenant transmettre le même message que dans la section précédente à l'aide d'une modulation DBSP, dont le signal modulé peut être défini de manière suivante : $DBSP = m(t) _ \text{signal porteuse}$.

Analyse temporelle

En utilisant le module MULTIPLIER I (utiliser les entrées AC), effectuer le branchement nécessaire pour effectuer une modulation DBSP de ce message à la fréquence porteuse $100kHz$. **Appelez l'enseignant pour vérifier les branchements.**

1. Visualiser sur la voie 1 le message, et sur la voie 2 le signal DBSP. Ajuster l'axe temporel afin de visualiser
2 motifs du message. Régler l'oscilloscope afin d'avoir une graduation de $1V/div$ pour le message, et $2V/div$ pour le signal DBSP.
3. Reporter "soigneusement" les courbes ainsi obtenues l'une en dessous de l'autre sur votre rapport. Appelez l'enseignant pour valider les résultats.
4. En déduire la relation entre les fréquences des harmoniques du signal DBSP, et la fréquence du message et de la porteuse. D'amplitude
5. Relever la largeur de bande transmise.
6. Déterminer les 2 caractéristiques de ce spectre qui nous permettent d'affirmer que nous avons un signal DBSP et non pas DBAP

III-8 Modulation BLU

Discriminateur de phase :

On va maintenant étudier la modulation BLU. On a vu en cours que cette modulation en Peut se faire en deux étapes : multiplication du message par la porteuse, suivi d'un filtre passe-bande pour supprimer l'une des deux bandes latérales du signal transposé L'inconvénient de cette méthode est que la mise en œuvre du filtre passe-bande est généralement problématique. En pratique on préfère donc utiliser ce que l'on appelle un Discriminateur de phase.

Le principe d'un discriminateur de phase, est d'additionner deux signaux modulés DBSP de même amplitude déphasés l'un par rapport à l'autre.

Le bon fonctionnement de ce système dépend de la valeur du déphasage introduit Selon la valeur de ce déphasage, l'addition des deux signaux modulés DBSP enrichira les deux bandes latérales (en les "superposant") ou au contraire annulera l'une des deux bandes latérales (en les "soustrayant"). C'est évidemment ce deuxième cas qui nous intéressera pour limiter l'une des deux bandes latérales pour obtenir une modulation BLU. En utilisant le module PHASE SHIFTER (position 180° , bouton de réglage placé au milieu), effectuer les branchements nécessaires pour visualiser sur la voir

1. Le message original $m(t)$ (toujours le même signal sinusoïdal de 2kHz), et sur la voie le message déphasé $md(t)$ (voir figure 2.11). Vérifier sur l'oscilloscope que ces deux signaux sont bien déphasés.

2. En utilisant le module MULTIPLIER I et le signal sinusoïdal Sine 100kHz comme signal porteur, effectuer les branchements pour générer le premier signal modulé

DBSP noté DBSP A sur la figure 2.11. Vérifier que cela fonctionne en utilisant l'oscilloscope.

3. En utilisant le module multiplier2 et le signal sinusoïdal Cos 100kHz (le déphasage entre les deux porteuses est donc implicitement de $\pi/2$), effectuer les branchements pour générer le deuxième signal modulé DBSP déphasé noté *DBSP B*.11. Vérifier aussi que cette modulation fonctionne bien en utilisant L'oscilloscope.

4. Effectuer maintenant les branchements nécessaires à l'aide du module ADDER

Pour générer le signal modulé BLU (le signal *DBSPA* doit être relié à l'entrée A de B l'additionneur pour que la suite de la manipulation fonctionne). Régler les deux gains G et g

de l'additionneur à mi-chemin, et visualiser le message original sur la voie 1 et le signal modulé BLU sur la voie 2. Appelez l'enseignant pour valider les branchements.

5. Visualiser sur l'oscilloscope le signal modulé BLU ainsi obtenu, ainsi que son Spectre fréquentiel.

6. On va maintenant régler plus précisément les gains G et g . Pour cela, réduire au minimum le gain G , et régler le gain g afin d'obtenir une amplitude crête-à-crête 4 volts en sortie de l'additionneur.

7. On va régler maintenant le gain G . Pour cela, débrancher le câble qui est connecté à la sortie B de l'additionneur. Régler ensuite le gain G afin d'obtenir une amplitude crête-à-crête de 4 volts en sortie de l'additionneur. Une fois ces réglages effectués, Vous devez avoir à peu près le même gain sur les deux entrées A et B de l'additionneur.

Vous pouvez donc reconnecter le câble que vous avez précédemment débranché sur l'entrée B.

8. Faire varier la valeur du déphasage vers la gauche et la droite, et observer l'effet sur le spectre fréquentiel du signal en sortie de l'additionneur. Expliquer le phénomène sur votre copie en vous aidant éventuellement d'un graphe.

9. Régler maintenant le déphasage pour obtenir un véritable signal modulé BL

10. Déterminer finalement la valeur du déphasage permettant d'obtenir une bonne modulation BLU.

11. En vous aidant des manipulations effectuées.

12. Pensez à débrancher tous les fils et à éteindre la plaquette et l'oscilloscope partir.

III-9 Conclusion :

Dans la partie théorique nous avons défini les différents étages qui composent les émetteurs et les récepteurs AM tandis que la partie pratique nous avons essayé de détailler ces étages par la définition des composantes de ces étages de deux blocs.

IV-1 INTRODUCTION :

Nous avons vu l'étude pratique la modulation AM repose sur la modification de l'amplitude de la porteuse sans modification de la fréquence. Une autre forme de modulation consiste à garder l'amplitude de la porteuse constante mais à faire varier sa fréquence. Notion de fréquence et de phase instantanée Considérons les signaux sinusoïdaux :

$$r(t) = A_s \times \cos(\omega t) \text{ et } s(t) = A_s \times \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.4)$$

Supposons que ω et φ soient constants dans le temps. Le déphasage de $s(t)$ par rapport à $r(t)$ est constant et les deux signaux sont caractérisés par une fréquence identique. Si φ est variable avec le temps, le déphasage entre $s(t)$ et $r(t)$ varie dans le temps. Ce changement de phase se traduit également par un changement de fréquence du signal $s(t)$ car pour passer d'une phase φ à $\varphi + d\varphi$ en un temps dt , il est nécessaire que la pulsation du signal varie. On appelle alors pulsation instantanée la grandeur : $\omega_i = \frac{d}{dt}(\omega t + \varphi)$ encore $f_i = \frac{\omega}{2\pi} + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt}$ Introduction

La porteuse voit sa pulsation $\omega = 2\pi f$ modulée de $\omega_0 - \Delta\omega$ à $\omega_0 + \Delta\omega$ par un signal de

Basse fréquence de pulsation $\Omega = 2\pi f$: $\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t = \frac{d\varphi}{dt}$

L'équation du signal est donc : $v = a \cos(\omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t)$ est l'excursion en pulsation qui est en général proportionnelle à l'amplitude du signal basse fréquence.

Spectre d'un signal modulé en fréquence :

Contrairement à la modulation d'amplitude, le spectre contient une infinie de raies. Néanmoins,

ces raies n'ont une amplitude importante que dans un certain intervalle de pulsation $\omega_0 - \Delta\omega \leq \omega \leq \omega_0 + \Delta\omega$. Cet intervalle est appelé usuellement bande de Carson (cf Neffati). (Il correspond à environ

98% de l'énergie du signal). On se propose de vérifier cette règle. Utiliser un GBF modulable en fréquence règle sur une porteuse de l'ordre de 10 kHz (f_0). Le signal basse fréquence (F) sinusoïdal est délivré par un autre GBF et injecté sur l'entrée Modulation du premier. Mesurer l'excursion en fréquence en procédant de la façon suivante : on voit sur l'écran une sinusoïdale dont la période varie de T_{\min} à T_{\max} , en déduire f_{\min} et f_{\max} , d'où $\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi}$

Analyser ensuite le spectre du signal modulé en fréquence avec l'oscilloscope numérique et vérifier approximativement la règle de Carson grâce à l'échelle verticale de l'oscilloscope. La détermination

De la bande de Carson nécessite un critère, choisir par exemple -20 dB. On pourra étudier les quatre cas suivants :

Cas1 : $\Delta f = 1\text{KHz}$, $f=1\text{KHz}$

Cas2 : $\Delta f = 0.1\text{KHz}$, $f = 1\text{KHz}$

Cas3 : $\Delta f = 1\text{KHz}$, $F=1\text{KHz}$

Moisira présente un signal triangle, puis carré et observe à nouveau la bande de Carson. En émission radio (100 MHz) : Celle-ci est obtenue en modifiant les caractéristiques d'un circuit oscillant par action du signal BF sur une capacité variable (diode vari cap) ou sur une self variable (noyau de ferrite saturée) ; en pratique l'excursion en fréquence est très faible, ce qui la rend inobservable à l'oscilloscope. Ceci nous semble difficilement réalisable dans le cadre

de l'agrégation. Les générateurs de fonctions actuels (vobulateurs) : Ils fonctionnent sur un principe totalement différent :

– un générateur à relaxation produit des signaux triangulaires d'amplitude bien constante mais de fréquence variable.

– ces signaux sont envoyés dans un circuit non linéaire qui les transforme en sinusoides.

IV-2 Modulateur de fréquence

a. Oscillateur commandé en tension

Réaliser une modulation de fréquence d'une porteuse $p(t)$ par une modulante $x(t)$ revient à réaliser une conversion tension-fréquence entre la tension $x(t)$ et la fréquence instantanée $f_i(t)$ du signal modulé $s(t)$. On peut donc naturellement penser à utiliser les montages réalisant cette conversion, c'est-à-dire. Les oscillateurs contrôlés en tension VCO (*Voltage Controlled Oscillator*). Rappelons que nous considérons uniquement dans ce cours le cas de signaux porteurs sinusoidaux. Le VCO à mettre en œuvre est donc un oscillateur dit "quasi-sinusoidal" ou oscillateur harmonique. Le principe du modulateur est de faire varier la fréquence d'un oscillateur harmonique le plus linéairement possible avec la tension modulante. Un oscillateur harmonique correspond à un système bouclé avec rétroaction, constitué par un élément amplificateur (non linéaire) dans le bloc d'action et d'un filtre sélectif dans le bloc de réaction. Ce filtre a pour rôle d'éliminer les fréquences autres que la fréquence d'oscillation désirée, en fait les harmoniques de celle-ci (voir le cours d'EA). Cette cellule est en général formée par des composants passifs

réactifs, inductances et/ou capacités, comme par exemple dans les oscillateurs copistes. La valeur de la fréquence d'oscillation f_{osc} est fixée par les éléments constituant le filtre sélectif. Ainsi dans l'oscillateur de Copistes on a :

$$f_{osc} = \sqrt{\frac{1}{L \frac{c+n}{cc}}}$$

Où n est proche de 0,5. Si l'on insère un tel élément dans un oscillateur tel que l'oscillateur de clopets, on peut faire varier la fréquence d'oscillation f_{osc} par la tension inverse appliquée. Cependant, la loi de commande $f_{osc}(VR)$ n'est généralement pas linéaire. Elle est en revanche intarissable pour une faible plage de variation de VR (possibilité de effectuer des développements limités dans ce cas pour les expressions on a alors une faible plage de variation Δf de la fréquence f_{osc} , autour d'une fréquence f_0 dite fréquence centrale du VCO, avec $\Delta f \ll f_0$ et Δf variant linéairement avec le signal placé en entrée du VCO. Il est également nécessaire d'isoler la partie du circuit oscillant à haute fréquence de celle correspondant à la polarisation de l'élément réactif contrôlable. Dans le cas d'une diode vari cap, on réalise généralement un montage similaire à celui schématisé sur la Sur ce montage, est une très grande capacité, équivalente à un court-circuit pour les fréquences voisines de f_0 et à un circuit ouvert pour les basses fréquences. La "self de choc" LC est une inductance de grande valeur avec un noyau de ferrite) correspondant à une impédance très grande pour f_0 et à un court-circuit pour les basses fréquences. L'utilisation des VCO pose cependant un problème : la fréquence d'oscillation tend à dériver avec la température, les tensions d'alimentation, de polarisation, *etc...* Pour pallier cet inconvénient, on peut envisager l'emploi d'oscillateurs très stables comme les oscillateurs à quartz mais dans ce cas la plage de contrôle possible de la fréquence d'oscillation (par vari cap) est très réduite : la pente dans la plage de linéarité de la caractéristique d'un VCO à quartz est typiquement de 2 kHz/V. On peut cependant augmenter l'excursion en fréquence et donc l'indice de modulation en utilisant un multiplicateur de fréquence. Dans ce cas comme dans le cas des oscillateurs évoqués précédemment, on peut également modifier la fréquence porteuse par mélange avec un signal sinusoïdal provenant d'un oscillateur local. La Figure illustre un exemple d'un montage à VCO à quartz et changements de l'indice de modulation et de la fréquence porteuse par multiplication et mélange. b. Régulation de fréquence porteuse la figure représente le schéma de principe d'un circuit modulateur de fréquence avec régulation de la porteuse. Il comprend un oscillateur à quartz, une boucle PLL formée par un comparateur de phase, un filtre $F(p)$ (passe-bas du premier ordre par exemple), un VCO, ainsi qu'un additionneur inséré dans la PLL. Le principe de ce montage est que si on dimensionne bien la boucle, c'est-à-dire si son temps de réaction est faible vis-à-vis des variations rapides de $x(t)$, la

Fréquence instantanée du signal de sortie du VCO est imposée par $x(t)$, mais sa valeur moyenne est imposée par la fréquence f_0 "pilote" d'oscillation du quartz. Cette valeur moyenne est ainsi d'une grande stabilité. Pour comprendre plus en détail le fonctionnement de ce montage, on peut faire quelques calculs dans le cas où la boucle PLL est accrochée, en modélisant sous forme du schéma bloc linéaire le montage. Pour cela, nous supposons que le comparateur de phase est constitué par un simple "ou exclusif" fournissant après filtrage par $F(p)$ un signal VD proportionnel à la différence de phase entre le signal d'entrée $p(t)$ et celui s VCO(t) délivré par le VCO. On note k_0 la constante de proportionnalité entre VD et s . On considère de plus que le VCO délivre une tension VCO dont la fréquence fondamentale f VCO est de la forme $f_0 + kv_m$ où kv s'exprime en Hz/V.

IV-3 Oscillateur commandé en tensions vco

IV-1-1. Définition :

La VCO est un oscillateur qui délivre à sa sortie un signal sinusoïdale de fréquence variable en fonction du signal de la commande (*modulante*) Stabilité des oscillateurs : Dans une station de radiodiffusion ou de télévision typique, la fréquence porteuse est générée par un oscillateur à quartz rigoureusement contrôlé. La méthode fondamentale de réglage des fréquences utilise, dans le plupart des montages radio électriques, des circuits, des circuits résonnants ou accordés, présentant des valeurs spécifiques d'inductance et de capacité. Dans le cas où l'on veut s'assurer une fréquence extrêmement stable, un circuit de quartz ayant une fréquence naturelle propre d'oscillation électrique sert à stabiliser la fréquence. Le quartz est surtout utile dans les domaines de la très basse et moyenne fréquence.

IV-4 Préaccentuation - désaccentuation en FM :

On a vu dans le cas particulier des modulations FM à faible indice de modulation (section que les composantes de fréquences les plus élevées apparaissant dans la bande de base du signal modulant $x(t)$ (soit f proche de F_m) voient la puissance qu'elles contiennent diminuer lors de la modulation. On peut donc penser que ces composantes sont plus affectées par le bruit, ce qui pose problème vis-à-vis de la récupération de l'information $x(t)$ d'origine à la démodulation. Ce résultat est généralisable au cas d'un indice de modulation quelconque (ce problème sera évoqué plus en détail dans la partie "modulation et bruit"). Afin de pallier cet inconvénient de la modulation FM, on réalise dans la chaîne d'émission une opération de "préaccentuation" : le signal $x(t)$ est filtré par un filtre "préaccentuation" avant modulation afin d'amplifier ses composantes "hautes fréquences" par rapport à celle des "basses fréquences". A la réception l'opération inverse est évidemment

nécessaire pour retrouver le spectre d'origine : après démodulation, le signal reçu est filtré par un filtre "désaccentuation" de caractéristiques "complémentaires" à celles du filtre préaccentuation

IV-5 Propriété remarquables d'un spectre FM :

a) si la fréquence de l'onde modulante reste constante, et que l'expression en fréquence augmente alors le nombre de raies augmente (figure (4.5.1))

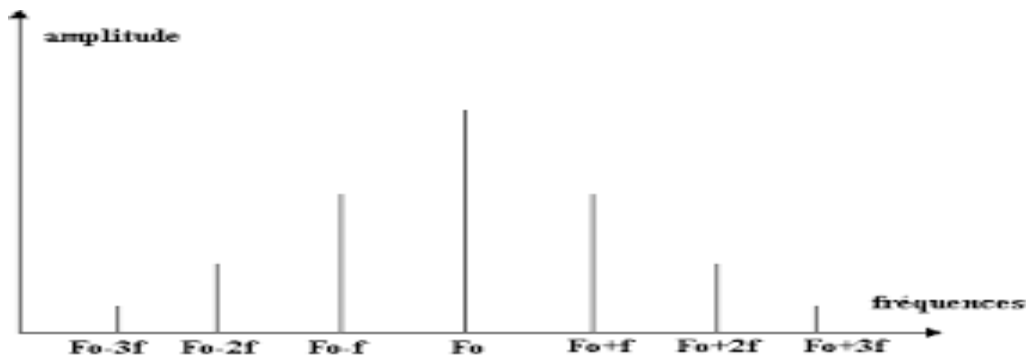


Fig. IV-1 le spectre FM

L'amplitude d'un signal modulé en amplitude est souvent modifiée par les parasites dus essentiellement aux interférences avec les autres stations émettrices. On a cherché alors à moduler la fréquence du signal en laissant son amplitude constante : c'est la modulation de fréquence. La modulation de fréquence présente un autre avantage : sa puissance d'émission reste constante.

IV-6 Un peu de théorie :

Tout signal modulé peut se mettre sous la forme: $s(t) = S(t) \cdot \cos(\varphi(t))$ (4.2)

- $S(t)$ est l'amplitude instantanée

- $\varphi(t)$ est la phase instantanée. Par définition la pulsation instantanée est

$$\Omega(t) = \frac{d\varphi}{dt} = \int \Omega(t) = \Omega_0 + \varphi(t) \quad (4.3)$$

$\Omega_0 = 2\pi \cdot f_0 = \text{cte}$; pulsation du signal porteur.

Le signal modulé s'écrit: $s(t) = S(t) \cos(\Omega_0 t + \varphi(t))$ (4.4)

Ou bien $S(t)$ est une fonction du temps et φ est constant c'est la modulation d'amplitude.

Ou bien $S(t)$ est constante et $\varphi(t)$ fonction du temps, il existe alors 2 possibilités:

$\varphi(t) = k \cdot u(t)$, $u(t)$ étant le signal modulant. On parlera de modulation de phase (qu'on n'étudiera pas ici). Ou $d(\varphi(t))/dt = k' \cdot u(t)$. On parlera de modulation de fréquence. Dans le cas de la modulation de fréquence ET lorsque le signal modulant est sinusoïdal $s(t)$ est en définitive de la

Chapitre IV

Etude pratique de la modulation FM

forme : $s(t) = A_o \cdot \cos (\Omega_0 \cdot t + m \sin \omega t) = A_o \cos(2 \cdot \pi \cdot F_o \cdot t + m \cdot \sin 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$ (4.5) f est la fréquence du signal utile. F_o est la fréquence du signal porteur. M est l'indice de modulation = $\Delta f / f$ et ΔF est appelé excursion en fréquence. Dans le cas de la modulation de fréquence ET lorsque le signal modulant est sinusoïdal $s(t)$ est en définitive de la forme :

Exemple : Soit le signal FM $s(t) = 120 \cos (6 \cdot 10^8 t + 5 \sin 1250t)$; on aura

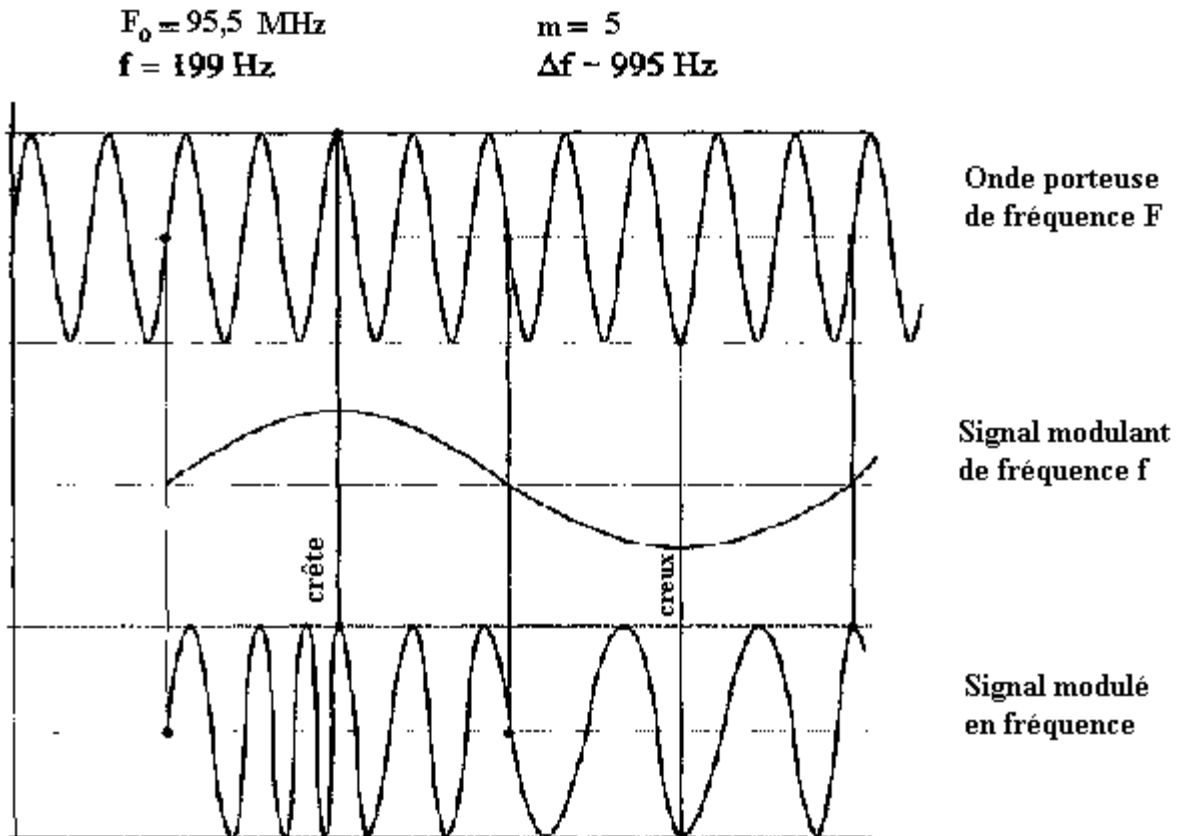


Fig IV-2 Signal modulant de fréquence FM

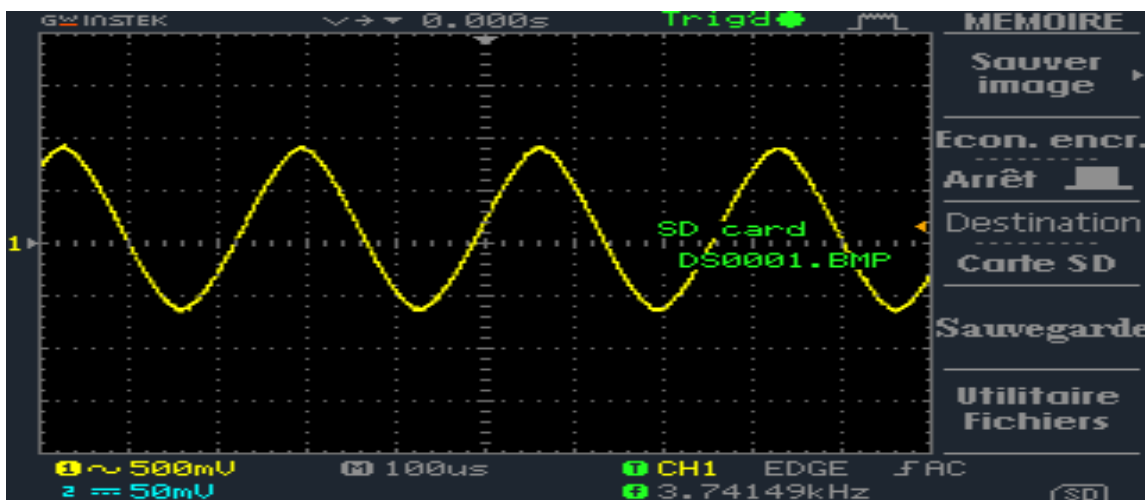
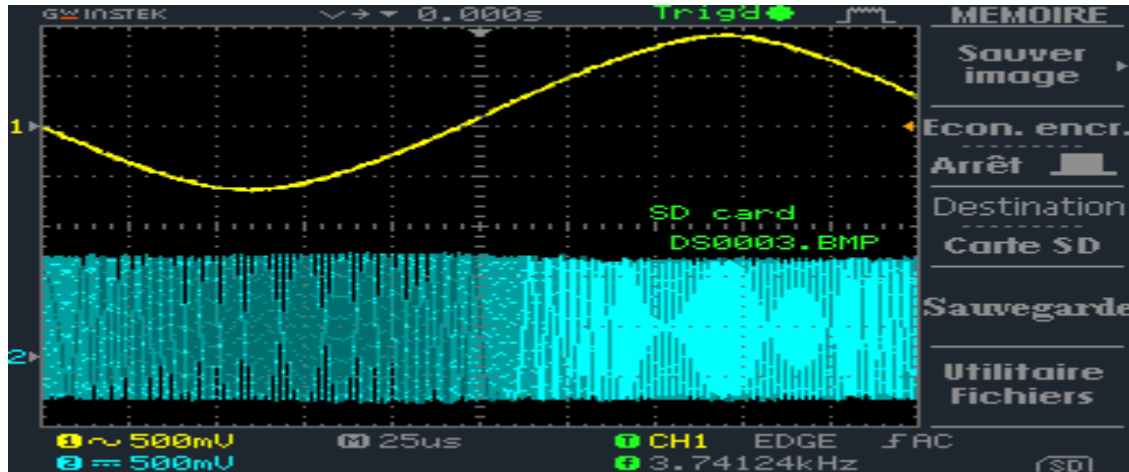


Fig. IV-3 Onde porteuse de fréquence

IV-7 Conclusion :

Dans ce chapitre on utilise pratiquement de la modulation FM pour cela nous avons réalisé un amplificateur : pour amplifier le signal à transmettre issu du microphone ; oscillateur : pour générer la porteuse et le modulateur FM : pour faire mélanger les deux signaux (modulant et porteur) afin de pouvoir transmettre le signal modulé. Vient l'antenne émettrice.

Simulation de la modulation AM

I- Introduction

Matlab est un langage de haut niveau et de communication avec l'atmosphère pour le calcul mathématique, la visualisation et la programmation. MATLAB signifie MAT rix LAB oratoire et a été inventé par math Works. La grande disponibilité des fonctions encastrables vous permettent de trouver des solutions plus rapidement, développer facilement GUI par rapport à la feuille de calcul ou d'autres langages de programmation.

À partir de 2004 il y avait une forte augmentation des utilisateurs de MATLAB à travers le monde. L'une des principales raisons pour cela est rien, mais le large soutien d'arrière-plan de matlab tels que les utilisateurs proviennent de différents domaines tels que l'ingénierie, des sciences et de l'économie. Matlab est généralement utilisé dans les institutions hypothétiques et de recherche ainsi que des entreprises industrielles. Applications de couverture MATLAB traitement du signal et des communications, l'image et le traitement vidéo, les systèmes de contrôle, de test et de mesure, finance computationnelle, et la biologie computationnelle.

4.8.1. La modulation d'amplitude dans Matlab :

Comment générer une modulation d'amplitude (AM) en utilisant MATLAB? AM est un procédé de transmission de signaux, tels que du son ou des informations numériques, dans lequel l'amplitude de l'onde porteuse est modifiée en fonction du signal de message. AM est largement utilisé dans le domaine de la communication électronique. Le tracé du signal AM en utilisant MATLAB est très facile. Ici, nous ajoutons simplement l'amplitude de porteuse avec un signal de message pour obtenir le signal AM, puis l'amplitude instantanée du transporteur obtient modifié par rapport au signal de modulation. Ainsi, l'amplitude de la porteuse varie en fonction du signal de bande de base (signal de message). Le code MATLAB est illustré ci - dessous, les utilisations de code particulier est également donnée sous forme de commentaires (% de champ de commentaire). Le programme est capable d'accepter deux fréquences d'entrée et l'indice de modulation à partir du clavier.

4.8.2. Représentation mathématique de 'AM'

Si le signal de message est représenté par,

$$S_m = A \sin(2\pi f_m t)$$

et le signal porteur par,

$$S_c = A \sin(2\pi f_c t)$$

L'équation de la modulation d'amplitude est donnée par,

$$S_{fm} = [A + m_i S_m] \sin(2\pi f_c t)$$

Où ' m_i ' est l'indice de modulation et ' A ' est l'amplitude

4.8.3. Programme en matlab AM

```
clear all;
close all;
t=0:0.001:1;
set(0,'defaultlinelength',2);
A=5;%Amplitude of signal
fm=input('Message frequency=');%Accepting input value
fc=input('Carrier frequency=');%Accepting input value (f2>f1)
mi=input('Modulation Index=');%Modulation Index
Sm=A*sin(2*pi*fm*t);%Message Signal
subplot(3,1,1);%Plotting frame divided in to 3 rows and this fig
appear at 1st
plot(t,Sm);
xlabel('Time');
ylabel('Amplitude');
title('Message Signal');
grid on;
Sc=A*sin(2*pi*fc*t);%Carrier Signal
subplot(3,1,2);
plot(t,Sc);
xlabel('Time');
ylabel('Amplitude');
title('Carrier Signal');
grid on;
Sfm=(A+mi*Sm).*sin(2*pi*fc*t);%AM Signal, Amplitude of Carrier
changes to (A+Message)
subplot(3,1,3);
plot(t,Sfm);
xlabel('Time');
ylabel('Amplitude');
title('AM Signal');
grid on[cc];
```

Simulation de la modulation AM

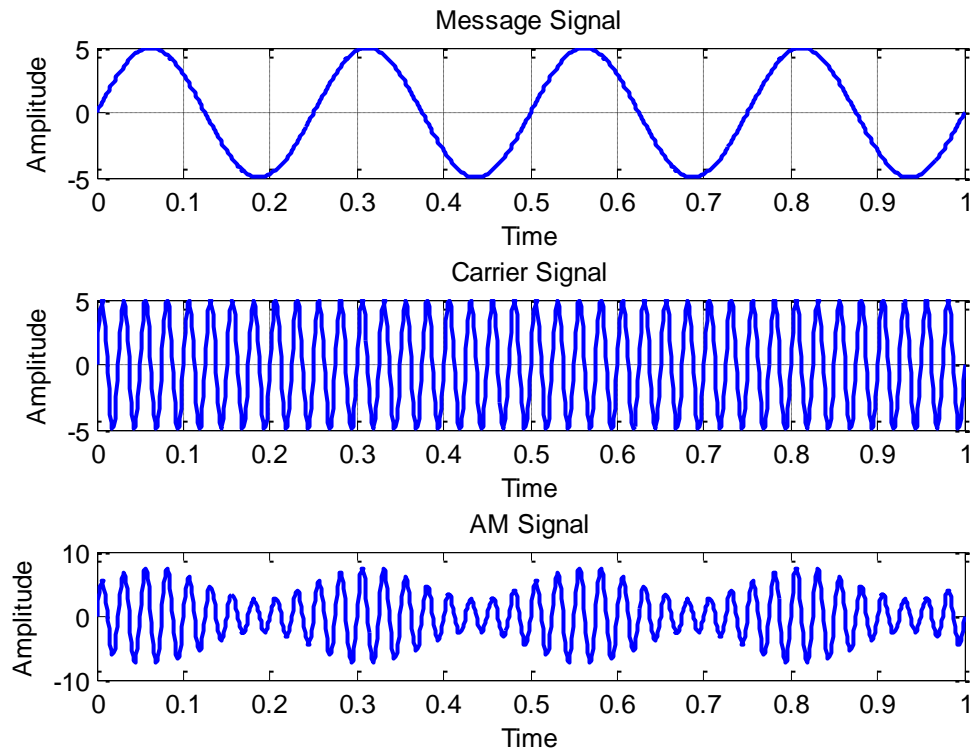
```
ylabel ('Amplitude');  
titre ('Carrier signal');  
grille;  
Sfm = (A + mi * Sm) * sin (2 * pi * fc * t);% AM signal, amplitude  
du transporteur change à (A + message)  
subplot (3,1,3);  
parcalle (t, SFM);  
xlabel ('Time');  
ylabel ('amplitude'); le  
titre ('AM signal');  
grille ['/ ' cc];
```

Signal AM généré

Message Fréquence = 4

Fréquence porteuse = 386 khz

Indice de modulation = 0.5



4.5.3. La modulation d'amplitude à 100%

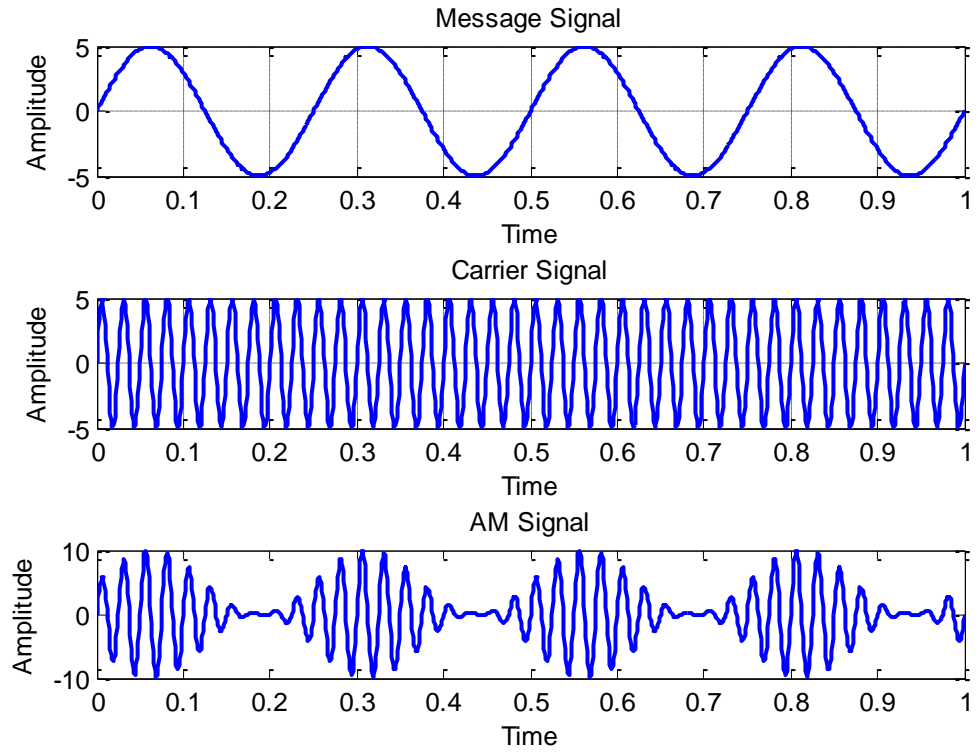
Simulation de la modulation AM

Signal AM Généré

Message Fréquence = 4

Fréquence porteuse = 400 khz

Indice de modulation = 1



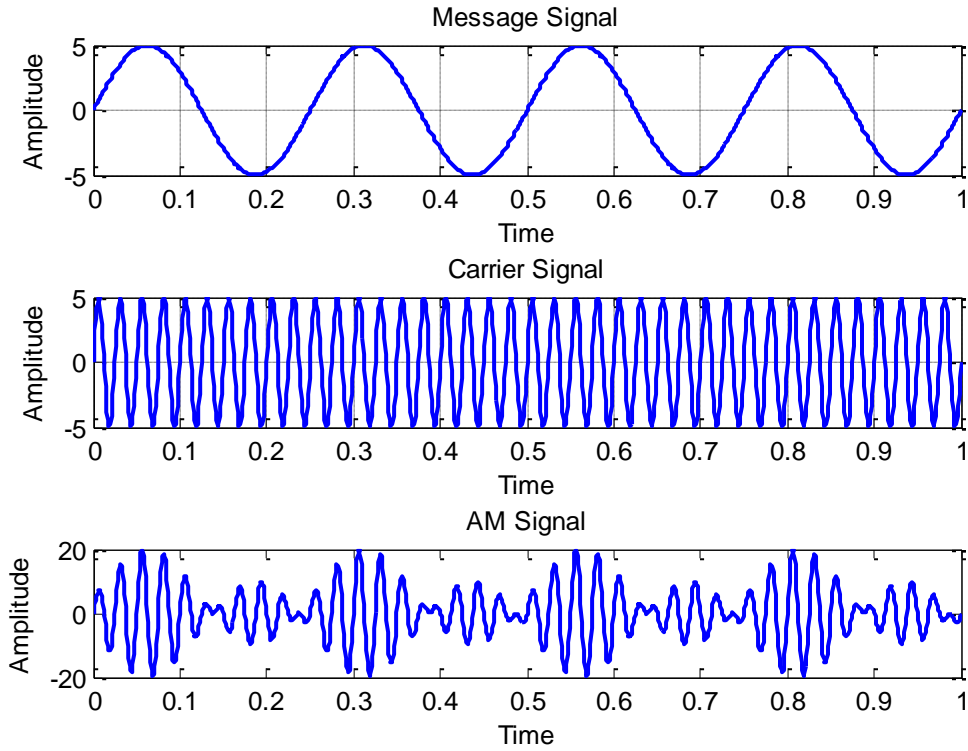
Simulation de la modulation AM

Signal AM Généré

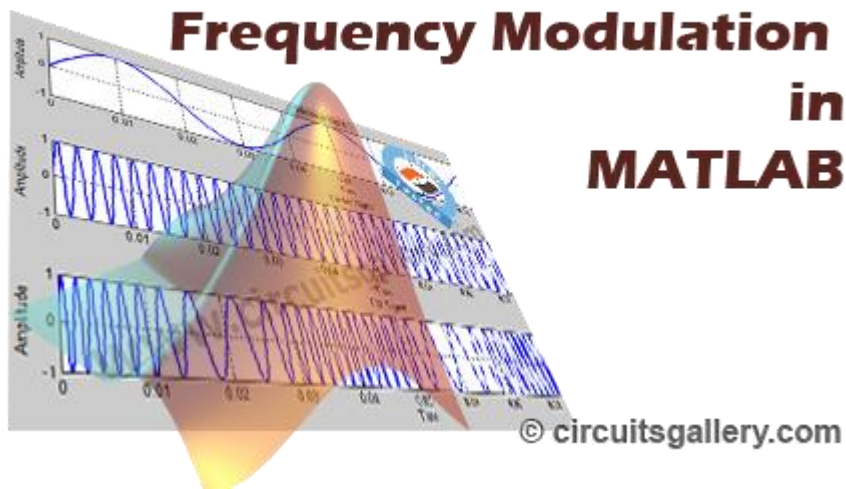
Message Fréquence = 4

Fréquence porteuse = 396 khz

Indice de modulation = 3



LA MODULATION DE FREQUENCE (FM) DANS MATLAB



Comment générer une modulation de fréquence (FM) dans MATLAB ? Avant que nous devons savoir ce qui est FM (modulation de fréquence). En modulation de fréquence, la fréquence du signal de porteuse ayant la fréquence élevée varie en fonction de l'amplitude instantanée du signal de modulation ayant une faible fréquence. Les signaux de fréquence modulée sont largement utilisés dans les systèmes de transmission radio et de télévision. Les signaux FM peuvent être facilement tracés à l'aide des fonctions de MATLAB simples. Le code MATLAB est illustré ci - dessous, l'utilisation de code particulier est également donné que la forme de commentaires (% de champ de commentaire). Le programme MATLAB donné est capable d'accepter deux fréquences d'entrée et l'indice de modulation de l'utilisateur.

Simulation de la modulation FM

Représentation mathématique du signal FM

Soit le signal de modulation soit :

$$em(t) = E_m \sin(\omega_m t)$$

et le signal de porteuse sera :

$$ec(t) = E_c \sin(\omega_c t)$$

alors le signal de modulation de $e(t)$ est exprimé sous forme

$$e(t) = E_c \sin(\omega_c t + m \sin(\omega_m t))$$

où « m » est l'indice de modulation.

PROGRAMME MATLAB POUR FM

```
[cc lang='.'."Matlab"]clc;
clear all;
close all;
fm=input('Message Frequency=');
fc=input('Carrier Frequency=');
mi=input('Modulation Index=');
t=0:0.0001:0.1;
m=sin(2*pi*fm*t);
subplot(3,1,1);
plot(t,m);
xlabel('Time');
ylabel('Amplitude');
title('Message Signal');
grid on;

c=sin(2*pi*fc*t);
subplot(3,1,2);
plot(t,c);
xlabel('Time');
ylabel('Amplitude');
title('Carrier Signal');
grid on;

y=sin(2*pi*fc*t+(mi.*sin(2*pi*fm*t)));%Frequency changing w.r.t Message
subplot(3,1,3);
plot(t,y);
xlabel('Time');
ylabel('Amplitude');
title('FM Signal');
grid on;
['/'.cc]
```

Signal FM Généré

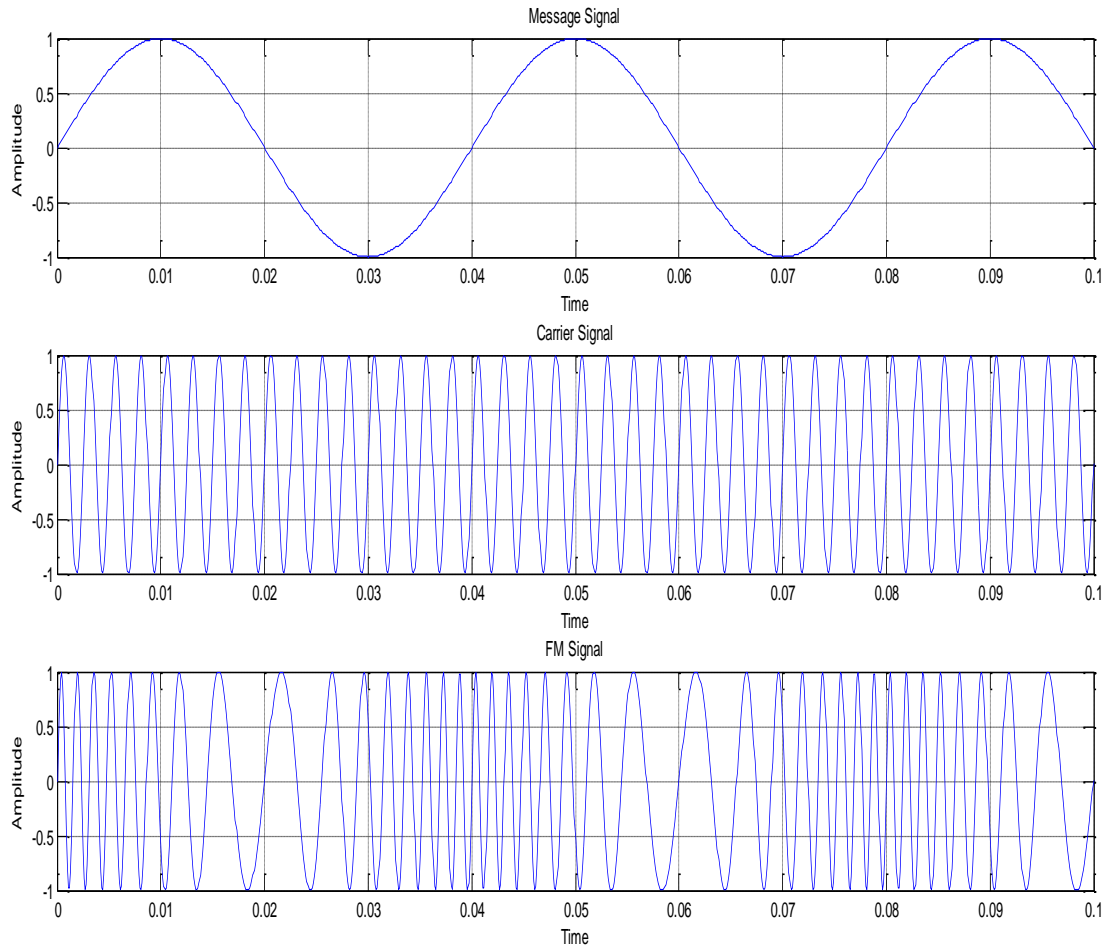
Message Fréquence = 25

Fréquence porteuse = 4000khz

Indice de modulation = 10

Simulation de la modulation FM

Résultat de la simulation FM



Conclusion

Modulation de fréquence (FM) est également une technique de modulation largement utilisée dans l'ingénierie de communication que nous avons discutée plus tôt. En modulation de fréquence, la fréquence d'une onde porteuse est modifiée en fonction de signaux de message.

Traçage FM assurera une meilleure compréhension du signal modulé en fréquence. Plus sur l'indice paramètre de modulation est également inclus dans le programme, qui montre la outspreading modulation de fréquence

CONCLUSION GENERALE

Tout au long de nous avons procéder ce mémoire a une étude théorique ainsi qu'une étude pratique d'un émetteur et d'un récepteur qui fonctionnement par modulation AM, Dans la partie théorique nous avons défini les différents étages qui composent les émetteurs et le récepteur AM.

Tandis que dans la partie pratique nous avons essayé de détailler ces étages par la définition des composantes de ce type de modulation pas la présence de plusieurs autres types tels que la modulation de fréquence FM qui de nos jours la plus exploitée par les radios. Les résultats obtenus de l'étude pratique et la simulation est presque identique.

Référence Bibliographiques :

Les sites web :

[1]- cours de télécommunication jute de villetaneuse département génie télécom et réseaux A . Dupret, A. Fichier,2 année télécommunication modalisation numérique et multiplexage des signaux.

[2]- TI parti II : Modulation à porteuse sinusoidale (suite2003/2004)

Cours .Aniel.A.bounnel polycopé inialement rédigée par j-Taquin

[3]- Ecole polytechniques de L'unspolytech Nice Sophia Département d'électronique 4 Emme année.

[4]- Ac20- La modulation de signaux analogiques et boucle à verrouillage de phase dans les télécommunications responsable de sujet :M.ecrir rachard responsable de L'Un AC20 :M claude pett-jan.

[5]- Lut de Nice-cote d'Azur Département R St

[6]- Modulation à porteuse sinusoidale (suite 2003/2004) cours. Aniel.A.bounnel polycopé inialement rédigée par j. Taquin

Mini projet :

[7]- Etude d'une chaine de transmission : Radio AM Réaliser par Marouani mohamed Taher et Farid Idrriss 2013/2014