

Table des matières

Chapitre 1: Brève introduction aux télécommunications.....	2
1.1 Introduction.....	2
1.2 Support de transmission	2
Propagation libre	3
Propagation guidée	3
Chapitre 2: Modulation en amplitude.....	5
2.1 Généralités sur la modulation analogique	5
Porteuse $p(t)$	5
Signal modulant $x(t)$	5
Signal modulé $s(t)$	6
2.2 Modulation d'amplitude (AM).....	6
Modulation AM à double bande latérale à porteuse supprimée.....	6
Modulation AM à double bande latérale avec porteuse.....	8
Modulation AM à bande latérale unique (SSB : single Side Bande)	9
2.3 Démodulation	11
Détection d'enveloppe	11
Démodulation cohérente (synchrone)	12
2.4 Questions de cours.....	13
2.5 Exercices	14
Chapitre 3: Modulation de fréquence (FM).....	17
3.1 Introduction.....	17
3.2 Représentation temporelle.....	17
Cas d'un signal modulant sinusoïdal	18
3.3 Spectre d'un signal FM	18
Cas d'un signal modulant sinusoïdal	18
Cas d'un signal modulant non sinusoïdal	19
Règle de Carson	19
3.4 Démodulation de fréquence	20
Démodulation par discriminateur.....	20
3.5 Questions de cours.....	20
3.6 Exercices	20

Chapitre 1: Brève introduction aux télécommunications

1.1 Introduction

En télécommunication, le système de communication montre l'ensemble des procédés et des équipements mis en place lors de la transmission de l'information depuis l'émetteur jusqu' au récepteur.

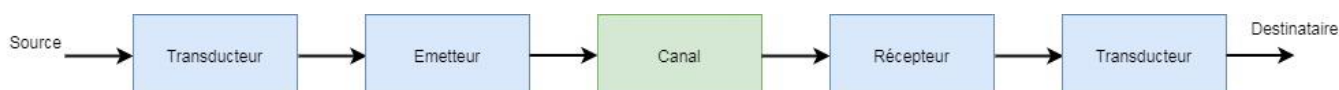


Figure 1.1 Chaîne de télécommunication.

- La source peut être un son, une image, un texte...etc.
- Le premier transducteur transforme l'information que l'on veut transmettre en un signal électrique et le deuxième transducteur transforme le signal électrique fourni par le récepteur en l'information exploitable par le destinataire.
- Le canal est une abstraction du support ou du milieu de transmission (ligne de transmission métallique, fibre optique, ondes hertziennes ...etc.).

Le signal délivré par le transducteur d'émission doit être adapté au canal de transmission. Dans les transmissions sur les longues distances, on lui fait subir une certaine transformation appelée modulation : le signal est modulé par un modulateur avant de le transmettre et l'information reçue est démodulée par un démodulateur avant d'être reçue par l'utilisateur.

1.2 Support de transmission

L'émetteur et le récepteur doivent être reliés pour réaliser une transmission. Cette liaison est ce qu'on appelle support ou médium de transmission, qui peut être matériel comme un fil de cuivre ou une fibre optique ou immatériel, c.-à-d. sans fil avec des technologies à base d'infrarouges, d'ondes radio ou de micro-ondes. D'une manière générale, la transmission peut être guidée avec un support matériel ou libre (non guidée) dans le cas sans fils.

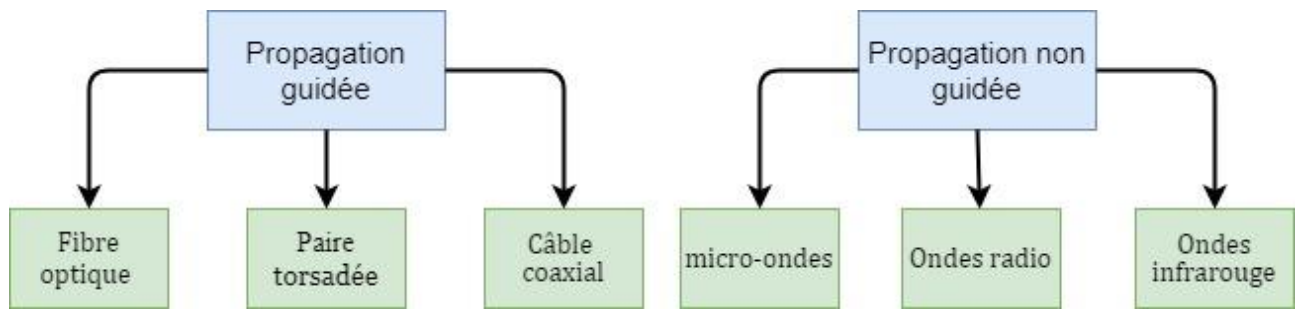


Figure 1.2 Classification des canaux de transmission selon la nature du médium.

Propagation libre

L'onde électromagnétique est rayonnée par une antenne au niveau de l'émetteur. Elle se propage en ligne droite avec la vitesse de la lumière, et elle est détectée par une antenne au niveau du récepteur. Les systèmes de télécommunications sans fil utilisent des fréquences de 3 kHz jusqu'à 300 GHz.

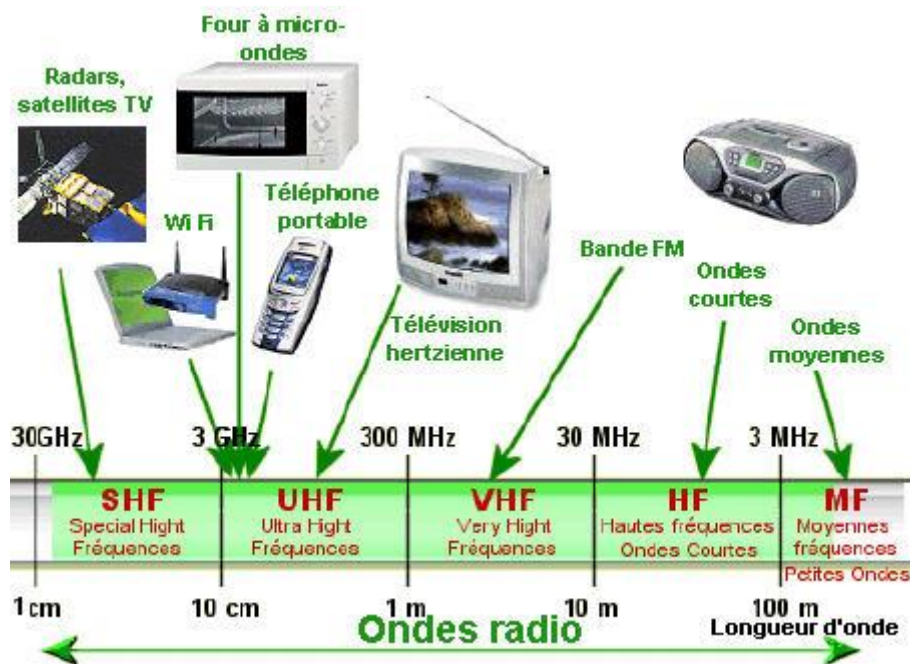


Figure 1.3 Fréquences et longueurs des ondes radio.

Propagation guidée

L'émetteur et le récepteur sont connectés par un support matériel, tel qu'un câble, pour transporter l'onde émise. Les supports les plus utilisés sont : la ligne torsadée, le câble coaxial, la fibre optique, le guide d'onde métallique (3GHz→300GHz) et la ligne imprimée.

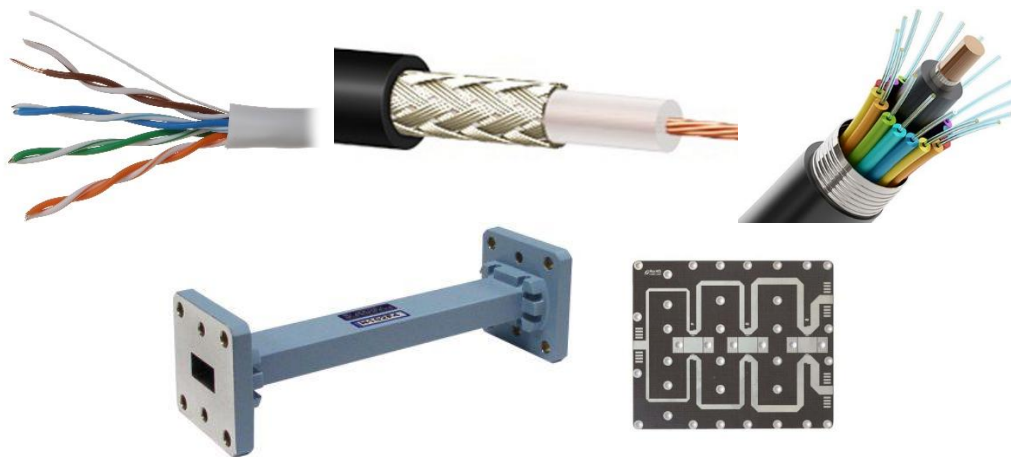


Figure 1.4 De gauche à droite de haut en bas: paire torsadée, câble coaxial, fibre optique, guide d'onde, ligne imprimée.

Chapitre 2: Modulation en amplitude

2.1 Généralités sur la modulation analogique

La modulation d'une porteuse à haute fréquence par un signal source avant de le transmettre permet d'adapter ses propriétés spectrales au canal de transmission et la transmission de plusieurs signaux simultanément sur le même support.

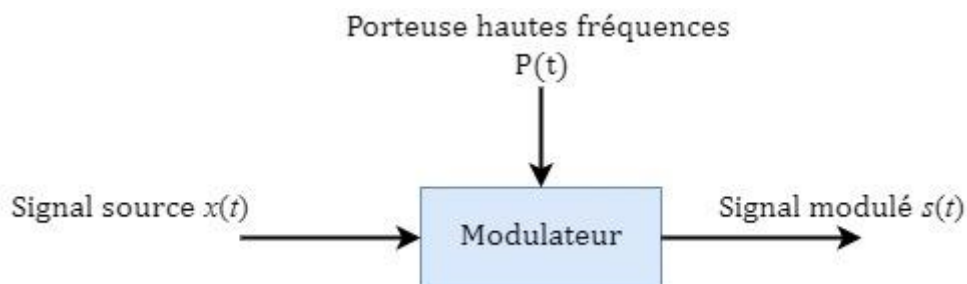


Figure 2.1 Principe de la modulation.

Porteuse $p(t)$

Le signal porteur $p(t)$ est un signal d'amplitude et de fréquence constantes :

$$p(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t)$$

où $2\pi f_0$ est la référence de phase pour tous les signaux.

Signal modulant $x(t)$

Le signal $x(t)$ contient l'information à transmettre. Ses fréquences la plus basse et la plus hautes sont respectivement F_m et F_M . La bande de fréquence $F_m \leq f \leq F_M$ est appelée bande de base.

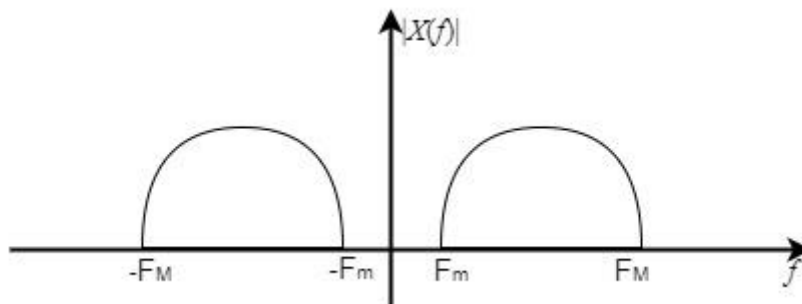


Figure 2.2 Spectre d'amplitude du signal modulant.

Signal modulé $s(t)$

La sortie $s(t)$ du modulateur s'écrit sous la forme générale :

$$s(t) = A(t) \cos(\Phi(t)) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \phi(t))$$

$A(t)$ est l'amplitude instantanée du signal modulé,

$\Phi(t)$ est la phase instantanée du signal modulé,

$\phi(t)$ est la déviation de phase par rapport à la phase de la porteuse $2\pi f_0 t$.

La fréquence instantanée $f_i(t)$ de $s(t)$ est :

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}$$

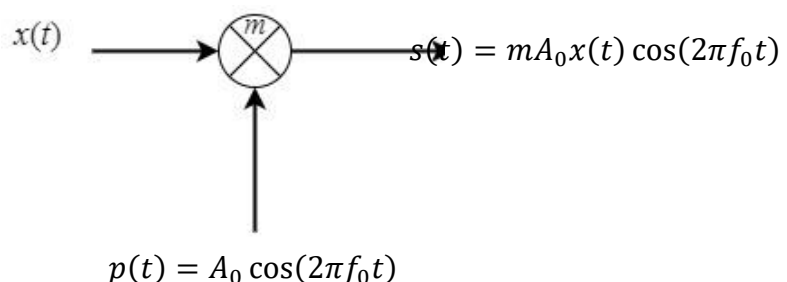
Les différentes techniques de modulation analogique qui existent sont définies d'après le paramètre dans lequel $x(t)$ est inséré dans le signal modulé.

- Modulation d'amplitude AM : l'information est insérée dans l'amplitude instantanée $A(t)$ du signal modulé.
- Modulation de fréquence FM : l'information est insérée dans la fréquence instantanée $f_i(t)$ du signal modulé.
- Modulation de phase PM : l'information est insérée dans la phase $\phi(t)$.

2.2 Modulation d'amplitude (AM)

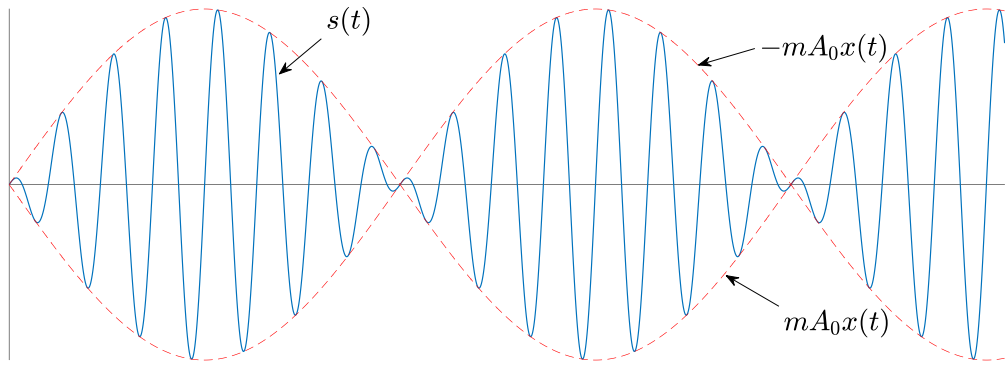
Modulation AM à double bande latérale à porteuse supprimée

Son principe est représenté ci-dessous.



où m est coefficient strictement positif sans dimension.

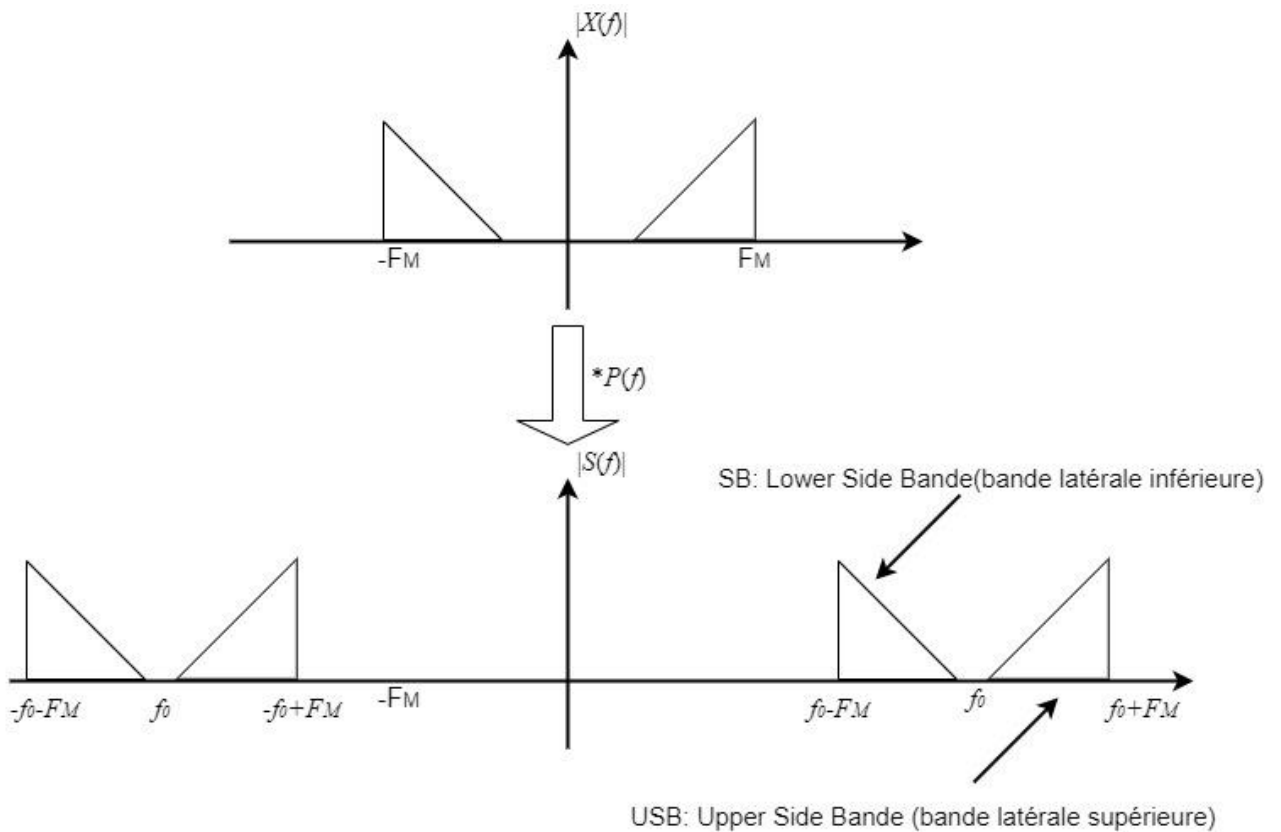
Cette technique consiste à multiplier la porteuse $p(t)$ par le signal modulant $x(t)$ au moyen d'un circuit multiplieur.



La transformé de Fourier $S(f) = TF[s(t)]$ s'écrit :

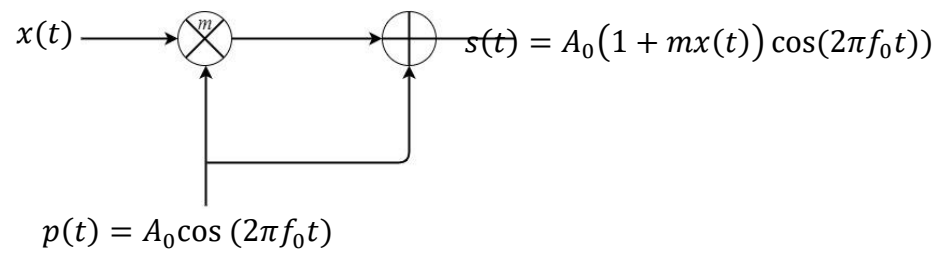
$$S(f) = \frac{1}{2}mA_0(X(f - f_0) + X(f + f_0))$$

Avec $X(f) = TF[x(t)]$

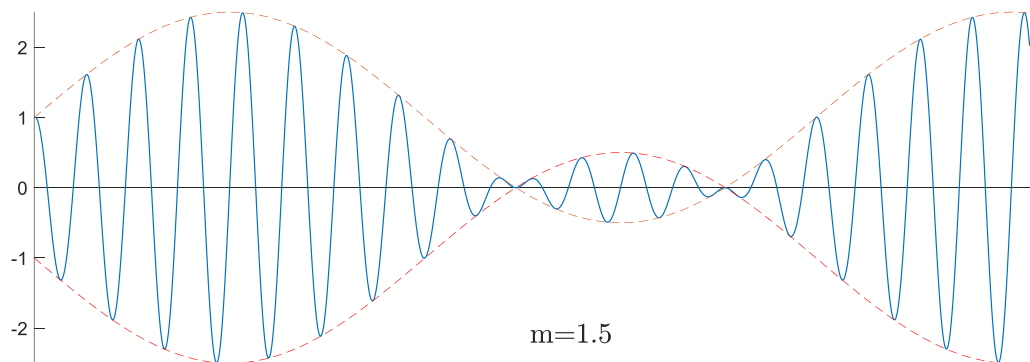
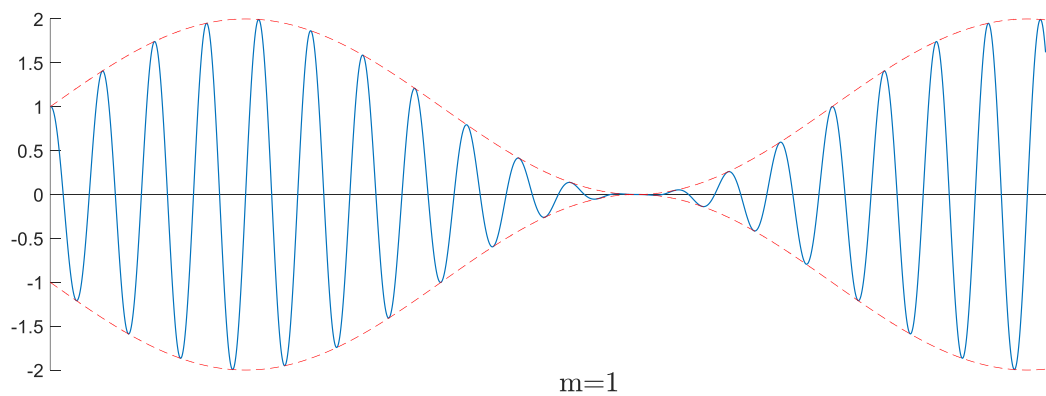
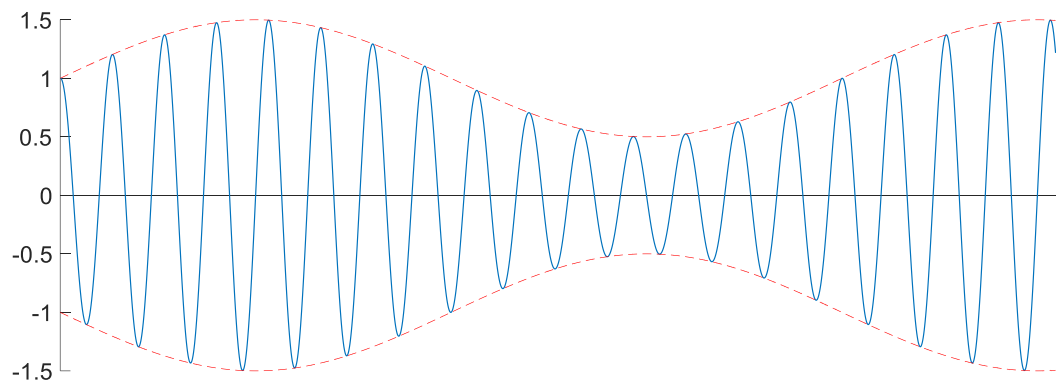


Ce type de modulation d'amplitude s'appelle à porteuse supprimée, car l'impulsion qui correspond à $P(f)$ n'apparaît pas dans le spectre du signal modulé. Cela signifie que la puissance de la porteuse $p(t)$ n'est pas transmise. C'est l'avantage de cette technique.

Modulation AM à double bande latérale avec porteuse

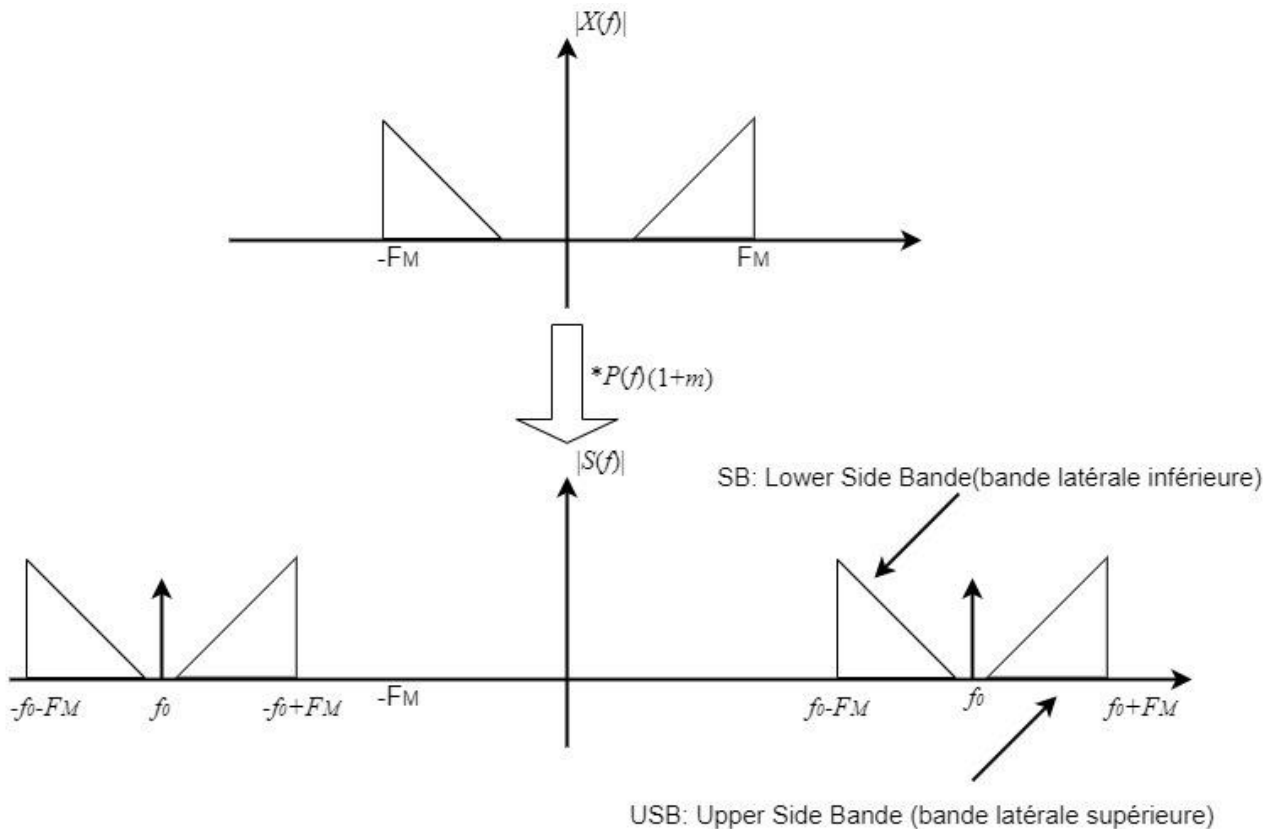


Le facteur m est défini comme indice de modulation.



La transformée de Fourier de $s(t)$ s'écrit

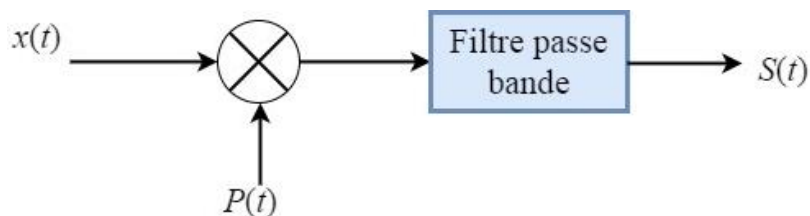
$$s(f) = \frac{1}{2} A_0 (\delta(f - f_0) + mX(f - f_0) + \delta(f + f_0) + mX(f + f_0))$$

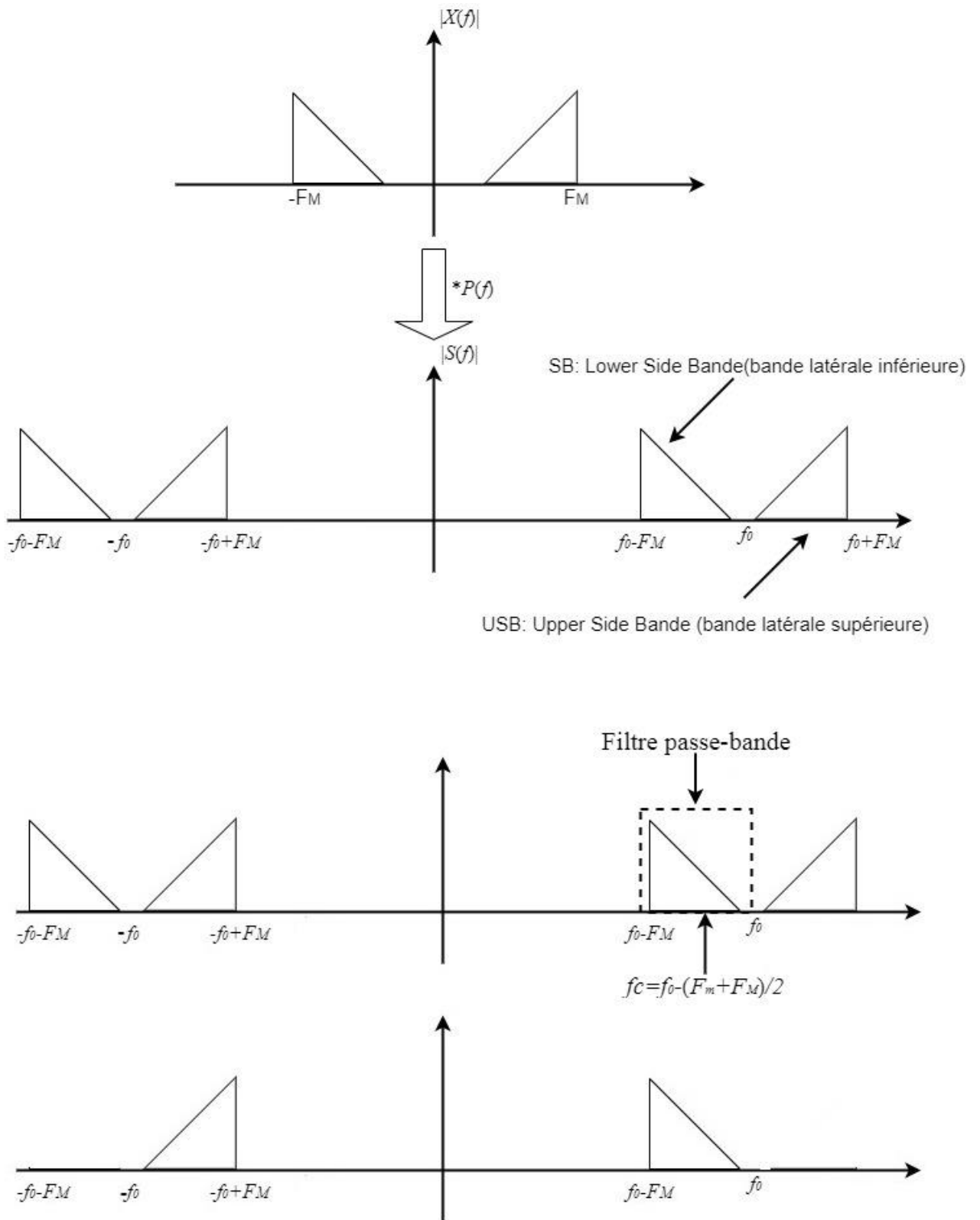


Cette technique est souvent désignée par AM sans précision. L'énergie de la porteuse est aussi transmise ce qui constitue un inconvénient par rapport à la modulation AM à double bande latérale sans porteuse. Cependant, la méthode de démodulation qui lui correspond est relativement simple.

Modulation AM à bande latérale unique (SSB : single Side Bande)

Les deux bandes latérales inférieure et supérieure du spectre du signal modulé en AM à porteuse supprimée contiennent la même information. Il est possible de n'en transmettre qu'une seule en utilisant un filtre passe-bande.





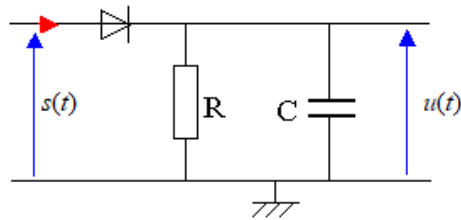
La bande fréquentielle de $S(f)$ est réduite à la moitié. Ainsi, le double d'information peut être transmis sur un même canal et l'énergie transmise est réduite à la moitié. Ce type de modulation est utilisé dans les réseaux téléphoniques analogiques.

2.3 Démodulation

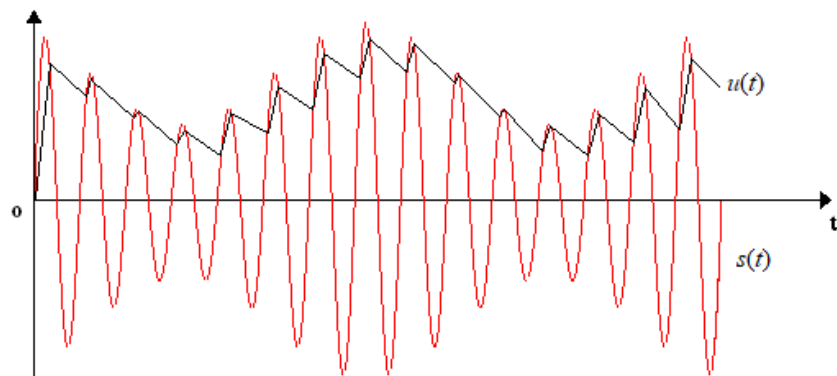
La démodulation consiste à extraire l'information $x(t)$ à partir du signal modulé $s(t)$.

Détection d'enveloppe

En modulation d'amplitude, l'information se trouve dans l'enveloppe du signal modulé $s(t)$. Une première méthode pour extraire cette information consiste à utiliser un détecteur d'enveloppe souvent à base d'un détecteur à diode.

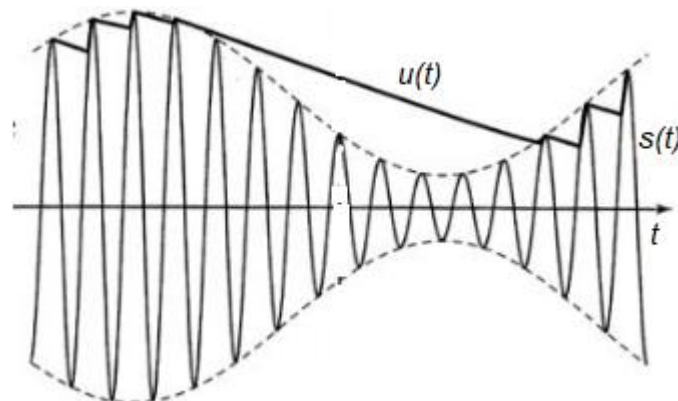


- $s(t) > u(t) \rightarrow$ la diode est passante \rightarrow le condensateur C se charge et $u(t)$ suit $s(t)$.
- $s(t) < u(t) \rightarrow$ la diode est bloquée $\rightarrow u(t)$ décroît selon la constante de temps RC .

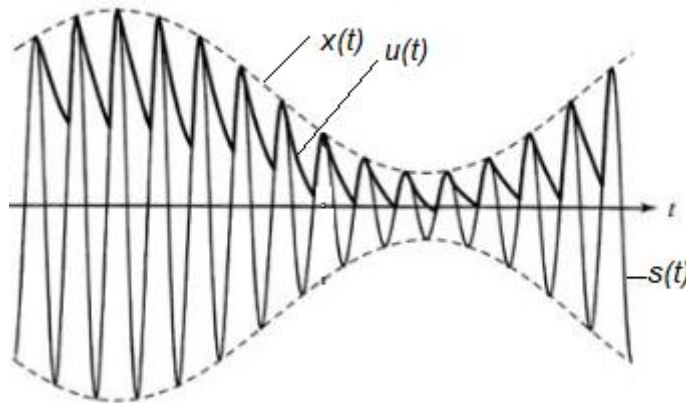


La constante de temps optimale doit être dans les limites $\frac{1}{f_0} < RC < \frac{1}{F_m}$.

Si $RC < \frac{1}{F_m}$ n'est pas vérifiée, c.à.d. la constante de temps RC est élevée ($RC > \frac{1}{F_m}$), alors $u(t)$ ne suit pas fidèlement $s(t)$.



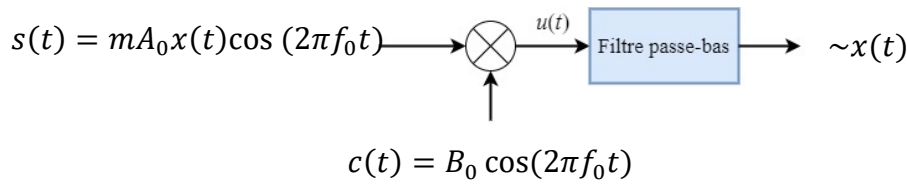
Si $RC > \frac{1}{f_0}$ n'est pas vérifiée, alors le condensateur a tendance à se décharger trop rapidement donnant un signal détecté $u(t)$ trop ondulé.



Cette méthode ne peut pas être appliquée en modulation à porteuse supprimée ou avec porteuse lorsque $m > 1$, car elle requiert une enveloppe de $s(t)$ unipolaire.

Démodulation cohérente (synchrone)

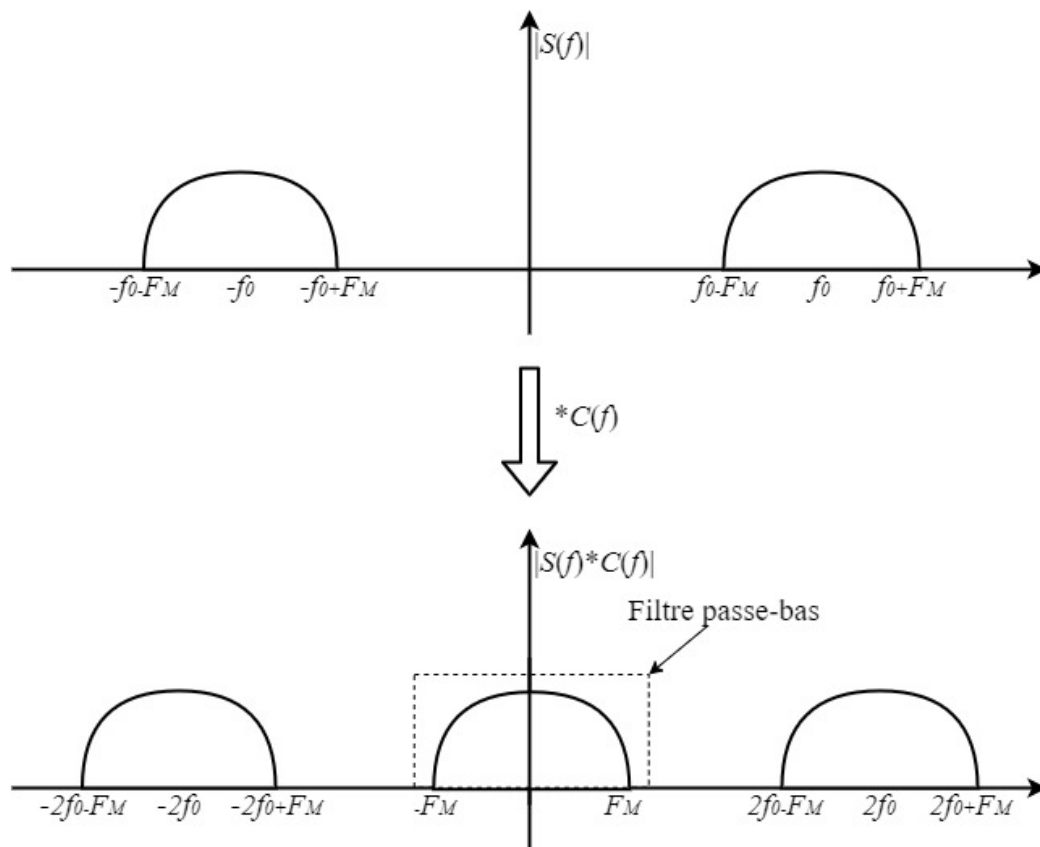
Elle consiste en un circuit multiplicateur en cascade avec un filtre passe-bas.



$$u(t) = mA_0 B_0 x(t) \cos^2(2\pi f_0 t) = \frac{mA_0 B_0 x(t)}{2} (1 + \cos(4\pi f_0 t))$$

$$u(t) = \frac{mA_0 B_0}{2} (x(t) + x(t) \cos(4\pi f_0 t))$$

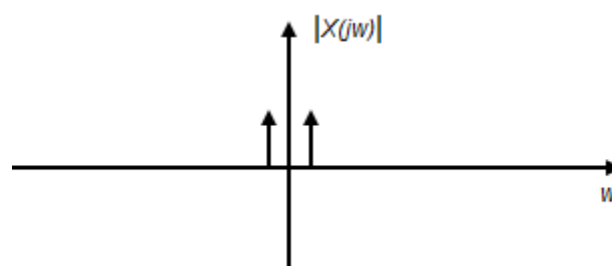
$$U(f) = \frac{mA_0 B_0}{2} \left(X(f) + \frac{1}{2} (X(f - 2f_0) + X(f + 2f_0)) \right)$$



Il suffit donc de filtrer par un filtre passe-bas de fréquence de coupure légèrement supérieure à F_M pour récupérer le signal modulant $x(t)$ à un facteur multiplicatif près.

2.4 Questions de cours

- 1) Donner un intérêt et un inconvénient de modulation AM à double bande latérale sans porteuse par rapport à la modulation AM à double bande latérale avec porteuse.
- 2) Quels sont les intérêts de la modulation AM à bande latérale unique par rapport à la modulation AM à double bande latérale ?
- 5) Calculer la fréquence instantanée du signal $S(f) = 2.54\cos(2\pi \times 10^7 t + 10\sin(2\pi \times 10^3 t + 4\pi/3))$.
- 3) La figure ci-dessous représente le spectre de module d'un signal $x(t)$.



Ce signal module une porteuse (sinusoïdale) de fréquence f_0 . Dessinez approximativement les spectres d'amplitude du signal modulé $s(t)$ résultant des cas suivants : 1) modulation AM à double bande latérale sans porteuse 2) modulation AM à bande latérale unique sachant que c'est la bande latérale supérieure qui est émise 3) modulation AM à double bande latérale avec porteuse.

4) On désire moduler un signal vocal dont la bande passante varie de 100Hz à 3400 Hz par une sinusoïde de fréquence 250 kHz en SSB.

- 1- Reprendre le schéma de principe du modulateur vu en cours
- 2- Où se situe la bande passante du filtre passe-bande du modulateur s'il est utilisé pour laisser passer la bande latérale supérieure ?

5) Pour chacun des signaux modulés suivants, indiquer le type de modulation et donner en kHz les fréquences du signal modulant et de la porteuse, le cas échéant.

- a) $10\sin(\pi 1000t)\cos(\pi 5 \times 10^5 t)$ b) $(1 + 0.5\sin(15707.96t))\cos(942477.79t)$
- c) $0.5(\delta(f - 145000) + \delta(f + 145000))$

6) Expliquer pourquoi on ne peut utiliser la démodulation par détection d'enveloppe dans le cas de la modulation AM à DBL à porteuse supprimée.

2.5 Exercices

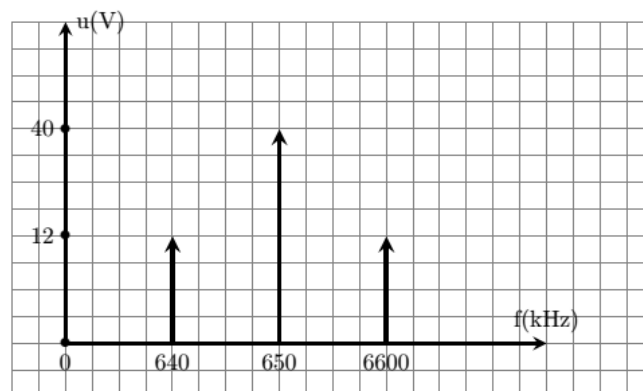
Exercice n°1

1- L'expression d'un signal modulé est :

$$s(t) = 2(1 + 0.6\sin(1.2 \times 10^2 t)) \times \cos(10^4 t)$$

- a) Quelle est la modulation AM employée ?
- b) Quelles sont les fréquences (en Hz) de la porteuse f_0 et du signal modulant F ?
- c) Sachant que l'amplitude du signal modulant est égale à 1, quelle est la valeur du taux de modulation m ?

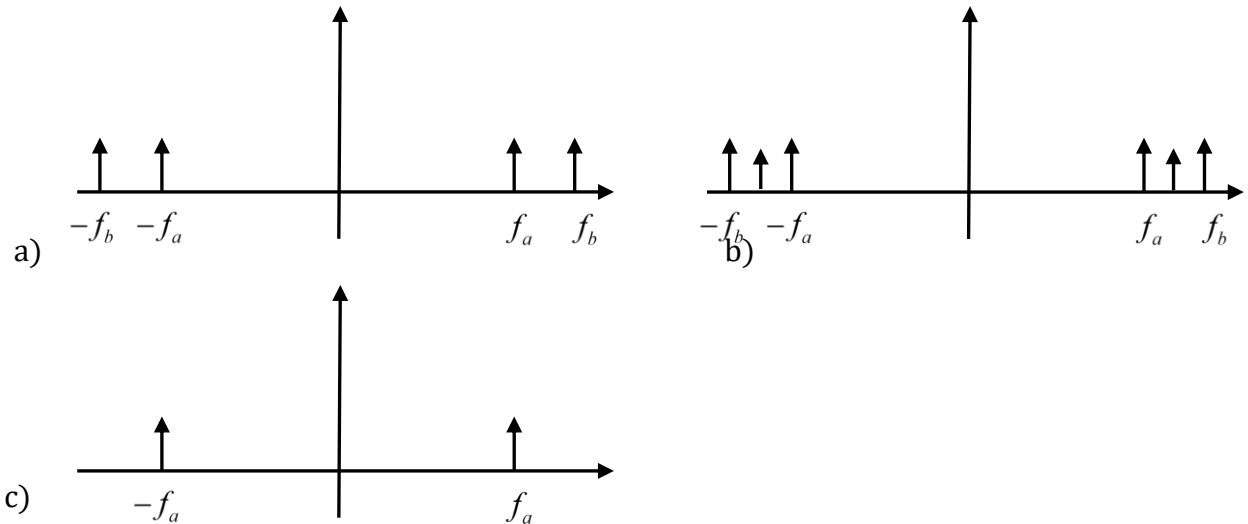
2- Un signal AM branché un analyseur de spectre est représenté ci-dessous.



- a) Quelle est la fréquence de porteuse ?
- b) Quelle est la fréquence du signal modulant ?
- c) Quelle est la bande de fréquence occupée par ce signal ?

d) Etant donné que l'amplitude du signal modulant est égale à 1, Quel est dans ce cas le taux de modulation m ?

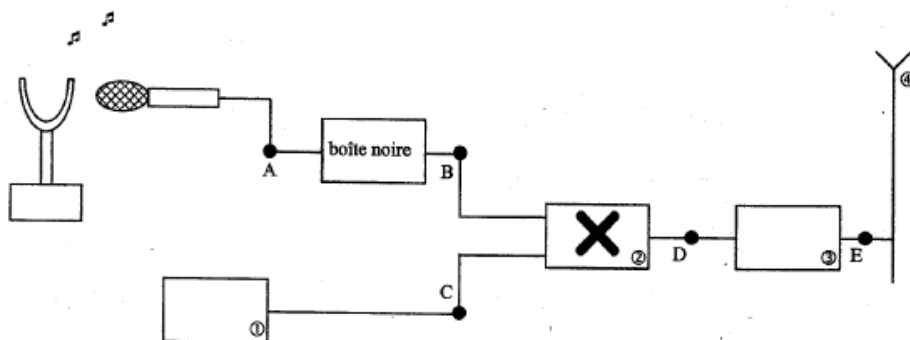
3- Les figures suivantes représentent les spectres d'amplitude résultants de trois modulations AM.



Le signal modulant est sinusoïdal de la forme $x(t) = A \cos(2\pi Ft)$. Déterminer le type de modulation AM correspondant à chacun des spectres représentés ci-dessus. Sachant que $f_a = 200$ kHz et $f_b = 210$ kHz, déterminer la fréquence du signal modulant F et la fréquence de la porteuse f_0 . Quelle est la bande de fréquence occupée par les signaux AM à double bande latérale.

Exercice n°2

Le schéma ci-dessous représente la chaîne simplifiée de transmission d'un son par modulation d'amplitude.



Indiquer sur ce schéma le signal modulant, la porteuse et le signal modulé.

Exercice n°3

Donner l'expression du signal modulé en amplitude à double bande latérale et à porteuse supprimée $s(t)$, ainsi que sa représentation spectrale, dans le cas où le signal modulant est une sinusoïde $x(t) = A_0 \cos(2\pi Ft)$ telle que $F \ll f_0$.

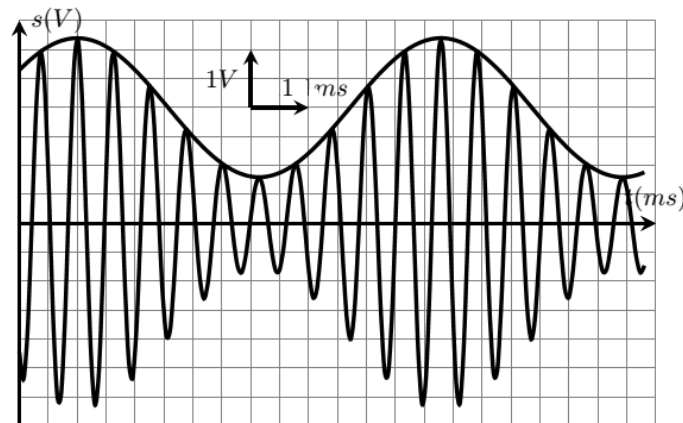
Exercice n°4

On désire moduler un signal vocal dont la bande passante varie de 100Hz à 3400 Hz par une sinusoïde de fréquence 250 kHz en SSB à porteuse supprimée.

- 3- Reprendre le schéma de principe du modulateur vu en cours
- 4- Où se situe la bande passante du filtre passe-bande du modulateur s'il est utilisé pour laisser passer la bande latérale supérieure.

Exercice n°5

La figure ci-dessous représente un signal modulé en amplitude avec porteuse. Le signal modulant est une sinusoïde pure de fréquence F .



- 1- Que représente la courbe qui délimite les variations des maximums du signal modulé ?
- 2- Déterminer graphiquement la fréquence de la porteuse f_0 et la fréquence du signal modulant F .
- 3- On évoque l'expression d'un signal modulé en amplitude avec porteuse ; $S(t) = A_0(1 + mx(t))\cos(2\pi f_0 t)$. Rappeler l'expression du spectre de ce signal et tracer le dans le cas où $x(t)$ est une sinusoïde pure.
- 4- Sachant que $x(t) = 1 \times \cos(2\pi F t)$ et $A_0 = 2$ (V), calculer le taux (indice) de modulation m (on donne $\max S(t) = 3.15$ V).

Exercice n°6

Un signal modulé en AM à bande latérale unique a l'expression suivante :

$$S(f) = 0.5(\delta(f - 145000) + \delta(f - 155000) + \delta(f + 145000) + \delta(f + 155000))$$

Sachant que c'est la bande inférieure qui est émise et que la fréquence de la porteuse est 160000 kHz :

- a- Dessiner les spectres d'amplitude du signal modulé et du signal modulant.
- b- Déterminer la plus haute et la plus basse fréquence dans le signal modulant.
- c- Où se situe la bande passante du filtre du modulateur ?
- d- Le signal modulant est-il périodique ou apériodique ? justifier.
- e- Quelle est la bande fréquentielle occupé par ce signal dans le cas d'une modulation AM à double bande latérale.

Chapitre 3: Modulation de fréquence (FM)

3.1 Introduction

La modulation de fréquence (FM : Frequency Modulation) est un type de modulation dans lequel la fréquence du signal modulé varie en fonction de l'amplitude instantanée du signal modulant, contrairement à la modulation d'amplitude (AM), où c'est l'amplitude du signal modulé qui subit les variations.

Cette technique est moins sensible aux interférences électromagnétiques et aux bruits parasites, ce qui permet une meilleure qualité de transmission.

3.2 Représentation temporelle

Dans cette modulation, la porteuse a l'expression :

$$p(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t)$$

est le signal modulé est :

$$s(t) = A \cos(\Phi(t))$$

où l'amplitude A est constante et la phase instantanée $\Phi(t)$, qui est une fonction du signal modulant $x(t)$, a l'expression :

$$\Phi(t) = 2\pi f_0 t + \phi(t)$$

où $\phi(t)$ est la déviation de phase.

La fréquence instantanée de $s(t)$ se donne donc par

$$f_i(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}$$

où $\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}$ s'appelle la déviation de fréquence.

Dans la modulation de fréquence, la déviation de fréquence varie proportionnellement à $x(t)$:

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = \Delta \quad (1)$$

Par conséquent, la fréquence instantanée est

$$f_i(t) = f_0 + \Delta f \cdot x(t) \quad (2)$$

Le facteur Δf s'appelle excursion en fréquence. Compte tenu des équation (1) et (2), $s(t)$ s'écrit :

$$s(t) = A \cos\left(2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f \int_0^t x(\tau) d\tau\right)$$

Cas d'un signal modulant sinusoïdal

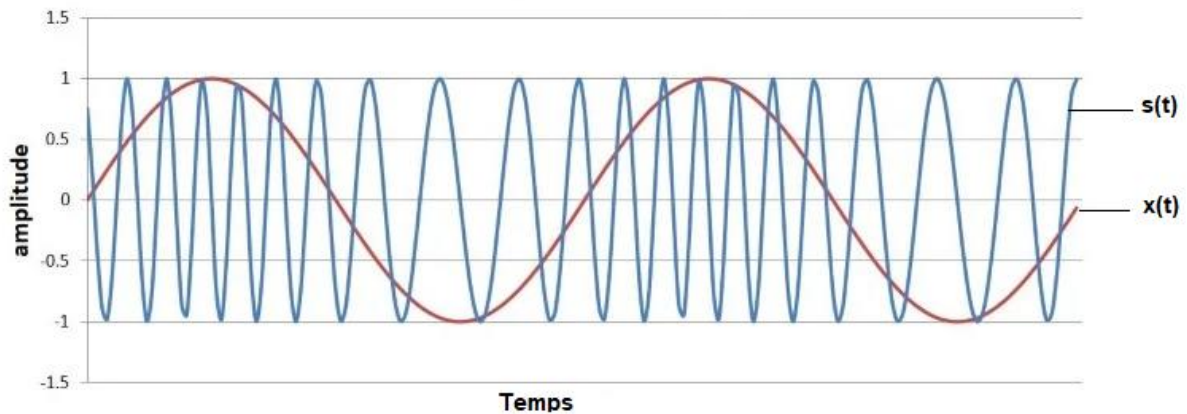
On suppose que le message à transmettre est

$$x(t) = \cos(2\pi Ft)$$

Le signal modulé s'écrit donc

$$s(t) = A \cos\left(2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f \int_0^t \cos(2\pi F\tau) d\tau\right)$$
$$s(t) = A \cos\left(2\pi f_0 t + \frac{\Delta f}{F} \sin(2\pi Ft)\right)$$

Le rapport $\frac{\Delta f}{F}$ est la valeur maximale de la déviation de phase. Il est défini comme l'indice de la modulation FM dans le cas où le signal modulant est sinusoïdal.



3.3 Spectre d'un signal FM

La modulation FM produit un nombre infini de bandes latérales au-dessous et au-dessus de la fréquence f_0 de la porteuse.

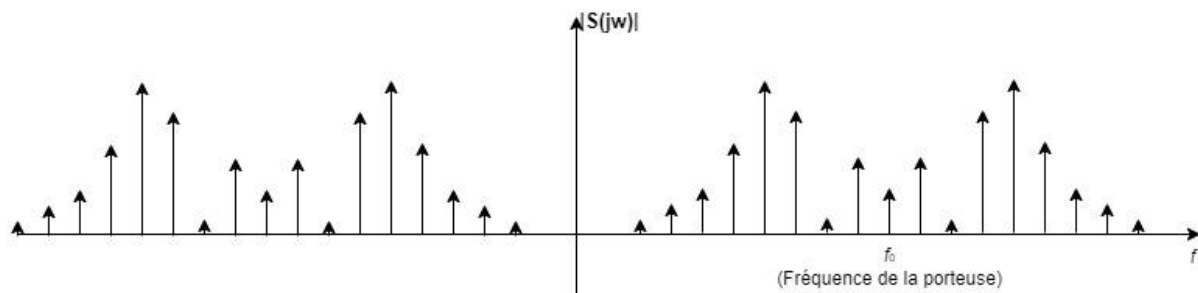
Cas d'un signal modulant sinusoïdal

Dans ce cas le spectre du signal modulé $s(t)$ a l'expression :

$$S(f) = \frac{A}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n\left(\frac{\Delta f}{F}\right) (\delta(f - f_0 - nF) + \delta(f + f_0 + nF))$$

où J_n est la fonction de Bessel de première espèce

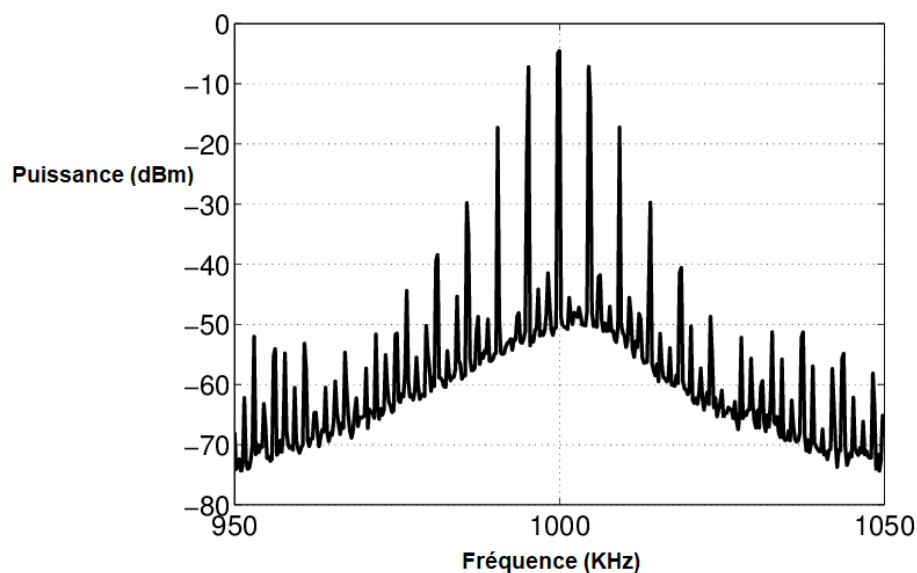
$$J_n\left(\frac{\Delta f}{F}\right) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(-1)^p}{p! (n+p)!} \left(\frac{\Delta f}{2F}\right)^{2p+n}$$



Spectre d'un signal FM dans le cas où $x(t)$ est sinusoïdal

Cas d'un signal modulant non sinusoïdal

Dans le cas où le signal modulant est quelconque, il est très difficile de formuler analytiquement le spectre en modulation FM.



Exemple du spectre d'un signal FM

Le spectre d'un signal FM présente un nombre infini de bandes latérales autour de la fréquence de la porteuse. Ainsi, déterminer la largeur de la bande fréquentielle de ce signal n'est pas trivial. Une règle couramment utilisée pour cette détermination est la suivante :

$$Bw = 2F_M \cdot N$$

- F_M est la fréquence la plus élevée dans le signal modulant ;
- N est le nombre de bandes latérales ayant une puissance supérieure ou égale à 1% de celle de la porteuse.

Règle de Carson

La règle de Carson est une formule empirique (établie en 1922) utilisée pour estimer la largeur de bande fréquentielle d'un signal FM. Elle est souvent employée pour déterminer approximativement la largeur de bande nécessaire pour transmettre un signal FM.

$$Bw = 2(\Delta f + F_M)$$

- Δf est l'excursion en fréquence ;
- F_M est la fréquence maximale du signal modulant.

3.4 Démodulation de fréquence

Démodulation par discriminateur

Le discriminateur est l'un des principaux dispositifs utilisés pour la démodulation FM. Il se base sur la conversion des variations de fréquence en variations d'amplitude, plus faciles à traiter.

Considérer le signal modulé en FM :

$$s(t) = A \cos \left(2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f \int_0^t x(\tau) d\tau \right)$$

Son dérivé temporel est

$$\frac{ds(t)}{dt} = A(2\pi f_0 + \Delta f x(t)) \sin \left(2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f \int_0^t x(\tau) d\tau \right)$$

On remarque donc l'amplitude de $\frac{ds(t)}{dt}$ est

$$A(2\pi f_0 + \Delta f x(t))$$

3.5 Questions de cours

- 1- Comment la modulation de fréquence (FM) se différencie-t-elle de la modulation d'amplitude (AM) ?
- 2- Quels sont les avantages de la modulation FM par rapport à l'AM ?
- 3- Comment l'excursion en fréquence influence-t-elle la largeur de bande du signal modulé ?
- 4- Quelle est l'utilité de la règle de Carson ?

3.6 Exercices

Exercice n° 1

On considère le signal FM suivant :

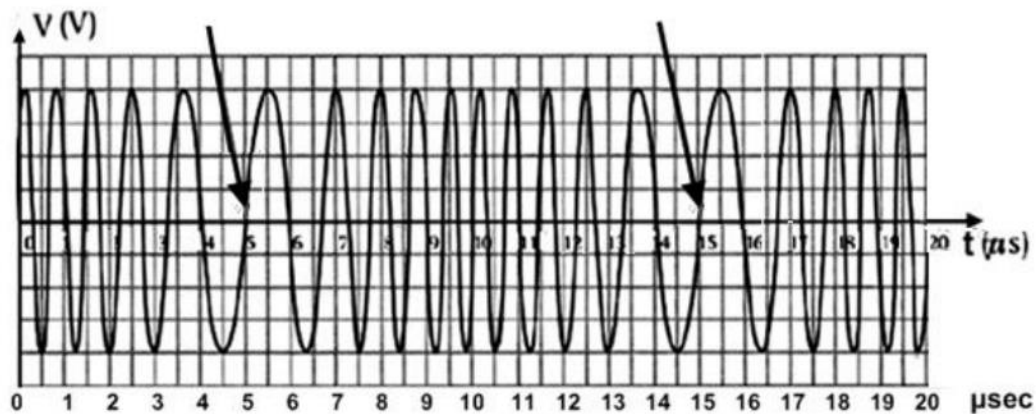
$$s(t) = \cos(20\pi \times 10^9 t + \sin(2\pi \times 10^4 t) + 10 \sin(2\pi \times 10^3 t))$$

- 1- Donner l'expression de sa fréquence instantanée.
- 2- Calculer l'excursion en fréquence Δf .
- 3- Donner l'expression du signal modulant et dessiner son spectre d'amplitude.
- 4- Identifier les fréquences du signal modulant ainsi que la fréquence de la porteuse f_0 ?

- 5- Déterminer la largeur de la bande fréquentielle nécessaire pour transmettre $s(t)$.
- 6- Quelle serait la largeur de cette bande dans le cas d'une modulation AM à double bande latérale ?

Exercice n°2

La figure suivante représente un signal FM modulé par une sinusoïde pure $x(t) = \cos(2\pi Ft)$



- 1- Trouver graphiquement la fréquence de la porteuse f_0 l'excursion en fréquence Δf , ainsi que la fréquence de la sinusoïde modulante.
- 2- En utilisant la règle de Carson, calculer la bande de fréquence nécessaire pour transmettre le signal modulé sans perte d'information.