



المسيلة في : 2025/04/23

الرقم : 65.../ق.ا/2025

شهادة إدارية

بعد الإطلاع على التقارير الايجابية الواردة من السادة الخبراء أعضاء لجنة دراسة المطبوعة الجامعية والاتيية أسماؤهم:

- | | | |
|-----------------------------|-----------------|---------------|
| جامعة جيجل | أستاذ محاضر "أ" | • بوكروم فيصل |
| جامعة محمد بوضياف - المسيلة | أستاذ محاضر "أ" | • قارح مسعود |
| جامعة محمد بوضياف - المسيلة | أستاذ محاضر "أ" | • صاهد محمد |

صادق أعضاء اللجنة العلمية على قبول المطبوعة البيداغوجية مع إمكانية إتخاذها سندا في تدريس طلبة السنة الثانية ليسانس إتصالات، في ميدان علوم و تكنولوجيا و أن تعتمد في أي تقييم المسار العلمي للأستاذ المعني كنان الهادي (أستاذ محاضر قسم "أ" - جامعة محمد بوضياف - المسيلة) تحت عنوان:

Télécommunications Fondamentales

رئيس اللجنة العلمية

مزعاش عمار





جامعة محمد بوضياف - المسيلة

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الالكترونك

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Support de Cours

Télécommunications Fondamentales

Cours de deuxième année Licence

Filières : Télécommunications

Réalisé par :

Dr. KENANE EL Hadi

Janvier 2025

Support de cours
En
Télécommunications Fondamentales
Deuxième année Licence
Filière Télécommunications

Par Dr. KENANE EL-Hadi

Semestre:4
Unité d'enseignement:UEF 2.2.1
Matière:Télécommunications fondamentales
VHS: 67h30 (Cours: 3h00, TD: 1h30)
Crédits: 6
Coefficient: 3

Objectifs de l'enseignement :

Le cours vise à donner une vision globale des principes de base des systèmes de télécommunications analogiques et numériques et à en déduire les caractéristiques minimales.

Connaissances préalables recommandées :

Mathématiques 3, Ondes et vibrations, Electronique fondamentale 1

Contenu de la matière :

Chapitre 1. Généralités sur les Télécommunications

(3 Semaines)

Historique et évolution des télécommunications, Services offerts par les télécommunications, Normes et standards de télécommunications

Chapitre 2. Systèmes de communication

(4 Semaines)

Sources et signaux des télécommunications, Schéma de base et principes d'un système de communication, Support de transmission (Lignes de Transmission: ligne bifilaires, câble coaxial, lignes imprimés, Guides d'ondes, Fibres optiques, Espace libre)

Chapitre 3. Techniques de transmission analogiques

(4 Semaines)

Rappels mathématiques: Classes de signaux, Exemples de signaux élémentaires, Principe de la transmission analogique, Filtrage, Amplification, Modulation, Mélange.

Chapitre 4. Techniques de transmission numérique

(4 Semaines)

Principe de la transmission numérique, Echantillonnage, Quantification, Codage, Canal de transmission.

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 40 % ; Examen final : 60 %.

Références bibliographiques:

1. D. Battu, Initiation aux Télécoms : Technologies et Applications, Dunod, Paris, 2002.
2. P. Clerc, P. Xavier, Principes fondamentaux des Télécommunications, Ellipses, Paris, 1998.
3. G. Barué, Télécommunications et Infrastructure, Ellipses, 2002.
4. E. Altman, A. Ferreira et J. Galtier, Les Réseaux Satellitaires de Télécommunications: Technologie et Services, Dunod, Paris, 1999.
5. P.G Fontolliet, Systèmes de Télécommunications, Traité d'Electricité, Vol. XVIII, PPUR, Lausanne, 1999 (Chapitres 12 & 13).
6. C. Servin, Réseaux & Télécoms, 2e éd., Dunod, Paris, 2006.
7. G. Baudoin, Radiocommunications Numériques T1: Principes, Modélisation et Simulation, Dunod, Paris, 2007

PREFACE

Ce support de cours, en « Télécommunications Fondamentales », est principalement destiné aux étudiants de deuxième année Licence Télécommunications. Ce cours permet aux étudiants d'aborder les principes de base des différents mécanismes utilisés dans la transmission des signaux d'une source à une destination. A la fin de ce cours, l'étudiant acquerra la maîtrise des différentes techniques de transmission analogiques ainsi que numériques. Ce cours sert de base pour le cours des Communications analogiques de la troisième année licence en Télécommunications.

Avant d'entamer les différentes techniques de transmission, on va voir les notions de base liées à la télécommunication ainsi que les différents services offerts par les systèmes de télécommunications. De même, l'étudiant va voir une idée générale sur la classification des signaux et les modes de transmission.

Ensuite, l'étudiant va apprendre les différentes techniques de transmissions analogiques et numériques. Au premier, on va voir la nécessité d'utiliser la modulation d'une manière générale puis l'étudiant va entamer les différents types de la modulation analogiques (AM, FM et PM).

Enfin, le cours présentera les différentes techniques de la transmission numérique (modulation numérique), où l'étudiant va apprendre les concepts de base de la transmission numérique et les procédures de numérisation d'un signal analogique (échantillonnage, quantification et codage).

Prérequis pour la matière

Pour suivre cette matière d'une manière efficace, l'étudiant est sensé avoir acquis au préalable les notions fondamentales sur :

- ❖ Mathématiques 3
- ❖ Ondes et vibrations
- ❖ Electronique fondamentale 1

Table des matières

Preface

Chapitre I

GENERALITES SUR LES TELECOMMUNICATIONS

- I.1 Introduction
- I.2 Système de télécommunication
- I.3 Eléments d'un système de télécommunications
- I.4 Le spectre électromagnétique
- I.5 Les services offerts par les télécommunications
- I.6 Histoire des télécommunications
- I.7 Conclusion

Chapitre II

SYSTEMES DE COMMUNICATIONS

- II.1 Introduction
- II.2 Représentation d'un signal
- II.3 Pourquoi le spectre ?
- II.4 Classification des signaux
- II.5 Modes de transmission
- II.6 Notion de bruit
- II.7 Problèmes et exercices

Chapitre III

TECHNIQUES DE TRANSMISSION ANALOGIQUES

- III.1 Généralités
- III.2 Technique de Modulation
- III.3 Principe de la modulation AM et ses différents types
- III.4 Procédé de la modulation AM

III.5 Modulation FM

III.6 Conclusion

III.7 Problèmes et exercices

Chapitre IV

TECHNIQUES DE TRANSMISSION NUMERIQUES

IV.1 Introduction

IV.2 Principe de transmission numérique

IV.3 Echantillonnage

IV.4 Quantification

IV.5 Codage

IV.6 Conclusion

IV.7 Problèmes et exercices

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES TELECOMMUNICATIONS

I.1 Introduction

I.2 Système de télécommunication

I.3 Eléments d'un système de télécommunications

I.4 Le spectre électromagnétique

I.5 Les services offerts par les télécommunications

I.6 Histoire des télécommunications

I.7 Conclusion



La télécommunication est une technologie qui nous permet d'émettre, transmettre et recevoir à des longues distances, des signaux (voix, images, vidéo ou de signes) via un canal (fil, sans fil, optiques ou autres systèmes électromagnétiques).

GENERALITES SUR LES TELECOMMUNICATIONS

I.1 Introduction

Les systèmes de communication ont connu un développement très rapide, surtout pendant ces dernières décennies. Avant de présenter l'histoire de ce développement, on doit d'abord comprendre la notion de communication et de télécommunication à travers les définitions et exemples présentés dans les paragraphes suivants.

I.2 Système de télécommunication

Un système de communication permet de transmettre une information d'un lieu A à un lieu B éloigné (Fig. I.1).

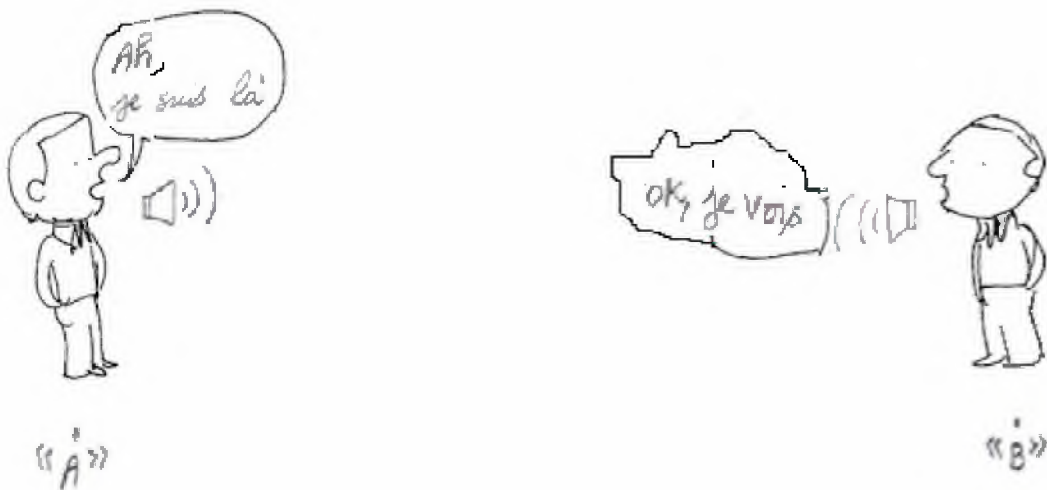


Figure I.1 : Exemple d'un système de communication.

Le mot *télécommunication* est utilisé lorsqu'il s'agit de communiquer à distance, à l'aide d'un appareillage adéquat. Le système utilisé permet de transmettre un signal, porteur d'une information (voix, images, données...), d'une localisation à une autre, pouvant être très éloignée.

I.3 Eléments d'un système de télécommunication

N'importe quel système de télécommunication se compose de trois parties essentielles (L'émetteur, le récepteur et le canal de transmission) comme le montre la figure I.2.

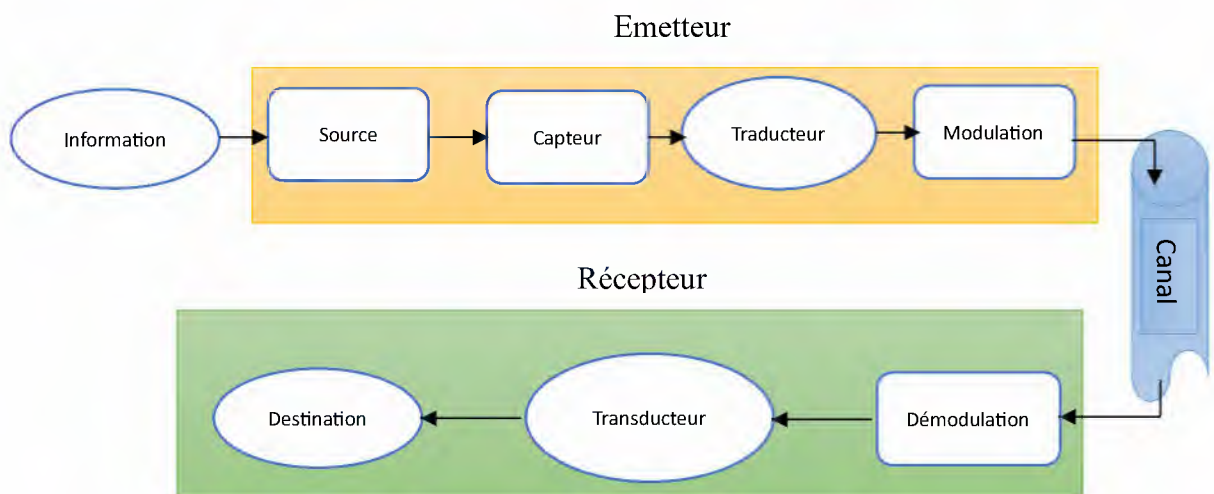


Figure I.2 : Parties d'un système de télécommunications.

I.3.1 L'émetteur

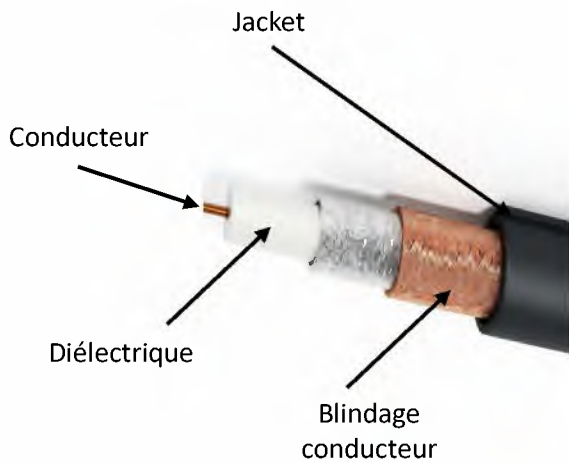
Il est constitué de plusieurs parties qui sont utilisées pour faciliter la transmission des informations via le canal.

- **La source d'information** qui sert à délivrer le signal à transmettre et qui peut être :
 - Une source discrète : Clavier (Alphabet : {a, b, ..., z}),
Signe (0,1)
 - Une source continue : Microphone (signal acoustique : Parole)
Capteur, Caméra (signal vidéo, images, signal vidéo composite)
- **Le système de transmission**

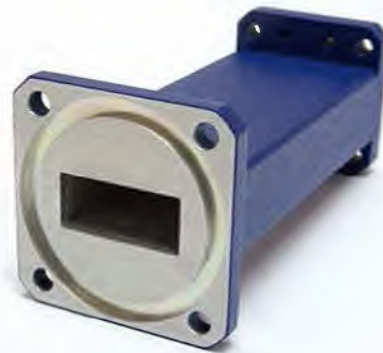
Cette partie englobe les différentes sous-parties de transmission, telles que les modulateurs, les amplificateurs, les filtres et l'antenne émettrice.

I.3.2 Le canal de transmission

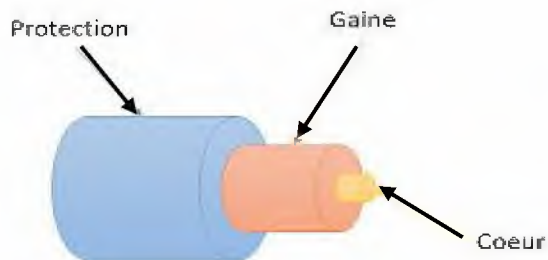
C'est le milieu dans lequel le signal va se propager de l'émetteur vers le récepteur (L'air, le câble coaxial, la fibre optique, le guide d'ondes...) (Fig. I.3). Généralement, ce milieu est altéré par des signaux non désirés (bruits et interférences).



(b) Cable coaxial



(a) Guide d'onde métallique (Rectangulaire)



(c) Fibre optique

Figure I.3 : Quelques types des canaux de transmission.

I.3.3 Le récepteur

C'est la partie qui interprète convenablement le message et reconstitue toute l'information que l'émetteur envoie via le canal.

I.4 Le spectre électromagnétique

Depuis l'apparition des premiers systèmes de télécommunication, les bandes électromagnétiques ont vu s'ouvrir un très grand nombre d'utilisations.

La communauté internationale des radiocommunications organise des meetings périodiques afin de planifier, gérer et contrôler le spectre des fréquences (Tableau I.1), ce qui permet d'éviter le brouillage, les conflits et les interférences entre les différents services. Cela permet aussi aux nouvelles innovations techniques de trouver une place favorable à leur développement, à leur diffusion et à leur bon fonctionnement, en cohabitation avec les utilisations les plus anciennes.

Tableau I.1 : Spectre des fréquences.

Milieu de transmission	Bandes de fréquence	Fréquence (Hz)
	Rayon Gamma	10^{22}
	Rayon X	10^{16}
	Ultraviolet	10^{15}
Fibre optique	La lumière visible	10^{14}
	Infrarouge	10^{13}
Micro-ondes	THF	10^{12}
	EHF	
PCS, Micro-ondes	SHF	
FM, TV, Radio cellulaire	UHF	10^9
TV, coaxiale	VHF	
AM		
Coaxiale	HF	10^6
Téléphonie (Twisted wire)	MF	10^5
Fréquence audio	LF	10^4
	VLF	10^3
	ELF	10^1
	-	10^0

Note : Les bandes radio, micro-ondes, infra-rouge et la lumière visible sont capables de porter l'information.

I.5 Les services offerts par les télécommunications

Ces services se distinguent par le type des informations transmises, le nombre de partenaires impliqués et par le rôle respectif que jouent ces partenaires (le mode de communication) (Fig. I. 4).

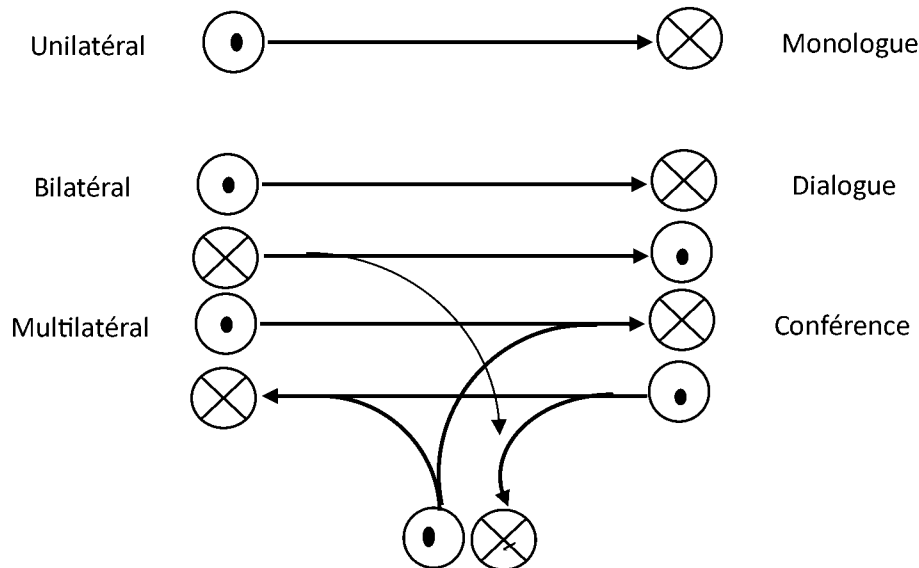


Figure I. 4 : Les modes de communications.

Parmi ces services on trouve :

- La parole → { Unilatéral (Horloge parlante, Radio diffusion)
Bilatéral (Téléphonie, *interphone*, ...)
Multilatéral (Conférence téléphonique, ...)
- Musique → Unilatéral (Radio diffusion, ...)
- Textes → { Unilatéral (Télégraphie)
Bilatéral (Télex, Télétex)
- Image fixe → { Unilatéral (Télécopie, Téléfax)
Bilatéral (Vidéotex)
- Image animées → { Unilatéral (Télégraphie)
Bilatéral (Télex, Télétex)
Multilatéral (Visio Conférence)
- Données → { Unilatéral (Télécommande, Télésurveillance, ...)
Bilatéral (Téléinformatique)

I.6 Histoire des télécommunications

Il existe deux types de communications (filaires et sans fil). Quand il n'est pas possible d'utiliser les systèmes de communications filaires (présence d'obstacles, ou liaison à grande distance), il est nécessaire d'utiliser un récepteur mobile (avion, bateau, drone, téléphone mobile, satellite...). Pendant ces dernières décennies, les télécommunications sans fil ont connu un essor considérable dans le monde. Il est maintenant plus rapide et plus économique d'utiliser des réseaux sans fil que d'installer des infrastructures filaires pour couvrir une zone géographique donnée.

Cet essor fulgurant des systèmes de télécommunications sans fil (qui a toujours été affecté par les besoins de l'être humain dans chaque période de l'histoire) est principalement dû aux différentes inventions connues à travers les temps et que nous allons présenter brièvement suivant leur ordre d'apparition.

I.6.1 Le télégraphe

En 1837, M. Morse invente un alphabet télégraphique. Le mot télégraphe est composé de deux mots (télé : loin à distance, graphe : Ecrire du Grec). C'est donc un système destiné à transmettre des messages d'un point à un autre sur des grandes distances, à l'aide d'un code.

Au début, le télégraphe était composé de trois mâts reliés par une poutre transversale située sur des hauteurs (tour) pour former des symboles, manuellement, par un opérateur (télégraphiste). L'opérateur surveillait la tour précédente et la suivante, au travers de deux lunettes situées de façon opposée, l'une par rapport à l'autre.

Le développement de l'électricité fit naître le premier télégraphe électrique où un véritable alphabet était utilisé, le code Morse.

Exemple : SOS : ...---...

Signification : *Save Our Souls*. C'est un signal de détresse et d'assistance.

Dans les figures I.5 et I.6, nous présentons respectivement, la photo d'une machine de l'alphabet Morse et l'arbre de décision de la partie alphabétique du code Morse. La machine, placée à chaque extrémité, est constituée d'un émetteur, d'un récepteur et d'une ligne électrique reliant deux points. L'émetteur est manipulé manuellement.

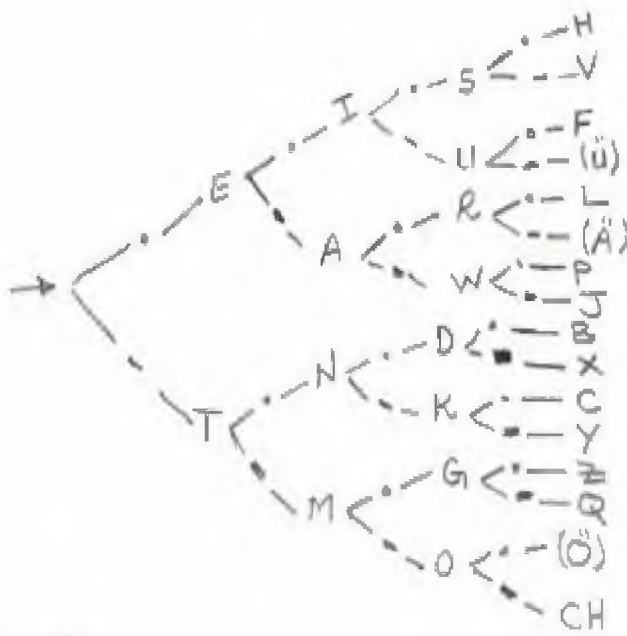


Figure I. 5 : Machine de l'alphabet Morse.

Source : educalingo.com/fr/dic-en/morse-alphabet

Code morse international

1. Un tiret est égal à trois points.
2. L'espacement entre deux éléments d'une même lettre est égal à un point.
3. L'espacement entre deux lettres est égal à trois points.
4. L'espacement entre deux mots est égal à sept points.



A	· —	U	· · —
B	· · ·	V	· · — —
C	· — —	W	· — — —
D	· — ·	X	· — · —
E	·	Y	· — — ·
F	· · —	Z	· — — —
G	· — · —		
H	· · · ·		
I	· ·		
J	· — — —		
K	· — —		
L	· — · —		
M	· — —		
N	· —		
O	— — —		
P	· — — ·		
Q	· — — —		
R	· — ·		
S	· · ·		
T	—		

1	· — — — —
2	· · — — —
3	· · · — —
4	· · · · —
5	· · · · ·
6	· — — — ·
7	· — — · ·
8	· — · — ·
9	· — — — ·
0	— — — — —

Figure I. 6 : Arbre de décision de la partie alphabétique du code Morse.

I.6.2 Le téléphone

En 1876, l'américain Alexander Graham Bell dépose son invention concernant un moyen de transmission électrique de la voix humaine à l'aide d'une résistance variable, connu sous le nom de téléphone (Fig. I.7). Cela fut suivi par plusieurs améliorations du téléphone de

Bell (comme l'invention du microphone à charbon en 1878...) avant d'arriver au développement actuel du téléphone que l'on connaît.

La figure I.8 présente le schéma électrique d'une ligne téléphonique composée de :

- Deux postes téléphoniques (Emetteur/ Récepteur).
- Une ligne bifilaire acheminant les signaux (paire torsadée).
- Une source d'énergie E (fournie par une batterie centrale) qui alimente les deux postes.

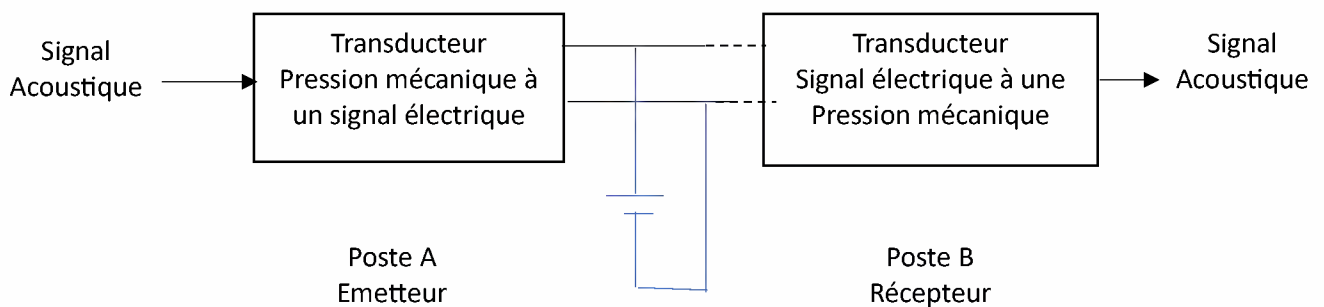


Figure I. 7 : Schéma électrique d'une ligne téléphonique.

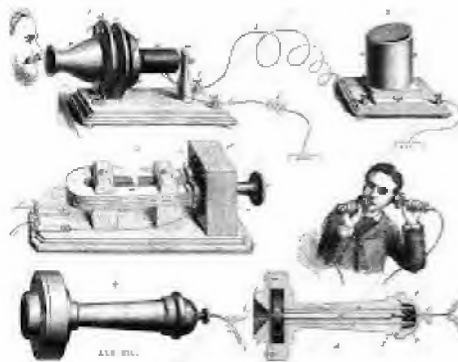


Figure I. 8 : Le téléphone de Bell en 1877.

Source : www.sciencephoto.com/media/814008/view/bell-s-telephone-system-1877

Le téléphone mobile a connu une amélioration grande et continue d'une version à l'autre jusqu'à ce jour. (Fig. I.9)



Figure I. 9 : Evolution de la téléphonie fixe d'une version à une autre.

I.6.3 Le télégramme

On peut définir un télégramme comme un télégraphe sans fil. En 1901, Marconi transmet un télégramme, à l'aide d'une onde électromagnétique, de l'Angleterre aux états unis. Envoyé par Sandford Fleming au Lord Minton (ministre des affaires étrangères), en 1902, ce fut le premier télégramme à faire le tour du monde (Fig. I.9).

FIRST WORLD-CIRCLING TELEGRAPH MESSAGE
 The message delivered to His Excellency Lord Minto at Government House, Ottawa, Nov. 1st, 1902,
 after circling the globe.

Canadian Pacific Railway Company's Telegraph
 All messages taken by this Company are subject to the conditions printed on our Form 1.

10. RA. MD. RO. (39 Words) 8.35 A.M.
 (via Commercial Eastern Australia Pacific)

To Governor General,
 Ottawa.

Receive globe encircling message via England,
 South Africa, Australia and Pacific Cable congratulating
 Canada and the Empire on completion of the first segment
 state controlled electric girdle the harbinger of incal-
 culable advantages, national and general.

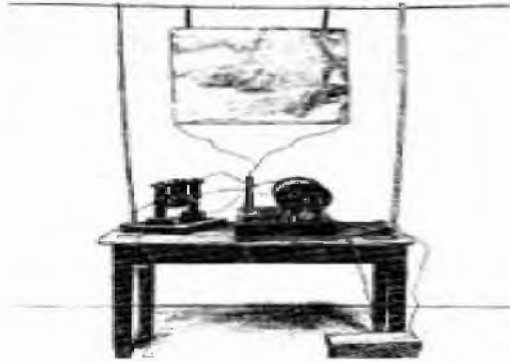
From Ottawa, Oct. 31st, 1902 Sandford Fleming.

Figure I. 10 : Le premier télégramme qui fait le tour du Monde.

Source: A History of telegraphy book.

I.6.4 La radio

En 1895, Marconi utilise l'invention de Hertz (Fig. I.11) comme émetteur et le cohéreur de Branly (Fig. I.12) comme récepteur et profite de réaliser la première radio, avec une portée de plus de trois kilomètres.



Marconi
(1874 – 1937)
Italie

Figure I.11 : Une réplique du premier émetteur sans fil de Marconi tel qu'il l'a utilisé en 1895. Source: *The Early History of Radio from Faraday to Marconi*



Figure I.12 : Cohéreur de Branly.

Le cohéreur de Branly est constitué d'un tube de verre à vide (d'environ 3mm de diamètre) dans lequel sont introduits deux pistons métalliques (distants de 1 mm). Les bouchons en argent agissent comme des bornes électriques et enferment la limaille métallique (Marconi a préféré un mélange de nickel et d'argent).

Quelques années plus tard, en 1933, Armstrong invente la radio FM.

I.6.5 La télévision

En 1929, la BBC émet les premières images en noir et blanc sous forme d'ondes électromagnétiques (mais de mauvaise qualité). Depuis, la télévision n'a cessé d'évoluer jusqu'à ce jour (Fig. I.13).



Figure I. 13 : *Evolution de la télévision*

Source : experttvvideo.com/tv-antique.html

I.6.6 Le radar

Le radar fut inventé par Robert Watson en 1935. Le mot RADAR est l'abréviation de la notation anglaise *RADio Detection And Ranging*.

On peut considérer le radar comme un système de télécommunication spécifique qui utilise les ondes électromagnétiques réfléchies pour détecter les cibles (des avions, des navires, des missiles et d'autres objets) (Fig. I.14). Grâce au radar, on peut déterminer la portée d'une cible, sa direction sa vitesse, sa taille et même sa matière, en utilisant les caractéristiques de l'onde réfléchie comme suit :

- ❖ La portée ou Range (à partir du retard τ du signal).
- ❖ La vitesse (en utilisant l'effet Doppler).
- ❖ La direction (qui est celle du lobe principal de l'antenne).
- ❖ La taille de la cible (qui est fonction de l'amplitude du signal de retour).
- ❖ La matière de la cible.

La plupart des radars sont utilisés dans des applications militaires, mais il existe d'autres domaines d'applications tels que les services maritimes et l'aviation civile. Il y a aussi le contrôle de la circulation dans les autoroutes ; la police utilise le radar pour la détection des excès de vitesse des véhicules.

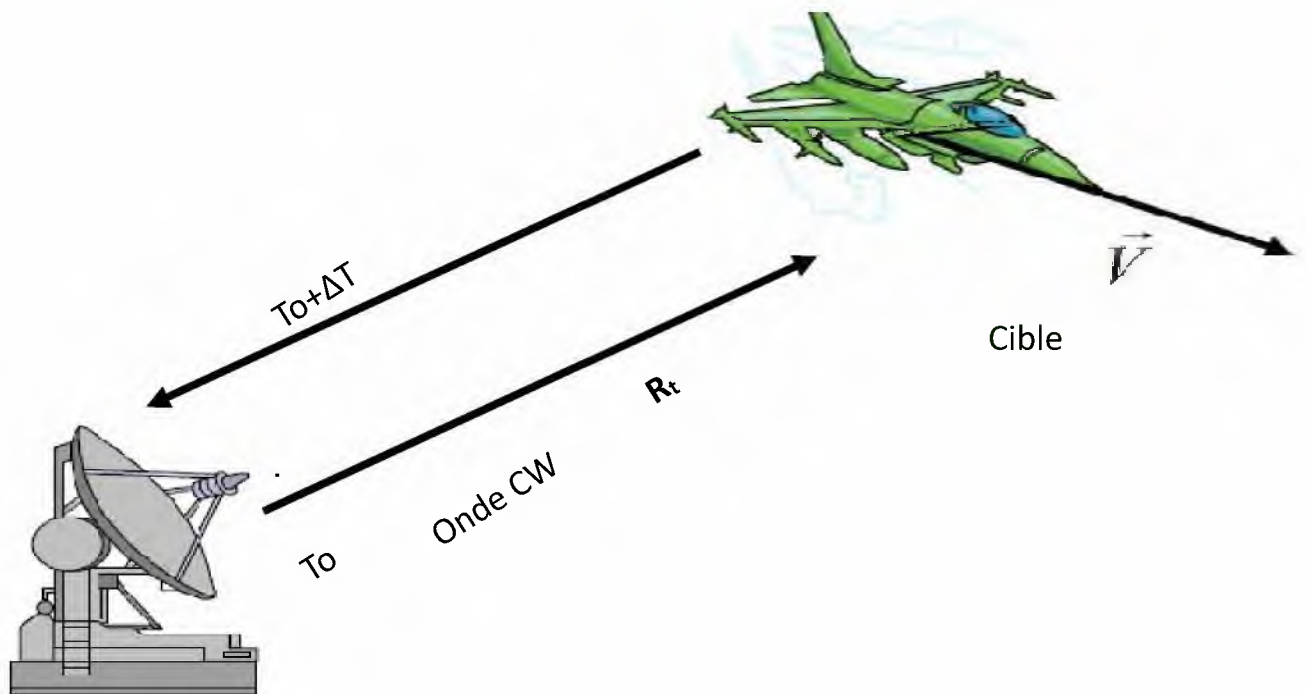


Figure I. 14 : *Le principe d'un système radar.*

I.6.7 Les satellites

Les satellites encerclent la terre sur différentes orbites selon le type d'application (télésurveillance, télédétection, navigation, télécommunications, métrologique, télévision...). Dans la figure I. 15, nous présentons l'exemple du satellite Algérien de télécommunications Alcomsat 1, lancé en 2017.



Figure I. 15 : *Le satellite Algérien Alcomsat 1 de télécommunications (lancement à la fin de l'année 2017).*

I.6.8 Le téléphone mobile

L'évolution des téléphones du réseau mobile (Fig. I.16) peut être résumée comme suit :

- La première génération de téléphonie mobile (1G), avec des normes de télécommunications analogiques, est apparue dans les années 1980 et a été utilisée jusqu'à 1991.
- Le réseau de deuxième génération (2G), première norme de téléphonie cellulaire numérique GSM (Global System for Mobile Communication), a officiellement vu le jour en 1991 et a connu un grand succès.
- La technologie de téléphonie mobile de troisième génération (3G), basée sur la technologie WCDMA, fit son apparition en 2001. Elle succède à la 2G et offre des débits plus élevés, permettant un accès plus rapide à internet.
- En 2010, la 3G cède sa place à la **quatrième génération** de réseaux mobiles, désignée aussi par LTE (Long Term Evolution). Ce réseau permet une navigation bien plus rapide qu'avec la 3G, grâce à des temps de charge et de réaction très courts.
- L'année 2020 a connu l'apparition de la cinquième génération 5G IoT (Internet of Things), qui **exploite également la technologie LTE**. La principale différence entre la 5G et la 4G se situe au niveau de la qualité de la connexion internet et un téléchargement plus rapide. A titre d'exemple, le temps de téléchargement d'un film HD qui est de plus de 3 minutes avec la 4G n'est plus que de 10 secondes avec la 5G.



Figure I. 16 : Evolution des téléphones du réseau mobile.

I.6.9 Les applications des systèmes de télécommunications

L'évolution des différents systèmes de télécommunications est accompagnée par l'apparition de plusieurs applications et services (Fig. I.17) tels que la transmission par infrarouge IR, Bluetooth, WIFI, WLAN, LIFI, zigbee...

Chaque application a un protocole de communication spécifique (tels que les normes IEEE, RC5, NEC...). Ces applications permettent de relier plusieurs appareils électroniques et informatiques en utilisant les ondes électromagnétiques (radio, lumière, infrarouge).



Figure I. 17 : Applications et services liés par les systèmes de télécommunications.

I.6.10 L'internet

L'internet est considéré comme un échange de données via un modem d'un réseau téléphonique (Fig. I.18).



Figure I. 18 : Un modem de la société nationale Algérie Télécom.

I.6.11 Les téléphones satellitaires

Contrairement à un téléphone mobile classique qui utilise le réseau GSM fonctionnant via des antennes-relais terrestres, un téléphone satellitaire (Fig. I.19) utilise un réseau de satellites de télécommunications.

La téléphonie satellitaire est un système similaire au réseau mobile terrestre (GSM), mais qui utilise des satellites (66 en service +06 en réserve) au lieu des stations de base BTS/Node B pour les nouvelles générations. Ces satellites sont à des hauteurs très basses (780 Km) par rapport aux autres types de satellite et servent à couvrir la terre (Fig.I.20).

Ce système de télécommunications est généralement utilisé dans des régions mal desservies par les relais GSM terrestres (zones faiblement peuplées ou inhabitées, bateaux au large des côtes...). Il existe plusieurs réseaux de téléphonie satellitaire tels que : Thuraya, Inmarsat, Iridium, Globalstar...



Figure I. 19 : *Un téléphone satellite Thuaraya de la marque Thuraya XT-Pro.*

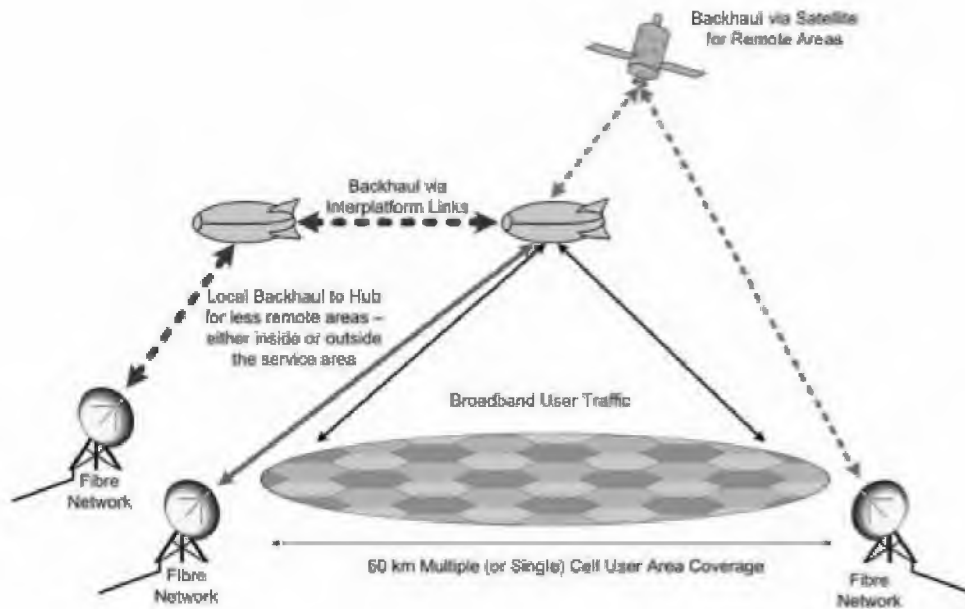


Figure I. 20 : Architecture cellulaire de la téléphonie satellitaire.

Source: *Broadband Communications via High-Altitude Platforms* by D. Grace, M. Mohorcic.

Ce système utilise deux bandes de fréquence (Fig. I.21) :

La bande L : 1.6 MHz pour la liaison utilisateur-satellite.

La bande K : 23 GHz pour la liaison satellite-satellite.

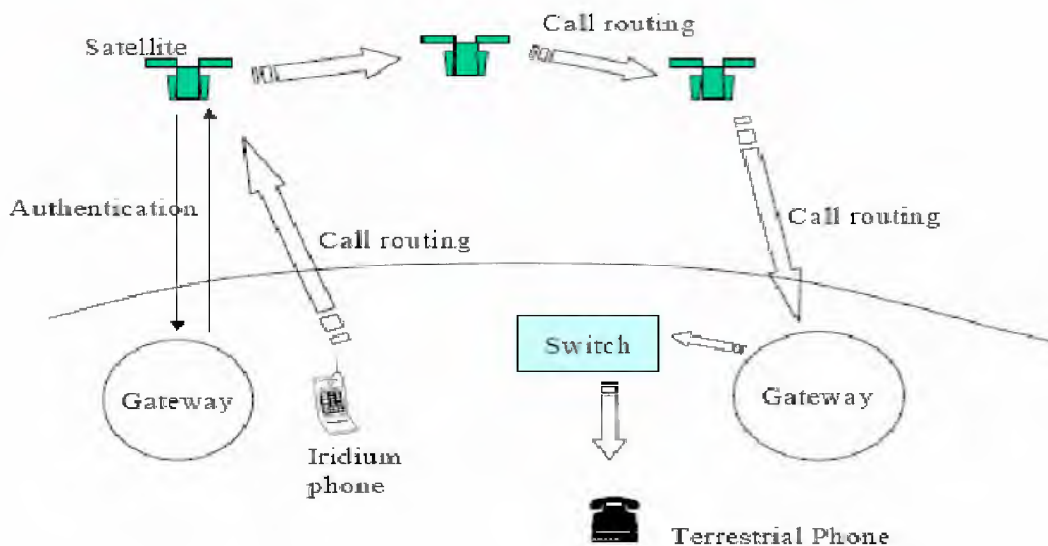


Figure I. 21 : Un système de la téléphonie satellitaire.

Source : www.tutorialsworld.com/satellite-phones/satellite-phones-2.htm

Les techniques de multiplexage utilisées sont FDMA et TDMA avec une vitesse de 9.6 Kbits/sec.

L'avantage principal de ce type de communication est que les utilisateurs peuvent communiquer entre eux même aux endroits les plus inaccessibles, au réseau GSM, à travers le monde (avion, bateau...). De même, cette technologie permet d'accéder aux services de secours, en zone non couverte par les réseaux cellulaires terrestres (zone polaire, désertique, ou lors des catastrophes naturelles...).

I.7 Conclusion

Le nombre des services de télécommunications est devenu tellement élevé qu'on ne peut pas tous les citer dans ce chapitre. Ces services sont quasiment présents dans toute notre vie quotidienne ; ils sont devenus une partie de notre vie.

CHAPITRE II :

SYSTEMES DE COMMUNICATIONS

II.1 Introduction

II.2 Représentation d'un signal

II.3 Pourquoi le spectre ?

II.4 Classification des signaux

II.5 Modes de transmission

II.6 Notion de bruit

II.7 Problèmes et exercices



Un signal est une variation d'une grandeur physique quelconque telles qu'une tension électrique variable, une intensité lumineuse variable, une pression atmosphérique variable (voix de l'être humain). Ce signal peut porter l'information.

SYSTEMES DE COMMUNICATIONS

II.1 Introduction

Un signal est une variation d'une grandeur physique quelconque telles qu'une tension électrique variable, une intensité lumineuse variable, une pression atmosphérique variable (voix de l'être humain), ...

Ce signal peut porter l'information.

Exemple :

- *Signal acoustique (sonore)* : fluctuation de la pression de l'air transportant un message (information) à notre oreille.
- *Signal visuel* : onde de lumière transportant une information à notre œil (image : on distingue deux types ; image fixe et une autre animée (vidéo)).
- *Onde électromagnétique* : Dans notre domaine de télécommunications, le signal est un phénomène EM qui porte une information via un canal (support physique) pendant leur propagation.

II.2 Représentation d'un signal

Le signal est représenté par une fonction d'une ou plusieurs variables où l'allure de ceci est connue à l'aide de sa répartition temporelle (en fonction du temps).

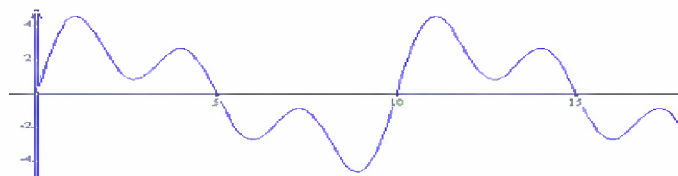


Figure II.1 : Allure d'un signal $s(t)$ dans le domaine temporel.

Mais pour les signaux qui varient très rapidement, une autre représentation s'avère indispensable (cas d'un signal réel : son) par ce que n'est pas possible d'analyser ce genre de signaux temporellement. Cette représentation est le spectre.

II.3 Pourquoi le spectre ?

Pour une utilisation précise d'un signal donné, il y a lieu de connaître sa position spectrale. Il existe plusieurs outils mathématiques qui sont utilisés pour faire le passage d'un espace temporel à un espace fréquentiel ou spectrale, parmi ces outils indispensables, on trouve la transformée de Fourier et de Laplace.

Exemple 01 : on a le besoin de transmettre un signal via un canal (qui a le rôle d'un filtre) vers une destination. Il faut connaître les différentes fréquences que contient ce signal.

L'effet du canal (choix du canal)

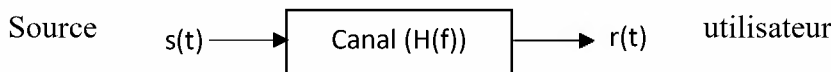


Figure II.2 : Schéma bloc d'un canal de transmission.

La réponse du canal $H(f)$ est indispensable.

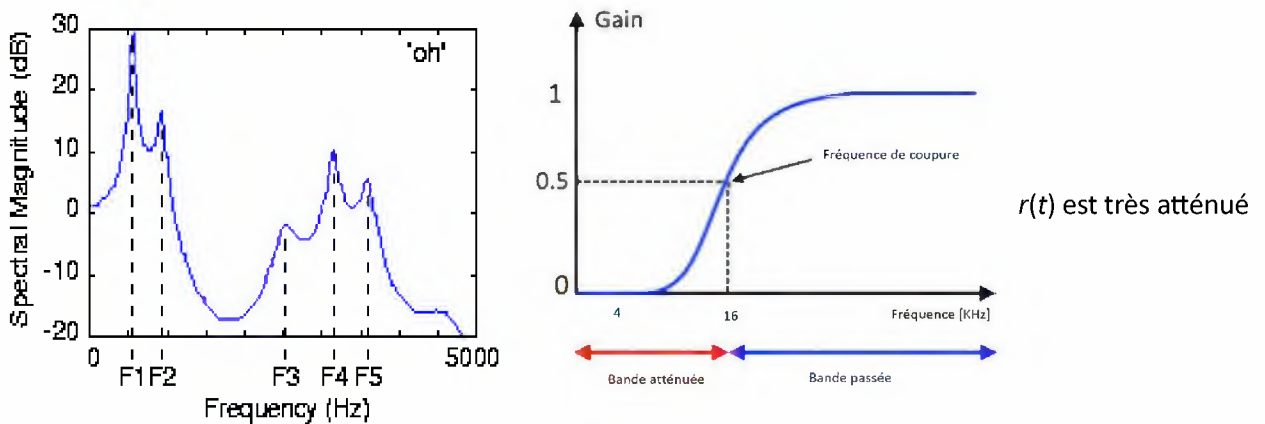


Figure II.3 : Transmission en bande de base et en modulation.

On peut dire qu'on a un mauvais choix du canal

Alors, il faut faire une adaptation entre le signal à transmettre et le canal utilisé.

Dans le cas de la parole, le canal doit se comporter comme un filtre passe bande de bande 300Hz- 4000 Hz.

Dans un système de télécommunication, le canal peut être

1. L'air (voie Hertzienne)
2. Paire de câbles (téléphonique)
3. Cable coaxial (TV)
4. Fibre optique (plusieurs utilisations)

Exemple 02 : Soit le signal sinusoïdal suivant : $s(t) = V_m \cdot \cos(2\pi f_s \cdot t)$

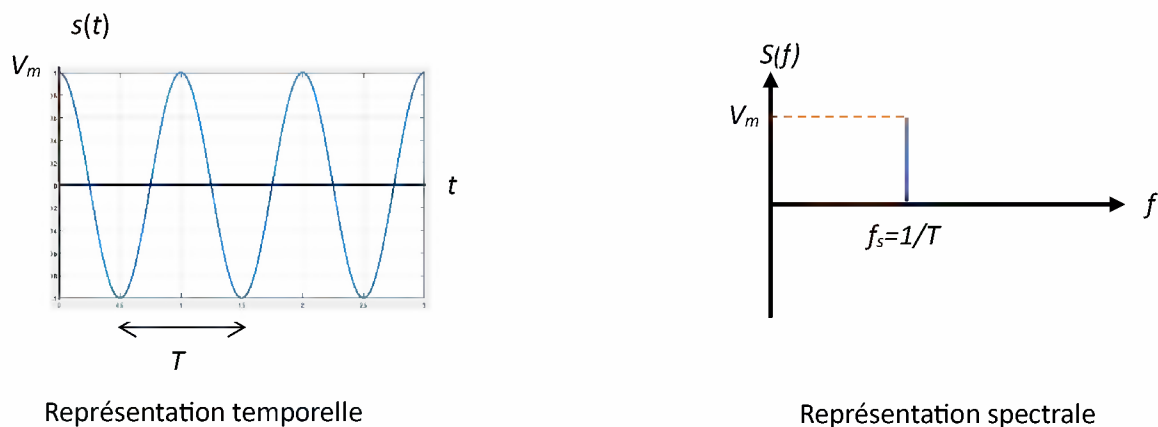


Figure II.4 : Représentation d'un signal sinusoïdal.

Donc, pour transmettre ce signal le canal doit avoir une bande passante qui contient la raie spectrale f_s .

II.4 Classification des signaux

Les signaux peuvent être classés en plusieurs classifications.

➤ *Signaux déterministes ou aléatoires*

1. *Signaux déterministes* : ils se divisent de même en deux types

1.1 *Analogique* : Amplitude et temps continus, c'est-à-dire une image exacte aux informations à transmettre.

1.2 *Numérique* : Amplitude et temps discrets, il y a un passage de l'information par un convertisseur analogique/Numérique.

2. *Signaux aléatoires* : ils permettent de mieux représenter les signaux réels. Pour étudier ce type des signaux, on utilise la théorie de probabilité et processus aléatoire.

Autre classifications, telles que

- A puissance finie ou à Energie finie
- Réels ou complexes
- Périodiques ou non périodiques : la transformée de Fourier pour les deux cas. On considère un signal apériodique (non périodique) comme un signal périodique avec une période T tend vers l'infinie.

II.5 Modes de transmission

La transmission d'un signal est une opération qui consiste à transmettre un signal, message, porteur d'une information via un canal vers une destination. De même que celle existe dans la classification des signaux, plusieurs types ou modes auront lieu.

II.5.1 Transmission analogique et autre numérique

Si le paramètre significatif du signal transmis (tension, puissance, amplitude, fréquence, ...) est une fonction continue du temps, reliée linéairement à l'information analogique à transmettre, on parle donc à une transmission analogique.

En transmission numérique, il s'agit de transmettre des nombres de bits (des données codées, signal analogique échantillonné puis numérisé)

II.5.2 Transmission en bande de base et autre en modulation

Quel que soit le type de la transmission analogique ou numérique, elle est dite en bande de base lorsque le signal est transmis dans sa bande originale (sous sa forme initiale) éventuellement après une transformation linéaire (amplification, filtrage).

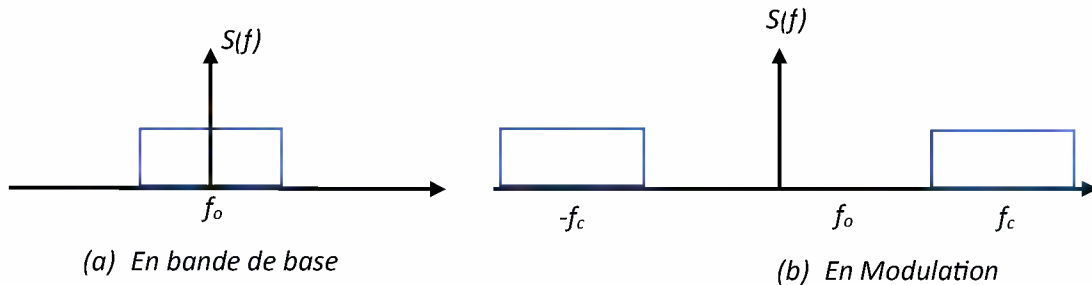


Figure II.5 : Transmission en bande de base et en modulation.

La bande de fréquence originale peut contenir la composante continue.

Exemple : soit le signal de la répartition suivante

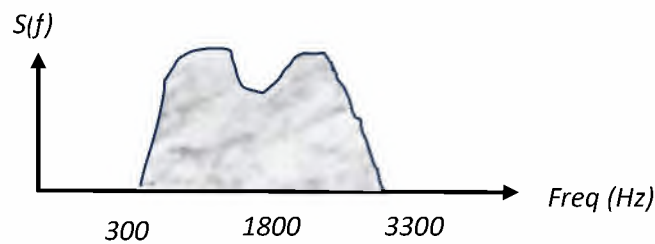


Figure II.6 : Spectre d'un signal BF.

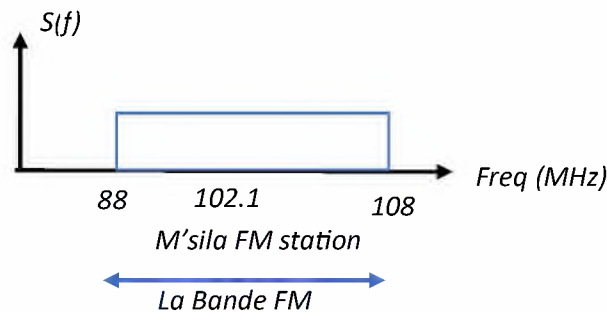
Dans la transmission en bande de base, la largeur de bande relative « B_r » est relativement grande. Où B_r est donnée par :

$$B_r = \frac{3300 - 300}{1800} = 1.67$$

❖ Problème de sélectivité (réception radio)

Dans certain cas, l'onde radio ne se propage correctement seulement si elle occupe une largeur de bande relativement étroite.

On prend le cas d'un signal FM. La bande radio FM allant de 88 MHz à 108 MHz.



$$B_r = \frac{108 - 88}{102.1} = 0.19$$

En plus, les fréquences très basses connues des distorsions et la composante continue est souvent coupée (isolement électrique).

La translation de ce signal vers des fréquences très hautes est plus que nécessaire, ce qu'on appelle la technique de **modulation**.

II.5.3 Transmission synchrone et autre asynchrone

Dans la transmission synchrone, le signal est rythmé par une horloge qui n'est pas transmise, mais qu'on peut la reconstituer au niveau de réception (circuit de récupération d'horloge). Dans la transmission numérique, le signal émis doit contenir des séquences de synchronisation permettant de retrouver le rythme des octets et des trames.



Figure II.7 : *Transmission synchrone.*

La transmission est dite « asynchrone » lorsque les différents caractères sont séparés par des silences de durées aléatoires. Chaque caractère est encadré par des impulsions de début et de fin afin d'éviter la confusion.



Figure II.8 : *Transmission asynchrone.*

II.5.4 Classification concernant la liaison émetteur/ récepteur

La liaison de transmission dans un système de télécommunication est conçue suivant les besoins comme le suivant :

- ❖ Simplex : transmission dans une seule direction (unidirectionnel)

On n'a pas le besoin de répondre à ce signal (réception). C'est le cas de la transmission TV et Radio.



Figure II.9 : Centre télédiffusion Algérie TDA.

- ❖ Half-Duplex : Transmission alternative dans les deux directions mais pas simultanément (en même temps).



Figure II.10 : Un système Half-duplex.

- ❖ Full-Duplex : transmission dans les deux sens simultanément (en même temps). C'est le cas de la téléphonie fixe et mobile.
- ❖ Full-Full-Duplex : Transmission dans plusieurs directions. On prend le cas d'un service réseau (PTT).

II.5.5 Classification concernant la topologie

- ❖ *Point à point* : Transmission entre une seule paire de stations

Ce type de communication est existé où les stations de base sont fixes et les antennes de liaison sont dirigées les unes vers les autres (visibilité ou line of site LOS).

- ❖ *Avec un intermédiaire* : Transmission entre deux stations mais à cause de la non-visibilité (NLOS : non line of site), on a le besoin de tacler ces problèmes d'environnement en utilisant des relais pour faire la rediffusion.

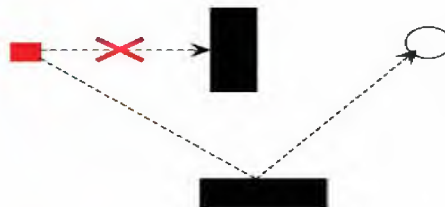


Figure II.11 : Transmission NLOS.

II.5.6 Transmission à commutation de paquet et de circuit

❖ *Transmission à commutation de circuits*

Dans ce système de commutation, une connexion entre deux utilisateurs (dans le même réseau) est faite jusqu'à la fin de la communication entre ces deux utilisateurs. Les ressources du réseau sont réservées seulement pour ces deux utilisateurs jusqu'à la fin de connexion où des autres utilisateurs peuvent utiliser ces ressources du réseau après (chemin).

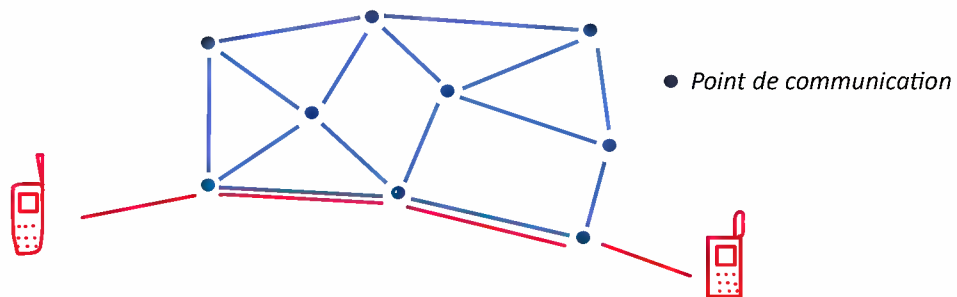


Figure II.12 : *Système à commutation de circuits.*

Il y a trois phases pour ce type de communication :

- Construction d'un circuit pour faire la connexion.
- Transfert des données.
- Déconnexion pour libérer les canaux physiques.

N.B : Ce système présente le problème de congestion (cas d'un réseau mobile : numéro occupé)

❖ *Transmission à commutation de paquets*

Ce système de commutation est amélioré par rapport au premier (commutation de circuit). Ce système permet de partager les ressources du réseau entre plusieurs utilisateurs simultanément. Le message est découpé en nombre de paquets (information + entête).

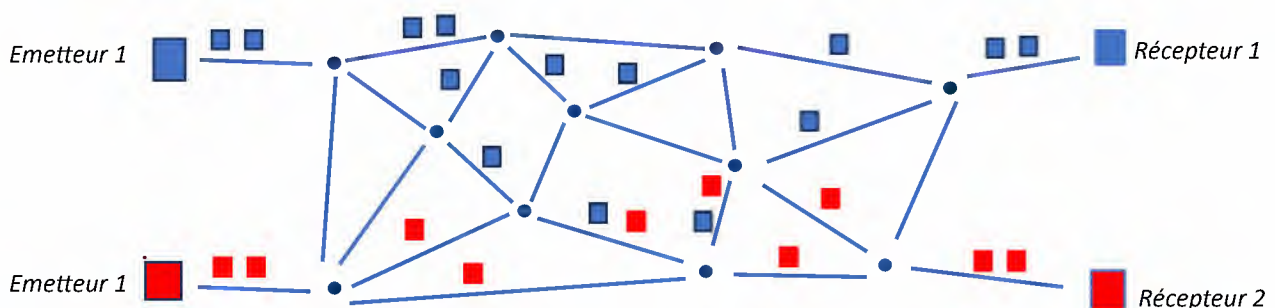


Figure II.13 : *Système à commutation de paquets.*

Dans le message, chaque paquet contient les adresses de la source, du destinataire et le numéro d'ordre dans la séquence pour éviter le chevauchement avec les autres paquets des autres utilisateurs.

Au niveau de réception, les différents paquets sera réarrangés suivant leurs ordre (numéro d'ordre) pour former le message correctement.

II.6 Notion de Bruit

Le bruit est un signal non déterministe qui s'ajoute à un signal informatif (additif) et perturbe l'extraction de l'information au niveau de récepteur (non désiré en télécommunications).

Généralement, le bruit est considéré non-corrélé, pour tous les cas, avec tous les autres signaux.

Le bruit peut être minimisé mais pas possible de l'éliminer (intrinsèque aux composants, à l'opération des circuits et à l'univers).

II.6.1 Sources de bruit

Nature :

- **Bruit thermique**

On peut le modéliser par

$$P_{th} = 4 \cdot k \cdot T \cdot B$$

Avec P_{th} est la puissance thermique

K est constante de Boltzmann, $K=1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T est la température en K,

B est la bande de fréquence en Hz

- **Bruit de Grenaille**
- **Bruit galactique (Galaxy)**

Industrie :

- **Les parasites** (lignes de transport)
- **Les interférences EM** (à partir des autres systèmes)
- **Intermodulation** (éléments Non-linéaires)

Dans le domaine RF, on modélise les deux types de bruits thermiques et de Grenailles.

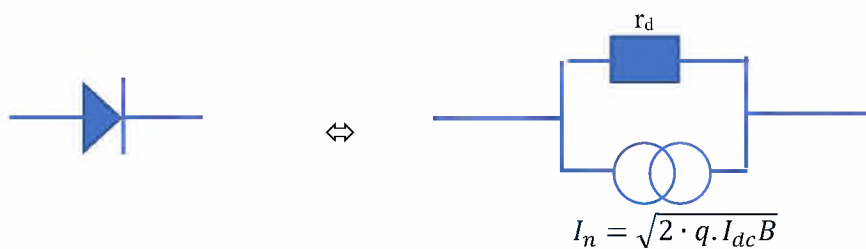
Le bruit thermique : une résistance R peut être modélisée comme une source de bruit thermique.

Son modèle



Le bruit de Grenaille : Il est généré dans les jonctions semi-conducteurs (diode, transistor, ...).

Son modèle



Avec $r_d = \frac{kT}{q I_{dc}} = \frac{26mV}{I_{dc}}$ la puissance thermique

r_d est la résistance dynamique de la diode,

$q=1.6 \cdot 10^{-19} C$

I_{dc} est le courant polarisation en A,

B est la bande de fréquence en Hz

II.6.2 Densité spectrale de bruit

La densité spectrale de bruit est exprimée en [W/Hz], [V²/Hz] ou [A²/Hz].

Elle définit le bruit en indépendance de la largeur de bande de système.

- Pour le bruit thermique, la densité spectrale est donnée par

$$S_{th} = 4kTR \text{ en [V}^2/\text{Hz]}$$

- Pour le bruit de Grenaille, la densité spectrale est donnée par

$$S_{Gr} = 2qI_{dc}, \text{ en [A}^2/\text{Hz]}$$

II.7 Problèmes et exercices

Exercice 01

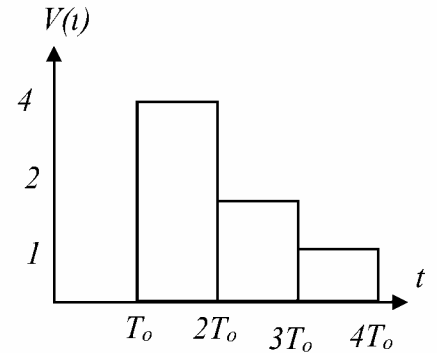
On considère la fonction suivante $f(t) = A [u_0(t + 3T) - u_0(t + T) + u_0(t - T) - u_0(t - 3T)]$

- a. Représenter $f(t)$.
- b. Calculer la transformé de Fourier correspondante $F(j)$.

Exercice 02

On considère la fonction $V(t)$ de la forme suivante

- a. Donner une expression mathématique de de cette fonction $V(t)$.
- b. Calculer la transformé de Fourier correspondante $V(j)$.



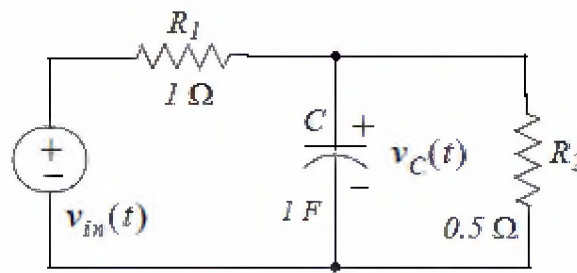
Exercice 03

Calculer la transformée de Fourier suivante

$$\mathcal{F} \{te^{-at}u_0(t)\} \quad a > 0$$

Exercice 04

Soit le circuit électrique suivant

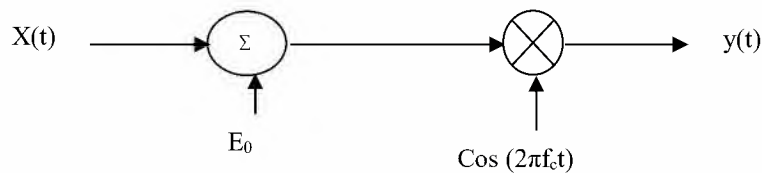


$$v_{in}(t) = 50 \cos 4t u_0(t)$$

- a. En utilisant la transformée de Fourier, calculer $V_c(i)$.

Exercice 05

Soit le modulateur AM représenté par la figure suivante



- a. Donner l'expression de $y(t)$ en fonction de $x(t)$ et E_0 .
- b. Déduire la transforme de Fourier $Y(f)$. Si $x(t) = \sin(2\pi f_0 t)$, déterminer $Y(f)$.

CHAPITRE III

TECHNIQUES DE TRANSMISSION ANALOGIQUES

III.1 Généralités

III.2 Technique de Modulation

III.3 Principe de la modulation AM et ses différents types

III.4 Procédé de la modulation AM

III.5 Modulation FM

III.6 Conclusion

III.7 Problèmes et exercices



La modulation est la technique qui nous permet de transmettre et recevoir, à des longues distances, des signaux (voix, images, vidéo ou de signes) via un canal (fil, sans fil, optiques ou autres systèmes électromagnétiques).



TECHNIQUES DE TRANSMISSION ANALOGIQUES

Objectif :

Ce chapitre est le premier des deux chapitres qui sont consacrés aux techniques de modulations analogiques. L'étudiant va apprendre les concepts de base de la modulation d'amplitude AM et FM et la circuiterie des différents types de modulateurs. A la fin du chapitre, l'étudiant doit avoir une bonne idée sur

- ✓ L'importance de la modulation dans le domaine de télécommunication
- ✓ Les différents types de la modulation AM (AM-P, BLU, ...)
- ✓ Les modulateurs AM (en anneau, ...)
- ✓ Les différents types de la modulation FM (NBFM, WBFM)
- ✓ Les modulateurs FM.

III.1 Généralités

On utilise le mot « modulation » au changement de la forme d'une onde EM signal HF « porteuse » $p(t)$, suivant les caractéristiques d'une autre onde appelée le signal modulant ou signal « message » $m(t)$. Généralement, le signal porteur $p(t)$ est un signal sinusoïdal.

Les trois paramètres, qui seront variés, sont l'amplitude, la fréquence et la phase de ce signal sinusoïdal $p(t)$.

Avant d'aborder les différents types de la modulation analogiques, on va voir la nécessité d'un système de télécommunications à cette technique.

III.2 Technique de Modulation

On peut poser la question suivante : Est-ce qu'il y a une possibilité de transmettre un signal BF en bande de base (original) directement vers un récepteur situé dans le lointain via le canal de transmission ?

III.2.1 La nécessité de la modulation

III.2.1.1 Pour une antenne de taille réduite

D'après les conditions des rayonnements, les dimensions physiques d'une antenne émettrice doivent être de l'ordre $\lambda/10$ - $\lambda/4$ où λ est la longueur d'onde de signal à rayonner.

On peut prendre l'exemple d'un signal $m(t)$ audible (la parole). Le signal $m(t)$ est de fréquence 0.3- 3.4 KHz.

La longueur d'onde correspondante $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^3} = 10^5 \text{ m}$, c'est-à-dire, $\lambda = 100 \text{ Km}$.

Alors, la longueur nécessaire de l'antenne émettrice $L = \frac{\lambda}{4} = 25 \text{ Km}$ (Impossible de la concevoir).

Donc, pour avoir un rayonnement efficace, une translation d'un signal en bande de base à une bande étroite ou à bande passante est sera (la translation vers des bandes HF) plus que nécessaire, cette translation est connue par la technique de modulation.

III.2.1.2 Pour faciliter le rayonnement

Soit l'exemple d'une antenne opérationnelle à une fréquence de 1 MHz, l'utilisation de la modulation donne un étalement dans le spectre d'un 40 KHz. C'est à dire, de (1000-20) à (1000+20) KHz.

Alors, l'antenne peut, facilement, englober la gamme de fréquence (*Narrow band pass signal*).

III.2.1.3 Pour une transmission efficace

La majorité des services sans fils ont une bande propre. Pour une transmission efficace, un décalage du spectre de message (*shift*) est très nécessaire vers la bande de service demandé. Cette translation sera faite par la technique de modulation.

III.2.1.4 Pour le multiplexage

Plusieurs signaux peuvent être transmis dans un canal (dans le même service) en attribuant pour chaque signal une fréquence spécifique dans la bande du canal.

Exemple : le signal radio AM, radio FM, ...

Radio AM : la bande utilisée : 540 KHz-1605 KHz

Radio FM : la bande utilisée : 88 MHz-108 MHz

Pour la radio AM : si la bande de transmission du signal peut prendre 10 KHz, donc il y a la possibilité de multiplexer 110 signaux différents. Ce multiplexage sera assuré par la technique de modulation (chaque message, dans le canal, a une porteuse propre).

III.2.1.5 Pour une haute qualité de transmission

La technique de modulation (surtout la modulation non-linéaire : FM & PM) permet d'améliorer le rapport signal à bruit (S/B) au niveau de réception.

Au lieu d'augmenter la puissance de transmission, on augmente la bande de transmission en utilisant la technique de modulation.

III.2.2 Modulation avec une porteuse sinusoïdale

Généralement, les types de transmission (analogiques et numériques) se répartissent principalement en deux catégories : la transmission en bande de base (modulation par impulsion) et transmission par modulation avec porteuse sinusoïdale. Parmi les modulations en bande de base, on peut citer la modulation d'impulsions en amplitude *FAM*, la modulation delta et la modulation à impulsion codée (*MIC* ou *PCM* en anglais pulse modulation) qui sont très utilisées dans les systèmes de communications filaires (transmission chez Algérie Télécom, Ethernet, ...)

Pour la modulation avec porteuse sinusoïdale, elle est très utilisée dans la communication radio. L'idée de base de ce type de modulation est de faire varier l'un des paramètres d'un signal sinusoïdal HF (amplitude, fréquence ou phase) au rythme d'un autre signal modulant BF. La majorité des modulations prennent la forme générale suivante

$$S_{RF}(t) = A(t) \cdot \cos[2\pi f_c t + \Phi(t)]$$

avec, $A(t)$ est l'amplitude instantanée, $\Phi(t)$ est la phase instantanée alors que f_c est la fréquence de la porteuse sinusoïdale.

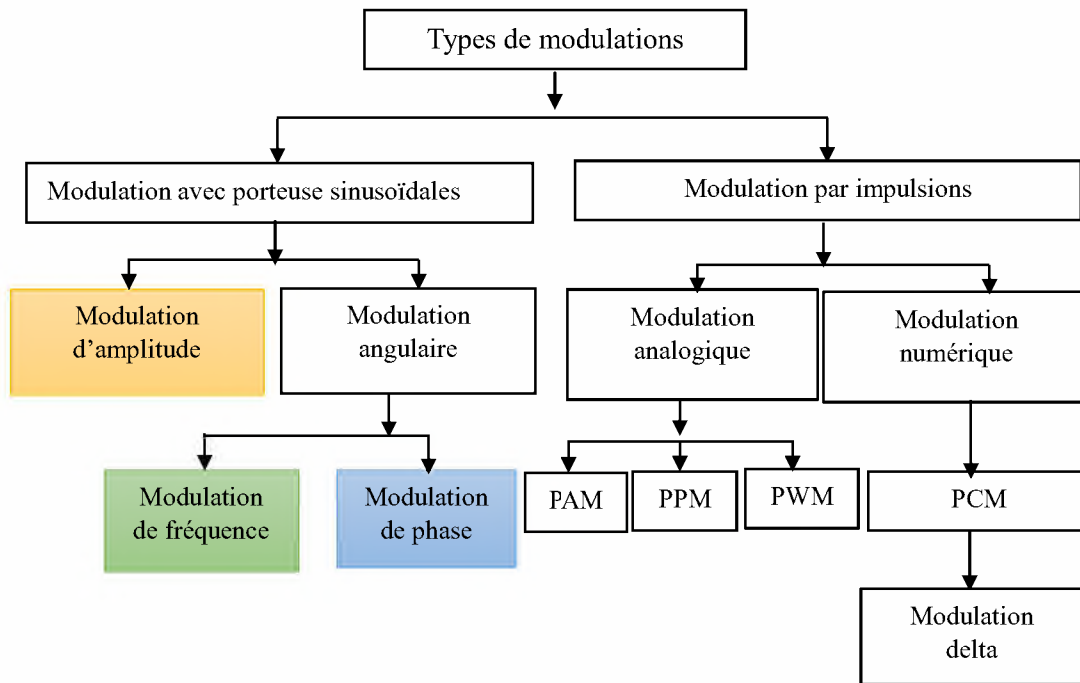


Figure III.1 : Schéma bloc montrant la classification de des différents types de modulation.

Les modulations analogiques avec porteuse sinusoïdale sont tabulées dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : classification des différentes modulations analogiques avec porteuse sinusoïdale.

Modulation	$A(t)$	$\Phi(t)$	Classifications
AM	$A_c [1+k_a m(t)]$	0	Linéaire
AM-P	$A_c m(t)$	0	Linéaire
BLU (SSB)	AM sans porteuse et avec une seule bande latérale		Linéaire, en quadrature
VSB	AM sans porteuse et avec une partie d'une bande latérale		Linéaire, en quadrature
FM	A_c	$2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau$	Angulaire, non linéaire
PM	A_c	$k_p m(t)$	Angulaire, non linéaire

On note que $m(t)$ est le signal message ou modulant, k_a , k_f et k_p sont des sensibilités en amplitude, en fréquence et en phase, respectivement.

III.3 Principe de la modulation AM, ses différents types

III.3.1 La modulation d'amplitude AM

Définition :

La modulation AM est la variation de l'amplitude d'un signal HF $p(t)$ (porteuse) au rythme d'un signal BF $m(t)$ (message), où le signal résultant est appelé le signal modulé en amplitude $S_{AM}(t)$. Le signal HF $p(t)$ est généralement sinusoïdal et on écrit $p(t) = A_c \cos(w_c t)$

Mathématiquement, le signal modulé est donné par

$$S_{AM}(t) = [A_c + m(t)] \cos(w_c t)$$

Pour un signal message sinusoïdal donné par $m(t) = A_m \cos(w_m t)$, le signal modulé en amplitude $S_{AM}(t)$ peut s'exprimer par

$$S_{AM}(t) = [A_c + A_m \cos(w_m t)] \cos(w_c t) = A_c \left[1 + \frac{A_m}{A_c} \cos(w_m t) \right] \cos(w_c t)$$

On pose $m = \frac{A_m}{A_c}$,

$$S_{AM}(t) = A_c [1 + m \cos(w_m t)] \cos(w_c t)$$

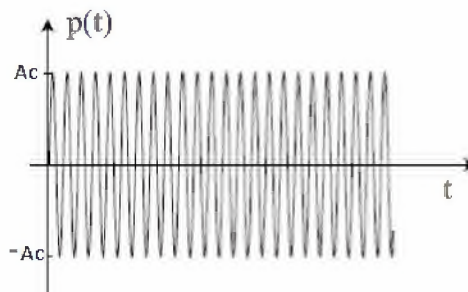
Avec m est défini comme un taux ou indice de modulation AM.

La représentation graphique d'un signal AM

Le signal modulé en AM a trois représentations graphiques (temporelle, fréquentielle et vectorielle)

- **La représentation temporelle**

Cette représentation illustre l'évolution de l'amplitude d'un signal (courant / tension) en fonction du temps. Pour visualiser cette évolution, un oscilloscope doit être utilisé.



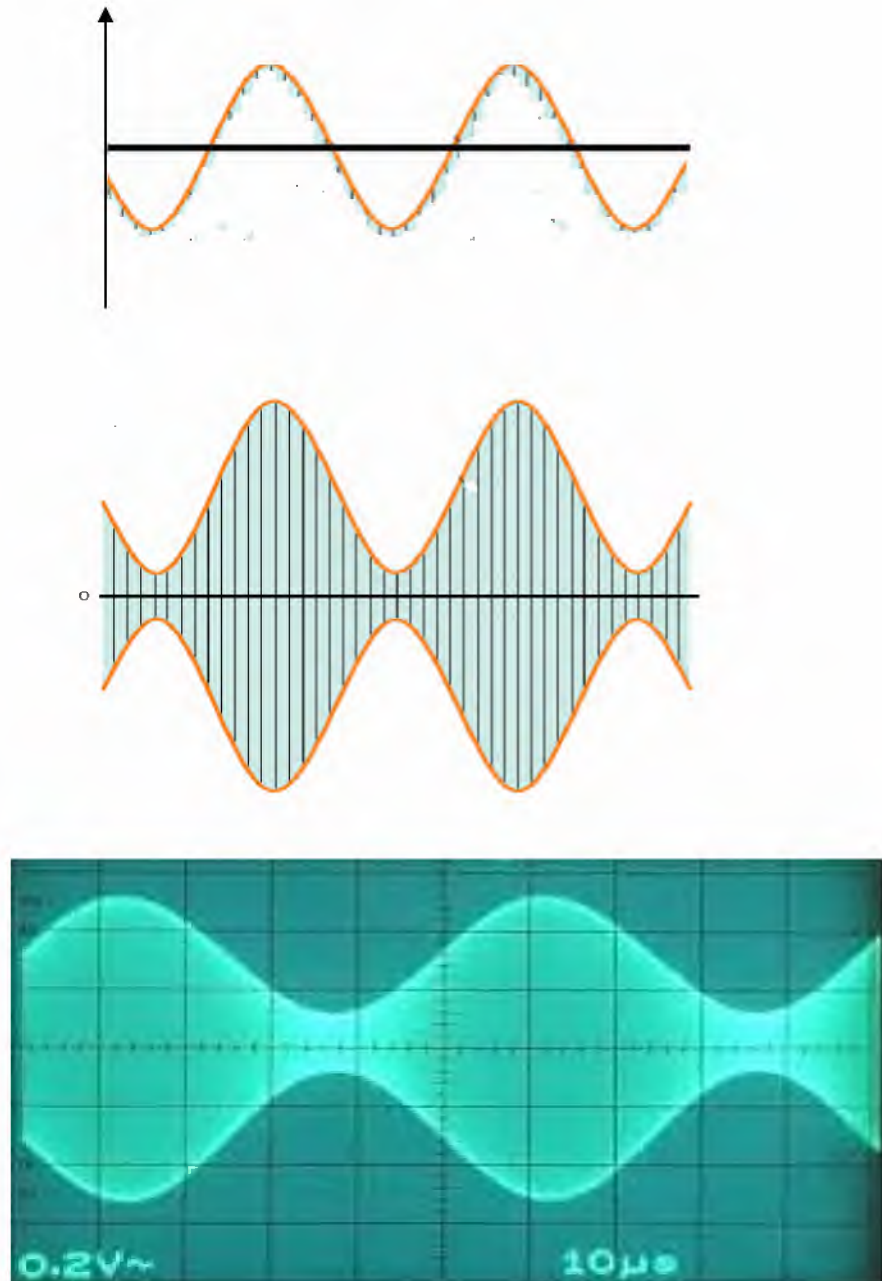


Figure III.2 : L'évolution temporelle d'un signal modulé en AM

- **La représentation spectrale ou fréquentielle**

Dans le domaine de télécommunications, qui occupe les deux bandes RF et micro-ondes, la représentation spectrale est favorisée à cause de certaines limitations liées aux outils de la représentation temporelle et de même pour localiser le signal à transmettre

spectralement. Pour observer cette représentation, on doit utiliser un analyseur de spectre.

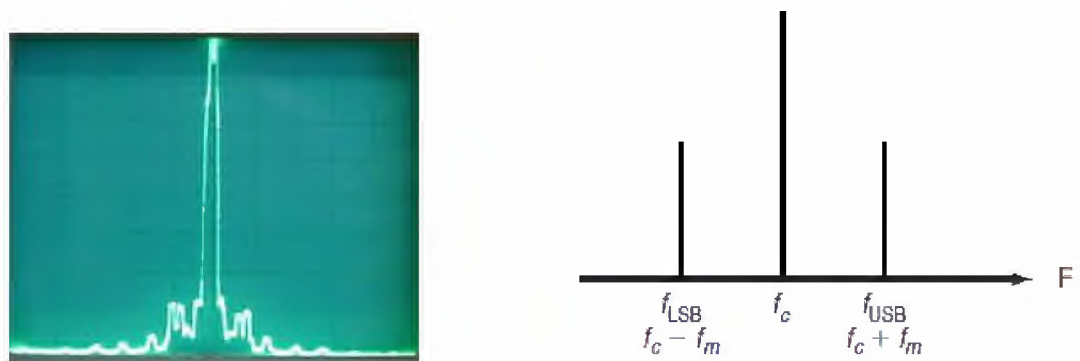


Figure III. 3 : Le spectre d'un signal AM

- La représentation vectorielle

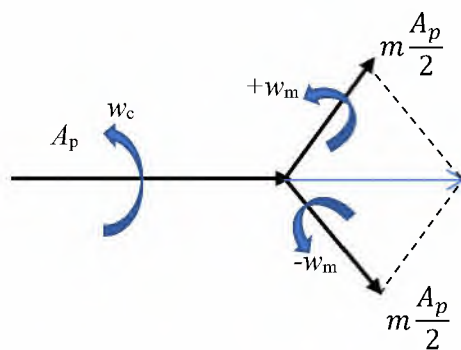


Figure III. 4 : La représentation vectorielle d'un signal AM

III.3.2 Les différents types de la modulation d'amplitude AM

Il existe plusieurs types de la modulation AM tels que la modulation AM simple, AM-P ou sans porteuse (à porteuse supprimée) et la bande latérale unique (BLU) supérieure ou inférieure.

III.3.2.1 La modulation d'amplitude AM standard

Ce type de modulation AM est le plus classique, il avait les trois composantes spectrales. Lorsqu'on considère que les deux signaux (porteuse et message) sont sinusoïdaux, l'expression mathématique d'un signal modulé en amplitude peut prendre la forme suivante

$$S_{AM}(t) = A_c [1 + m \cos(w_m t)] \cos(w_c t) = A_c \cos(w_c t) + mA_c \cos(w_m t) \cos(w_c t)$$

Trigonométriquement, $\cos(A) \cdot \cos(B) = \frac{1}{2} [\cos(A + B) + \cos(A - B)]$

$$\text{Alors, } S_{AM}(t) = \underbrace{A_c \cos(w_c t)}_{\text{Porteuse}} + \underbrace{\frac{mA_c}{2} \cos(w_c + w_m)t}_{\text{Bande latérale supérieure}} + \underbrace{\frac{mA_c}{2} \cos(w_c - w_m)t}_{\text{Bande latérale inférieure}}$$

Comme on a déjà vu, on a trois raies spectrales (USB, LSB et la fréquence porteuse).

III.3.2.2 La modulation d'amplitude sans porteuse AM-P (DSB-SC : double Side Band suppressed carrier)

L'onde porteuse est complètement indépendante du signal message $m(t)$. En plus, comme on a déjà vu que presque deux tiers (2/3) de la puissance transmise totale est relative à la porteuse. Pour réduire ce gaspillage d'énergie, il suffit simplement de ne transmettre que les deux bandes latérales (LSB & USB) et de supprimer la porteuse.

L'expression du signal modulé à porteuse supprimée est donnée par

$$S_{AM-P}(t) = \frac{mA_c}{2} \cos(w_c + w_m)t + \frac{mA_c}{2} \cos(w_c - w_m)t$$

Après une simplification, l'expression de $S_{AM-P}(t)$ peut prendre la forme suivante

$$S_{AM-P}(t) = mA_c \cos(w_m t) \cos(w_c t)$$

Alors, la modulation AM-P se réduit à une multiplication de deux signaux.

La représentation temporelle du signal AM-P est illustrée dans la figure suivante

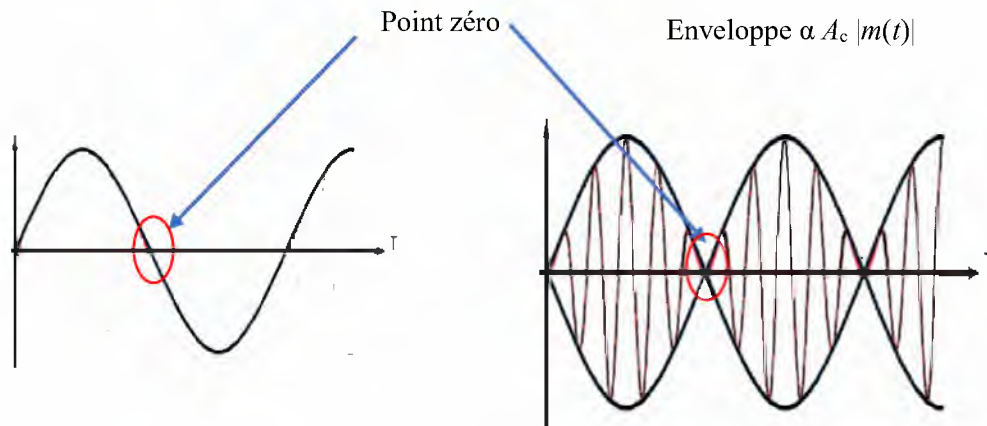


Figure III. 5 : Représentation temporelle d'un signal AM sans porteuse

Au niveau de réception, après la démodulation, l'enveloppe récupérée est illustrée dans la figure ci-après

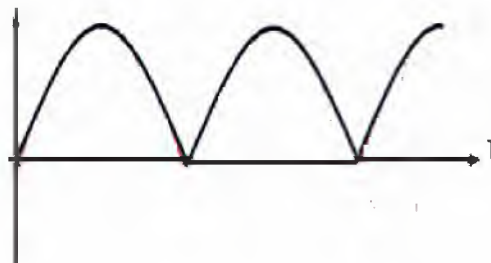


Figure III. 6 : Enveloppe récupérée d'un signal AM sans porteuse

Pour suivre l'enveloppe originale, un basculement par π sera effectué pour chaque passage de zéro du signal récupéré.

Spectralement, le signal AM-P est représenté par deux raies spectrale localisé à $f_c - f_m$ et $f_c + f_m$ comme la figure suivante indique

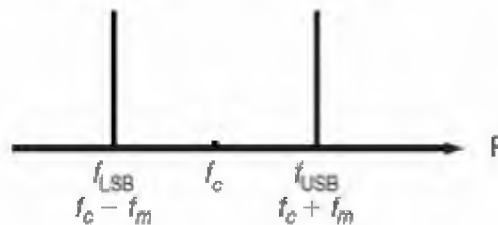


Figure III. 7 : Spectre d'un signal AM sans porteuse

Il faut savoir que

La modulation AM-P permet de réduire fortement la puissance transmise (économie d'énergie). En plus, on peut la considérer comme une étape intermédiaire vers une autre modulation (SSB).

III.3.3 La modulation à bande latérale unique BLU ou SSB (*single side band*)

Il a été vu précédemment que, pour les deux modulations AM et DSB-SC, les deux bandes latérales (LSB & USB) sont porteuses de la même information, $m(t)$, donc il est possible de n'en transmettre que l'une des deux, ce qui permet d'une part de réduire la puissance émise encore plus et d'autre part de réduire la bande de fréquence allouée pour transmettre le signal.

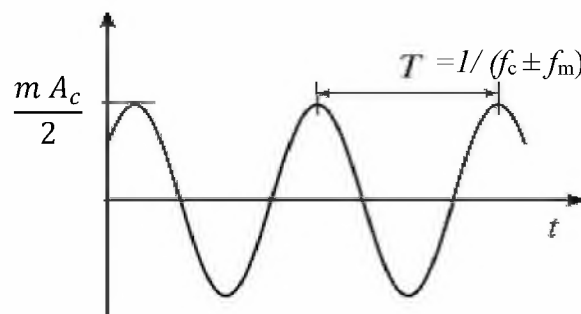
$$f(t) = \frac{m A_c}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t + \frac{m A_c}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t$$

Voir que chacune des deux raies renferme la même information (amplitude A_m , la fréquence ω_m), ce qui nous permet de choisir l'une des deux.

Au niveau de réception, le système va détecter la présence de ce signal (dans ce cas signal sinusoïdal)

La représentation temporelle et spectrale d'un SSB est donnée par :

$$f_{SSB}(t) = \frac{m A_c}{2} \cos(\omega_c \mp \omega_m)t$$



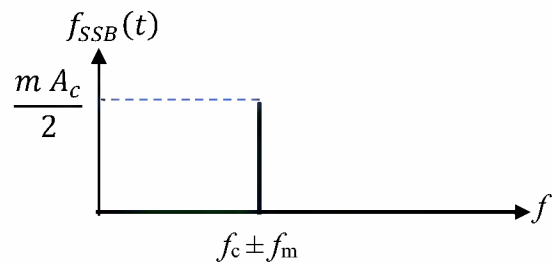


Figure III. 8 : Représentation spectrale d'un signal SSB

Ce type de modulation consiste à réaliser une modulation AM-P puis à filtrer l'une des deux bandes (filtre passe haut : pour conserver la bande latérale supérieure ou un filtre passe bas pour conserver la bande latérale inférieure). Pratiquement, des filtres passe bandes sont utilisés.

De leur tour, la modulation à bande latérale unique a plusieurs types suivant le domaine d'application d'où on peut citer la modulation SSB atténuée ou VSB, SSB à porteuse réduite

III.3.3.a Modulation à bande latérale unique atténuée (VSB)

L'utilisation des filtres passe bandes dans les systèmes SSB va introduire des certaines supplémentaires surtout pour les signaux vidéo qui sont caractérisés par une bande passante importante (5 MHz - 6MHz) où le spectre de cette bande comporte des composantes basses fréquences qu'il n'est pas question de les filtrer.

Une solution viable présentée dans la modulation à bande latérale résiduelle ou atténuée (VSB) comme un compromis entre la modulation AM classique et la modulation BLU (SSB).

Pour obtenir un signal VSB, la technique consiste à réaliser une modulation AM suivie d'un filtre qui atténuera sensiblement les composantes fréquentielles inférieures à f_c .

L'une des bandes (généralement LSB) se trouve donc partiellement atténuée.

Le spectre de ce signal est donc le suivant

III.3.3.b Modulation BLU à porteuse réduite

Au niveau de réception, on doit régénérer la porteuse supprimée (après la modulation et avant la transmission) afin de l'utiliser par le mélangeur (mixer) où un oscillateur local va produire la porteuse (BFO : *Beat frequency oscillator*). Généralement, une erreur commise de l'ordre de 100 Hz est acceptable (pour les radio amateur). Pour une grande précision, une petite quantité de la porteuse sera transmise avec le signal BLU (SSB) ce qui permet d'utiliser une PLL pour détecter la fréquence porteuse où l'oscillateur local va régénérer cette porteuse détectée.

III.4 Procédé de la modulation AM

Il existe un grand nombre des circuits qui font l'opération de modulation d'amplitude AM sous toutes ses formes. Le procédé consiste à injecter un signal message $m(t)$ et une porteuse via un circuit électronique afin d'obtenir en sortie un signal modulé en amplitude.

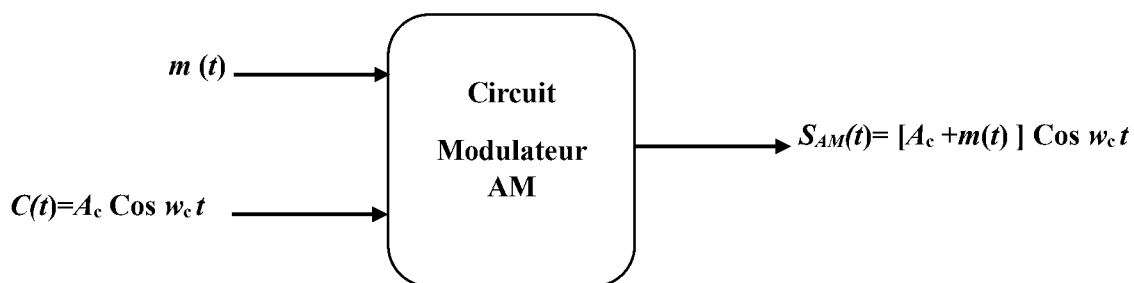


Figure III.9 : Principe de la modulation AM

III.4.1 Méthode directe

Malgré que cette méthode soit très simple, elle est très peu utilisée. Son principe de base est illustré dans le schéma bloc suivant

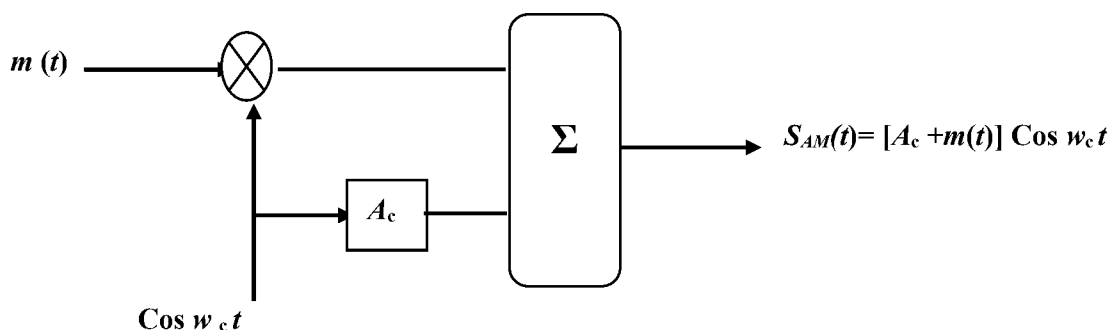


Figure III.10 : Principe de la modulation AM directe

Cette méthode est repose sur la multiplication du message $m(t)$ par une fonction cosinus de fréquence f_c . Le résultant de la multiplication est ajouté à une pondération de la fonction cosinus ($A_c \cos w_c t$).

III.4.1 Méthode indirecte (Non linéarité et filtrage)

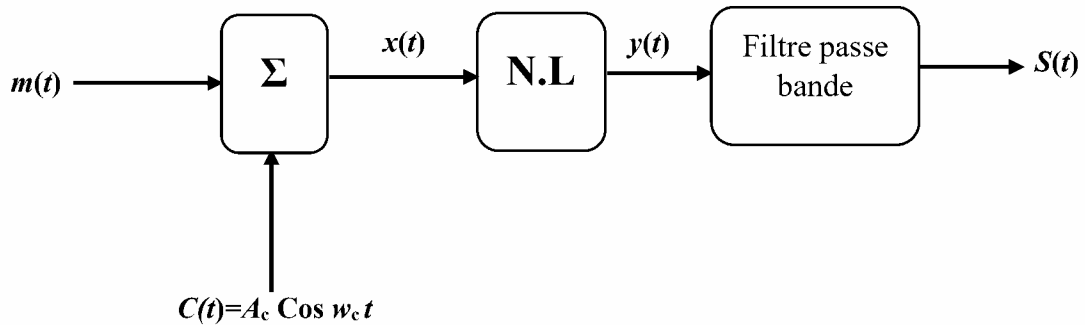


Figure III.11 : Principe de la modulation AM non-linéaire

On considère que la non-linéarité est définie par la fonction F suivante

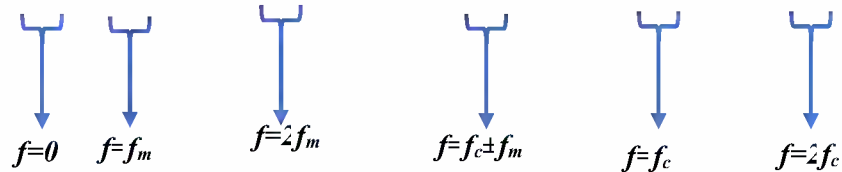
$$y = F(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$$

Alors, le signal $y(t)$ s'écrit

$$y(t) = F(x(t)) = F[m(t) + C(t)]$$

$$y(t) = a_0 + a_1[m(t) + C(t)] + a_2[m(t) + C(t)]^2$$

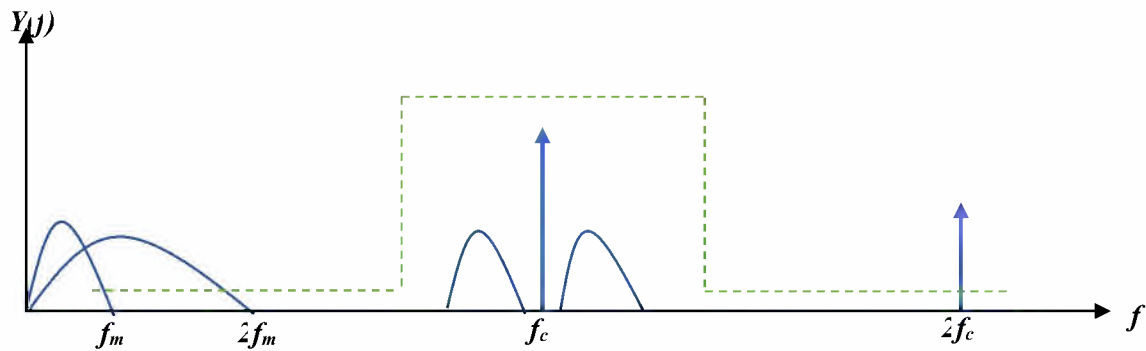
Enfin, $y(t) = a_0 + a_1m(t) + a_2m^2(t) + 2.a_2m(t).C(t) + a_1C(t) + a_2C^2(t)$



Après le filtrage passe bande du signal $y(t)$ autour de la fréquence f_c , on obtient :

$$S(t) = a_1C(t) + 2.a_2m(t).C(t)$$

Finalement, le signal modulé en amplitude est obtenu $S(t) = a_1 \left[1 + \frac{2a_2}{a_1} m(t) \right] C(t)$

Figure III.12 : Le spectre de signal $y(t)$

III. 5 Modulation FM

Comme on a déjà vu dans la modulation d'amplitude (AM) qui consiste à varier l'amplitude de la porteuse sans modifier sa fréquence. Une autre forme de modulation consiste à varier la fréquence tout en gardant son amplitude constante. Ce type de modulation est connu par la modulation de fréquence FM (à partir de la notation anglaise *frequency modulation*).

III.5.1 Notion de fréquence et de phase instantanée

Comme on a déjà parlé dans le chapitre précédent, que la modulation angulaire se décline en deux types de modulation (de phase et de fréquence) et consiste à varier, instantanément, l'angle de la porteuse au rythme du signal message d'où la variation de l'angle (phase) se traduit par une variation dans la fréquence et vice versa.

Une onde porteuse a la forme suivante $P(t) = P_m \cdot \cos(\theta_i(t))$; avec $\theta_i(t)$ présente la phase instantanée.

La fréquence instantanée de l'onde modulée en angle, $S(t)$, est donnée par

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt}$$

Généralement, pour un signal module, $\theta_i(t) = 2\pi f_c t + \varphi_c$, avec $\varphi_c = \theta_i|_{t=0}$

Il existe deux techniques pour réaliser la modulation angulaire. Ces deux techniques sont fortement liées et les caractéristiques de l'une peuvent être déduites de propriétés de l'autre.

III.5.1.1 Onde modulé en phase (PM *phase modulation*)

L'angle de phase instantanée $\theta_i(t)$ est égale à la phase de la porteuse non modulée plus une composante qui est proportionnelle avec l'onde modulante (message) $m(t)$.

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + k_p m(t)$$

avec $\theta_c = 2\pi f_c t$ est la phase de l'onde non modulée et k_p est la sensibilité en phase du modulateur en [rd/volts].

L'onde modulée en phase aura l'expression suivante

$$S_{PM}(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)]$$

III.5.1.2 Onde modulé en fréquence (FM *frequency modulation*)

La fréquence instantanée $f_i(t)$ est égale à la fréquence constante de l'onde porteuse non modulée plus une composante qui est proportionnelle avec l'onde modulante (message) $m(t)$.

$$f_i(t) = f_c + k_f m(t)$$

avec k_f est la sensibilité en fréquence du modulateur en [Hz/volts].

L'onde modulée en fréquence aura l'expression suivante

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

III.5.1.2.1 Cas d'un signal modulant sinusoïdal

Considérons que le signal modulant $m(t)$ est sinusoïdal

$$m(t) = A_m \cos[2\pi f_m t]$$

La fréquence instantanée de l'onde modulée devient

$$\begin{aligned} f_i(t) &= f_c + k_f A_m \cos[2\pi f_m t] \\ &= f_c + \Delta f \cos[2\pi f_m t] \end{aligned}$$

avec $\Delta f = k_f A_m$ est la déviation en fréquence ou l'excursion.

$$f_c - \Delta f \leq f_i(t) \leq f_c + \Delta f$$

Δf représente l'écart maximal de la fréquence instantanée de l'onde FM par rapport à la fréquence porteuse f_c .

Le signal modulé $S_{FM}(t)$ s'écrit

$$S_{FM}(t) = A_c \cos \left[2\pi f_c t + \frac{k_f A_m}{f_m} \sin[2\pi f_m t] \right]$$

III.5.1.2.2 La représentation temporelle d'un signal FM avec un signal modulant sinusoïdal

La figure suivante illustre l'allure d'un signal modulé en fréquence avec un signal message sinusoïdal

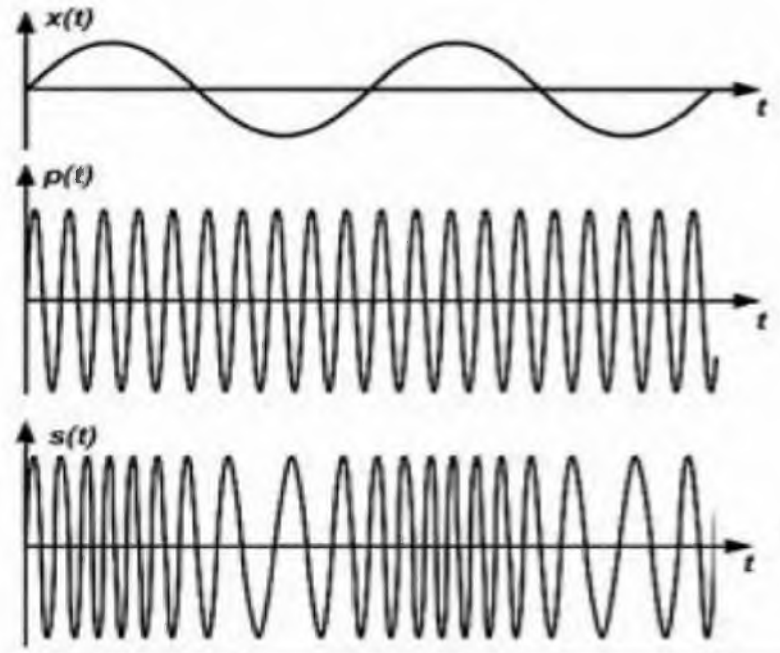


Figure III. 13 : Représentation temporelle d'un signal FM

III.5.1.3 Lien entre l'onde PM et FM

Généralement, un changement dans la fréquence a la possibilité d'être traduit en tant qu'un changement dans la phase avec une fréquence fixe et vice versa.

Mathématiquement, soit deux signaux S1 et S2 comme nous le montrons dans les deux équations suivantes

$$s_0(t) = A \cdot \sin(2\pi f_0 t)$$

et

$$s_1(t) = A \cdot \sin(2\pi f_1 t)$$

Si on pose que $f_1 = f_0 + \Delta f$

Alors,

$$s_1(t) = A \cdot \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)t) = A \cdot \sin(2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f t)$$

On pose $\Delta\varphi = 2\pi \Delta f t$

Enfin, on obtient un changement dans la phase, $s_1(t) = A \cdot \sin(2\pi f_0 t + \Delta\varphi)$

On peut schématiser le lien entre la modulation de fréquence FM et celle de phase PM par les deux schémas suivants

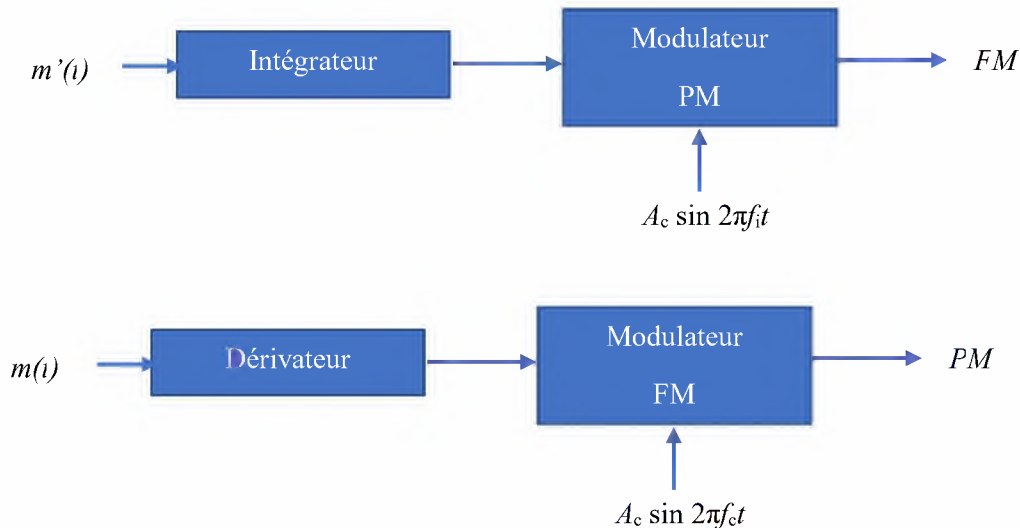


Figure III. 14 : Schéma bloc qui représente le lien entre AM et FM

Considérons des cas d'une onde modulante sinusoïdale $m(t) = A_m \cdot \cos 2\pi f_m t$

La fréquence instantanée de l'onde modulée est

$$f_i(t) = f_c + k_f \cdot A_m \cdot \cos 2\pi f_m t = f_c + \Delta f \cdot \cos 2\pi f_m t$$

$\Delta f = k_f \cdot A_m$ est la déviation en fréquence ou l'excursion

Le cosinus va prendre une valeur maximale de 1 et une autre valeur minimale -1, alors

$$f_c - \Delta f < f_i(t) < f_c + \Delta f$$

L'excursion Δf représente l'écart maximal de la fréquence instantanée de l'onde modulée FM par rapport à la fréquence porteuse f_c .

III.5.2 Spectre de l'onde FM

Prenons l'expression générale d'un signal modulé en fréquence

$$s_{FM}(t) = A_c \cdot \cos \left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right)$$

Avant de voir le spectre d'un signal FM, on va prendre le cas d'un signal modulant sinusoïdal $m(t) = A_m \cdot \cos 2\pi f_m t$, l'expression du signal modulé en fréquence est alors :

$$s_{FM}(t) = A_c \cdot \text{Cos} \left(2\pi f_c t + \frac{k_f A_m}{f_m} \sin(2\pi f_m t) \right)$$

Soit $\beta = \frac{k_f A_m}{f_m}$ est l'indice de modulation FM, alors on peut réécrire l'équation précédente sous la forme :

$$s_{FM}(t) = A_c \cdot \text{Cos}(2\pi f_c t + \beta \cdot \sin(2\pi f_m t))$$

NB : L'indice de modulation β est différent au taux de modulation AM, m , il dépend à la fréquence f_m et l'amplitude A_m du signal modulant $m(t)$.

Selon la valeur de l'indice β , on distingue deux types de modulation FM

III.5.2.1 Modulation en fréquence à bande étroite ($\beta \ll 1$)

Ce type de modulation FM est connu par NBFM à partir de la notation anglaise *Narrow band FM*.

Considérons le cas d'un signal modulant sinusoïdal, l'expression du signal modulé est de la forme

$$s_{FM}(t) = A_c \cdot \text{Cos}(2\pi f_c t + \beta \cdot \sin(2\pi f_m t))$$

On pose $\alpha_1 = 2\pi f_c t$ et $\alpha_2 = \beta \cdot \sin(2\pi f_m t)$

En utilisant la règle trigonométrique suivante

$$\cos(\alpha_1 + \alpha_2) = \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 - \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2$$

On obtient,

$$s_{FM}(t) = A_c \cdot [\cos(2\pi f_c t) \cdot \cos(\beta \cdot \sin(2\pi f_m t)) - \sin(2\pi f_c t) \cdot \sin(\beta \cdot \sin(2\pi f_m t))]$$

Dans ce cas, on a β négligeable ($\beta \ll 1$), deux approximations trigonométriques seront utilisées

$$\begin{cases} \cos(\beta \cdot \sin(2\pi f_m t)) \approx 1 \\ \sin(\beta \cdot \sin(2\pi f_m t)) \approx \beta \cdot \sin(2\pi f_m t) \end{cases}$$

Par conséquent,

$$s_{FM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) - \frac{\beta \cdot A_c}{2} \cdot [\cos 2\pi(f_c - f_m)t - \cos 2\pi(f_c + f_m)t]$$

Comme on a déjà vu précédemment, une onde modulée en amplitude a la forme suivante :

$$s_{AM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) + \frac{m \cdot A_c}{2} \cdot [\cos 2\pi(f_c - f_m)t + \cos 2\pi(f_c + f_m)t]$$

Enfin, l'onde FM a un spectre similaire pour le spectre d'une onde modulée en amplitude, seulement la raie placée à la fréquence $f_c - f_m$ est en opposition par rapport à celle dans le spectre AM.

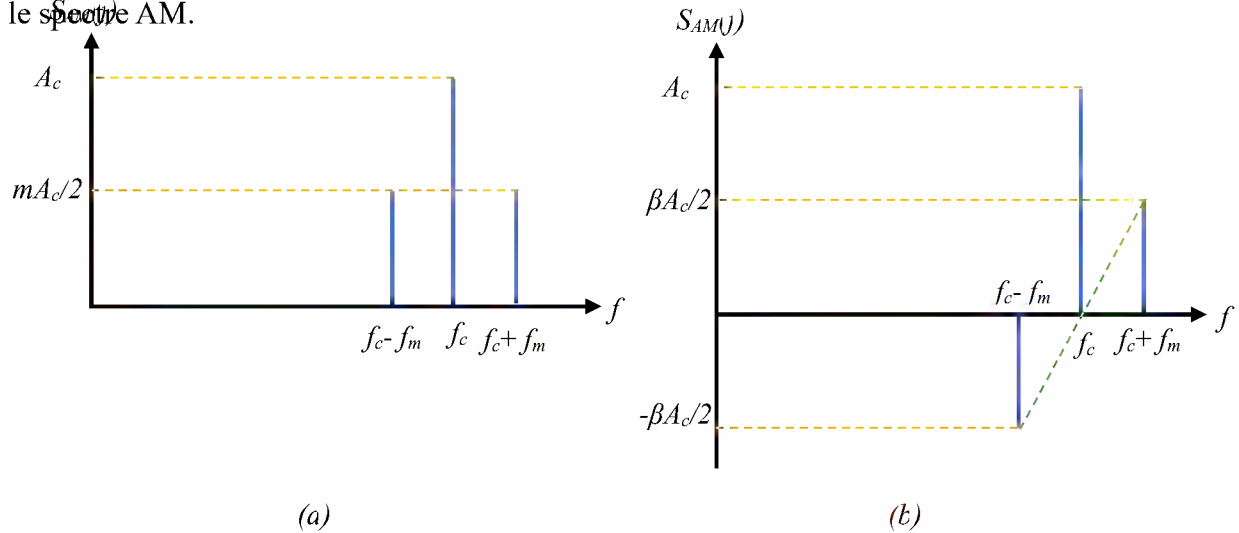


Figure III.15 : Les spectres des deux ondes AM en (a) et FM en (b)

Les deux spectres auront les mêmes formes, d'autre part la largeur de bande de transmission pour une onde FM à bande étroite est similaire pour une onde Am et on écrit

$$B_T(NBFM) = B_T(AM) = 2f_m$$

III.5.2.2 Modulation en fréquence à large bande (β arbitraire)

Le signal FM implique la multiplication de la fréquence porteuse et celle d'un signal message, tout comme celle existe dans la modulation AM. Il en résulte un mélange, alors des composantes de fréquence supplémentaires seront produites. En effet, ces composantes spectrales apparaissent comme des fréquences de somme et de différence de chaque côté de la porteuse. L'équation devient très complexe qu'elle n'y paraît, car elle contient le sinus d'un sinus (problème non-linéaire). La résolution des composantes de fréquence du signal modulé en fréquence nécessite l'utilisation d'une fonction mathématique de haut niveau appelé la fonction de Bessel.

On veut déterminer le spectre d'une onde modulée en fréquence pour une valeur arbitraire de l'indice de modulation β .

On prend un signal $S(t)$ de la forme suivante

$$S(t) = A_c \cdot \text{Cos}(2\pi f_c t + \beta \cdot \sin(2\pi f_m t))$$

On peut réécrire cette forme en utilisant la notation complexe

$$\begin{aligned} S(t) &= \text{Re}\{A_c \cdot \exp[j(\omega_c t + \beta \cdot \sin(\omega_m t))]\} \\ &= \text{Re}\{A_c \cdot \exp[j(\omega_c t)] \cdot \exp[j\beta \cdot \sin(\omega_m t)]\} \\ &= \text{Re}\{\tilde{S}(t) \cdot \exp[j(\omega_c t)]\}, \text{ avec } \tilde{S}(t) = A_c \cdot \exp[j\beta \cdot \sin(\omega_m t)] \end{aligned}$$

La fonction $\tilde{S}(t)$ est périodique de période $\frac{1}{f_m}$

Donc, il y a la possibilité de décomposer $\tilde{S}(t)$ en série de Fourier.

$$\tilde{S}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \exp[j 2\pi n f_m t]; |t| \leq \frac{1}{2f_m}$$

Avec $C_n = \frac{1}{1/f_m} \cdot \int_{-1/2f_m}^{+1/2f_m} \tilde{S}(t) \cdot \exp[-j2\pi n f_m t] dt$

En remplaçant la fonction $\tilde{S}(t)$ par son expression, on va trouver

$$C_n = A_c \cdot f_m \cdot \int_{-1/2f_m}^{+1/2f_m} \exp [j(\beta \sin(2\pi f_m t) - 2\pi n f_m t)] dt$$

On pose $x = 2\pi f_m t \Rightarrow dx = 2\pi f_m dt$

Alors, $t \rightarrow \frac{\pm 1}{2f_m} \Rightarrow x \rightarrow \pm \pi$

$$C_n = A_c \cdot \underbrace{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\pi}^{+\pi} \exp [j(\beta \sin(x) - nx)] dx}_{J_n(\beta)}$$

Enfin, $C_n = A_c \cdot J_n(\beta)$

avec $J_n(\beta)$ est la fonction de Bessel de première espèce d'ordre n et d'argument β

$$\tilde{S}(t) = A_c \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) \cdot \exp[j 2\pi n f_m t]; |t| \leq \frac{1}{2f_m}$$

On a $S(t) = \text{Re}\{\tilde{S}(t) \cdot \exp[j(\omega_c t)]\}$

Alors, $S(t) = \text{Re}\{A_c \cdot (\sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) \cdot \exp[j 2\pi n f_m t]) \cdot \exp[j(\omega_c t)]\}$

Enfin, $S(t) = A_c \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) \cdot \cos 2\pi(f_c + n f_m)t$; $|t| \leq \frac{1}{2f_m}$

Le spectre de $S(t)$ sera

$$S(f) = \frac{A_c}{2} \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) \cdot [\delta(f - (f_c + n f_m)) + \delta(f + (f_c + n f_m))]$$

III.5.2.2.2 La fonction de Bessel

a. Définition

Historiquement, la fonction de Bessel a été étudiée par Euler, Lagrange et le Bernoulli. Les fonctions de Bessel ont d'abord été utilisées par Friedrich Wilhelm Bessel pour expliquer le mouvement des trois corps se déplaçant sous gravitation mutuelle, avec la fonction de Bessel qui émerge dans l'expansion en série de la perturbation planétaire (problème de Kepler dans l'astronomie). La fonction de Bessel porte le nom de Friedrich Wilhelm Bessel (1784-



1846), après tout, Daniel Bernoulli est généralement attribué à être le premier à présenter l'idée des fonctions de Bessel en 1732. Il a utilisé la fonction d'ordre zéro comme solution au problème d'un pendule. Les fonctions de Bessel des ordres entiers et des ordres zéro sont utilisées par Euler (en 1764) pour analyser des vibrations d'une membrane étirée. En 1878, Rayleigh a prouvé que les fonctions de Bessel sont cas particulier des fonctions de Laplace.

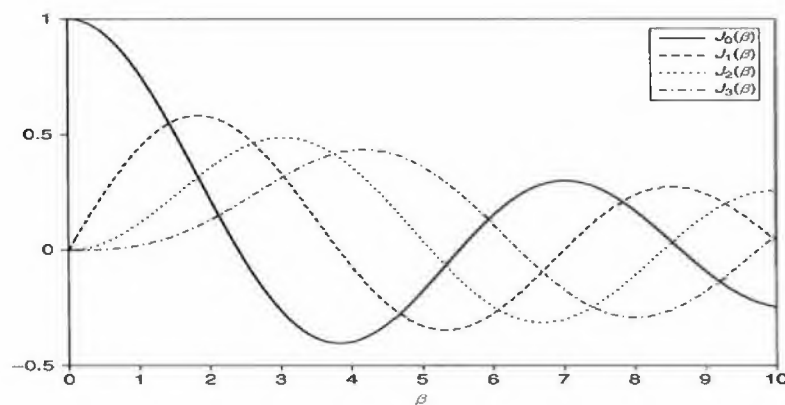


Figure III.16 : Les courbes de la fonction de Bessel de premier ordre

Tableau.III.2 : Quelques fonctions de Bessel

n	$\beta = 0.1$	$\beta = 0.2$	$\beta = 0.5$	$\beta = 1$	$\beta = 2$	$\beta = 5$	$\beta = 8$	$\beta = 10$
0	0.997	0.990	0.938	0.765	0.224	-0.178	0.172	-0.246
1	0.050	0.100	0.242	0.440	0.577	-0.328	0.235	0.043
2	0.001	0.005	0.031	0.115	0.353	0.047	-0.113	0.255
3				0.020	0.129	0.365	-0.291	0.058
4				0.002	0.034	0.391	-0.105	-0.220
5					0.007	0.261	0.186	-0.234
6					0.001	0.131	0.338	-0.014
7						0.053	0.321	0.217
8						0.018	0.223	0.318
9						0.006	0.126	0.292
10						0.001	0.061	0.207
11							0.026	0.123
12							0.010	0.063
13							0.003	0.029
14							0.001	0.012
15								0.004
16								0.001

b. Quelques propriétés de la fonction de Bessel $J_n(\beta)$

La fonction de Bessel de premier ordre est donnée par

$$J_n(\beta) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\pi}^{+\pi} \exp [j(\beta \sin(x) - nx)] dx$$

Il existe plusieurs propriétés de la fonction de Bessel, mais on va mentionner les plus utilisées telles que

- ❖ $J_{-n}(\beta) = (-1)^n \cdot J_n(\beta)$:
 Pour n pair, $J_{-n}(\beta) = J_n(\beta)$
 Pour n impair, $J_{-n}(\beta) = -J_n(\beta)$
- ❖ Pour les faibles arguments β ($\beta \ll 1$), on a les approximations suivantes :
 $J_0(\beta) \cong 1$, $J_1(\beta) \cong \frac{\beta}{2}$ et $J_n(\beta) = 0$ pour $n > 1$
- ❖ $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n^2(\beta) = 1$

La composante $J_n(\beta)$ est mathématiquement exprimée par

$$J_n(\beta) = \left(\frac{\beta}{2}\right)^n \left[\frac{1}{n!} - \frac{\left(\frac{\beta}{2}\right)^2}{1!(n+1)!} + \frac{\left(\frac{\beta}{2}\right)^4}{2!(n+2)!} - \frac{\left(\frac{\beta}{2}\right)^6}{3!(n+3)!} + \dots \right]$$

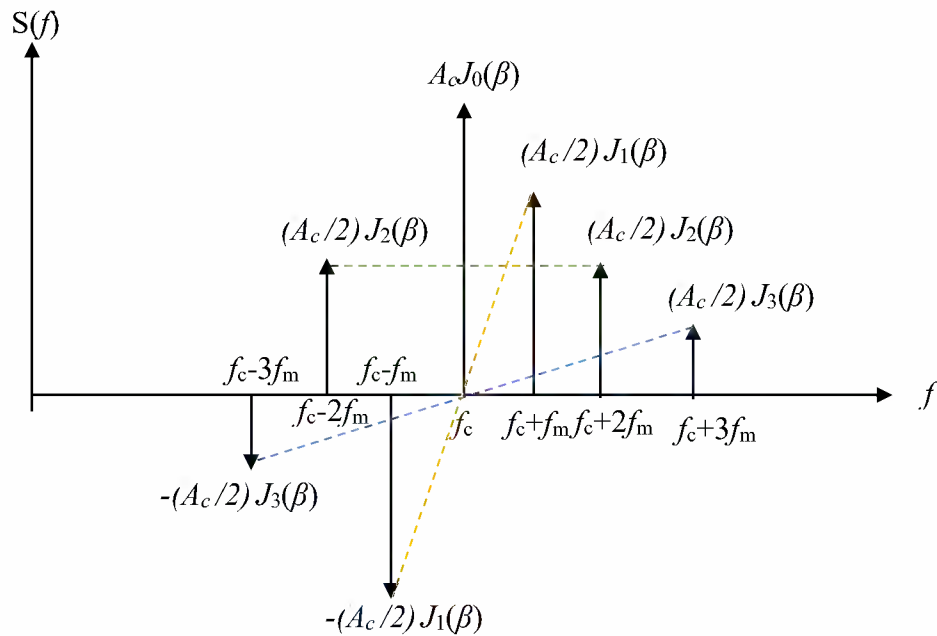


Figure III.17 : Spectre d'un signal FM à large bande

III.5.2.2.3 Puissance d'une onde FM

Premièrement, on va trouver la puissance moyenne de la porteuse P . D'après le spectre, on constate que l'amplitude de la composante porteuse dépend de l'indice de modulation β , selon la loi $A_c J_0(\beta)$.

Physiquement, cela signifie que l'enveloppe de l'onde porteuse étant constante. C'est-à-dire, la puissance moyenne est constante et on écrit

$$P = \frac{1}{2} A_c^2$$

Par ce que l'onde porteuse est modulée en fréquence, les puissances des composantes latérales ($f_c + n f_m$, avec $n > 0$) apparaissent sur le compte de la puissance originale de la porteuse.

De même, la puissance totale peut être calculer à partir de l'équation suivante

$$P = \frac{1}{2} A_c^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n^2(\beta) = \frac{1}{2} A_c^2 \quad (\text{Voir la troisième propriété de la fonction de Bessel})$$

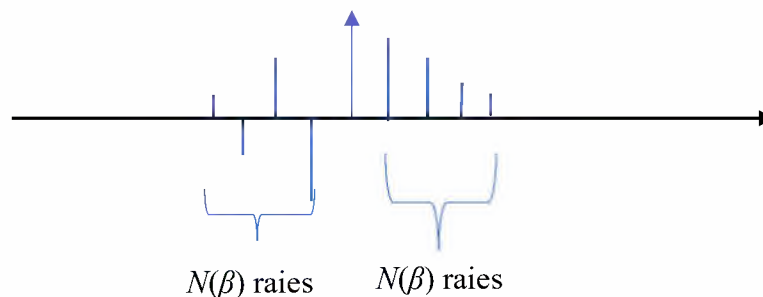
III.5.2.2.4 Largeur de bande de transmission des ondes FM

Théoriquement, une onde FM consiste à un nombre infini de composantes spectrales (fréquentielles) de sorte que la largeur de bande requise pour transmettre un tel signal FM est infinie. Pratiquement, l'onde FM est effectivement limitée à un nombre fini des composantes spectrales (raies). Ce nombre des raies est liée par la valeur de l'indice de modulation β où les raies spectrales devient de plus en plus faibles lorsqu'on s'éloigne de la fréquence porteuse.

Donc, on peut négliger les raies dont le rang est supérieur à une certaine valeur qui reste à déterminer en fonction de l'indice β .

Soit $N(\beta)$ le nombre des raies significatives de part et d'autre part de la porteuse. La bande spectrale utile d'un signal FM est donc :

$$B_T = 2 \cdot N(\beta) \cdot f_m$$



III.5.2.2.4.1 Détermination des raies significatives

Il existe différents critères pour la détermination de $N(\beta)$, par exemple on cite la règle de Carson et la courbe universelle.

(1) La règle de Carson

Pour déterminer la valeur de $N(\beta)$, on ne garde que les raies dont la somme de ses puissances constitue au moins 98% de la puissance totale d'un signal FM.

En utilisant le développement en série de Fourier d'un signal FM, la puissance de celui-ci s'écrit

$$P_{FM} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{[A_c J_n(\beta)]^2}{2} = \frac{[A_c]^2}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n^2(\beta) = \frac{[A_c]^2}{2}$$

Le nombre des raies significatives $N(\beta)$ selon la règle de Carson est donc défini par l'inégalité suivante

$$\frac{[A_c]^2}{2} \sum_{n=-N(\beta)}^{+N(\beta)} J_n^2(\beta) \geq 0.98 \frac{[A_c]^2}{2}$$

C'est-à-dire,

$$\sum_{n=-N(\beta)}^{+N(\beta)} J_n^2(\beta) \geq 0.98$$

Ce qui implique que

$$J_0^2(\beta) + 2 \cdot \sum_{n=1}^{+N(\beta)} J_n^2(\beta) \geq 0.98$$

En utilisant la table des fonctions de Bessel, on trouve que

$$N(\beta) = \beta + 1$$

D'où $B_T = 2 \cdot (\beta + 1) f_m$

On rappelle que $\beta = \Delta f / f_m$, alors

$$B_T = 2 \cdot \left(\frac{\Delta f}{f_m} + 1 \right) f_m = 2(\Delta f + f_m)$$

Donc, la bande spectrale d'un signal modulé en FM dépend de deux paramètres : l'excursion en fréquence Δf et la fréquence f_m .

Il faut savoir :

- (1) Pour $\beta \ll 1$ (NBFM) : $B_T(NBFM) = 2 \cdot f_m$, elle est même que la bande AM.
- (2) Pour β quelconque (WBFM) : $B_T(WBFM) = 2 \cdot (\beta + 1) f_m$

➤ La courbe universelle

Comme on a déjà parlé pour un signal FM à large bande, la totalité de sa puissance réside dans une bande passante finie, appelée la bande de transmission. Afin d'estimer cette bande de fréquence, on va déterminer le nombre des raies significatives, une autre méthode présentée dans la méthode de courbe universelle peut être utilisée.

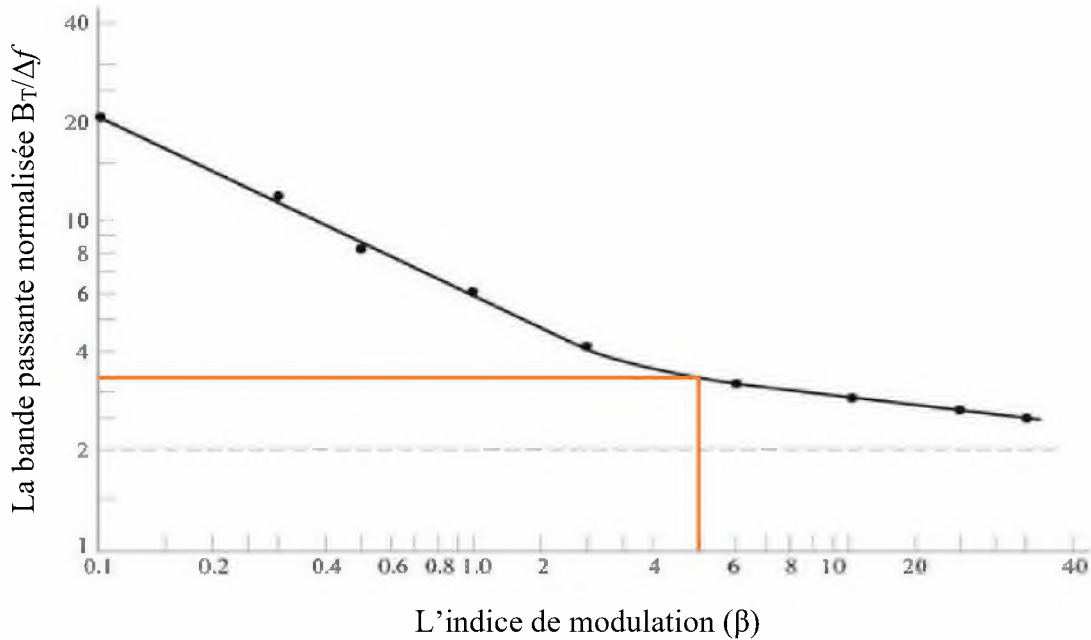


Figure III.18 : Une Courbe universelle pour déterminer le un pour cent d'une onde FM.

Mathématiquement, la bande passante d'un signal FM à large bande est donnée par

$$B_T = 2 \cdot n_{max} \cdot f_m,$$

avec n_{max} est la valeur maximale de l'ordre n pour lequel $|J_n(\beta)| > 0.01$

Dans la courbe universelle, on a $\frac{B_T}{\Delta f} = f(\beta)$

$$B_T = 2 \cdot n_{max} \cdot f_m, \text{ avec } f_m = \frac{\Delta f}{\beta}$$

alors, $B_T = 2 \cdot n_{max} \cdot \frac{\Delta f}{\beta} \Rightarrow \frac{B_T}{\Delta f} = 2 \cdot n_{max} \cdot \frac{1}{\beta}$

On note que lorsque l'indice β augmente, B_T approche sa valeur limite qu'est dans ce cas la déviation en fréquence Δf (la courbe universelle convergente vers 2, c'est-à-dire n_{max} doit être égale à 1).

Généralisation :

On considère une onde modulante quelconque $m(t)$ dont le spectre s'étend jusqu'à la fréquence w qu'a le même rôle que f_m .

On calcule le rapport de déviation $D = \Delta f / w$ qui a le même rôle que l'indice de modulation β . Puis, on utilise la règle de Carson ou la courbe universelle toute en remplaçant f_m par w et β par D .

$$D = \frac{\Delta f}{w} = \frac{k_f \cdot |m(t)|_{max}}{w}$$

Avec Δf est l'excursion maximale de la fréquence instantanée et w est la bande spectrale du signal $m(t)$.

Donc, suivant la règle de Carson, $B_T = 2(\Delta f + w)$

Exemple :

En radiodiffusion FM dans la bande 88-108 MHz, on a la déviation maximale en fréquence Δf est fixée à 75 KHz et la bande spectrale d'un signal message w est fixée à 15 KHz.

Estimer la bande de transmission B_T en utilisant les deux méthodes précédentes.

Solution :

a) *Par la règle de Carson :*

La bande de transmission est donnée par $B_T = 2(\Delta f + w)$

Alors, $B_T = 2(75 + 15) = 180 \text{ KHz}$

b) *Par la courbe universelle :*

Dans ce cas, la déviation en fréquence D est donnée par $D = \frac{\Delta f}{w} = \frac{75}{15} = 5$

En remplaçant la déviation D par l'indice β et w par la fréquence f_m

Dans ce cas, $B_T = 2(\beta + 1)f_m = 2 \cdot 6 \cdot 15 = 240 \text{ KHz}$

On lit sur la courbe universelle $\frac{B_T}{\Delta f} = f\left(\frac{1}{\beta}\right)$

$\frac{B_T}{\Delta f} = 3.2$, elle est correspondante à $\beta=5$ ($n_{max} = 9 - 1 = 8$) (c'est-à-dire, sans la fréquence porteuse).

$$B_T = 3.2 \cdot \Delta f = 3.2 \cdot 75 = 240 \text{ KHz}$$

La règle de Carson sous-estimé B_T par 25% par rapport à la méthode de la courbe universelle ($\frac{240-180}{240} \cdot 100\% = 25\%$).

La figure suivante montre l'allocation FCC pour les stations de diffusion FM. L'écart maximal autorisé autour de la porteuse est de 75 kHz, avec des bandes de garde de 25 kHz aux extrémités supérieure et inférieure. La porteuse doit maintenir une stabilité de 2 kHz. Malgré que dans WBFM, des composantes spectrales existent même à des fréquences plus de ± 75 kHz de la porteuse, les bandes de garde (ainsi que la planification régissant la distance à laquelle les stations FM peuvent être espacées dans une zone géographique donnée) permettent d'éviter les interférences des canaux adjacents ne sera pas un problème.

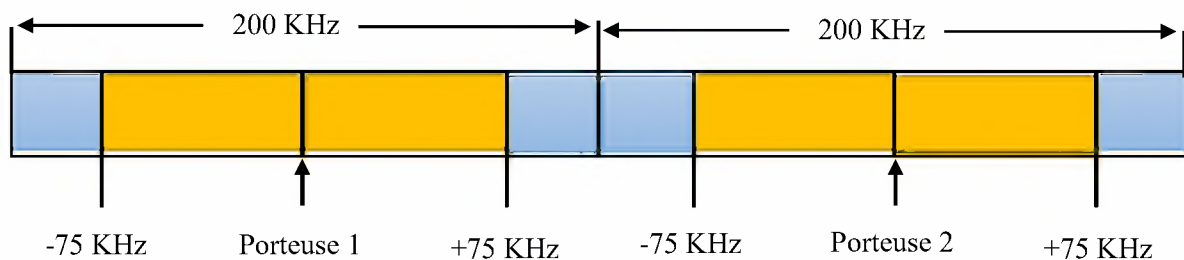


Figure III.19 : Attribution des bandes de fréquences radio FM commerciale pour deux stations adjacentes

III.5.3 Cas de plusieurs messages modulants

La non-linéarité d'un modulateur en fréquence FM ne permet pas d'appliquer la superposition aux signaux modulés FM. En effet, le terme correspondant au signal modulant est sous le cosinus (fonction non-linéaire). Dans le cas d'une modulation FM par plusieurs messages $m_1(t)$, $m_2(t)$, $m_3(t)$, ... d'indice de modulation β_1 , β_2 , β_3 , ... le signal modulé $s(t)$ est exprimé par la forme

$$S(t) = A_c \cdot \cos[w_c t + \beta_1 \sin w_{m_1} t + \beta_2 \sin w_{m_2} t + \dots + \beta_n \sin w_{m_n} t]$$

Comme on a vu précédemment, on a le besoin de calculer la transformée de Fourier de terme $\exp\{j\beta \sin w_m t\}$,

$$\text{Soit } TF\{e^{j\beta \sin w_m t}\} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega - k w_m) \cdot J_k(\beta)$$

Dans le cas de plusieurs signaux modulants, la transformée TF prend la forme suivante :

$$TF\{e^{j \sum_{i=1}^n \beta_i \sin w_{m_i} t}\} = TF\left\{\prod_{i=1}^n e^{j\beta_i \sin w_{m_i} t}\right\}$$

$$= \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega - k\omega_{m1}) \cdot J_k(\beta_1) * \left(\dots \left(\sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega - k\omega_{m_{n-1}}) \cdot J_k(\beta_{n-1}) * \left(\sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega - k\omega_{mn}) \cdot J_k(\beta_n) \right) \right) \right)$$

Le spectre du signal modulé contient une raie à la fréquence f_c , des raies à $f_c \pm f_{m1}, f_c \pm 2f_{m1}, \dots$ dues au premier signal modulant $m_1(t)$, des raies à $f_c \pm f_{m2}, f_c \pm 2f_{m2}, \dots$ dues au deuxième signal modulant $m_2(t)$, ... etc.

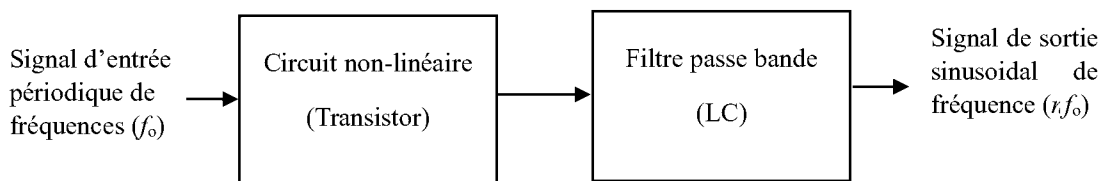
Exemple :

Le nombre des raies totale= le produit des différents sous nombre.

$$\left. \begin{array}{l} \text{message 1} \Rightarrow 3 \text{ raies} \\ \text{message 2} \Rightarrow 5 \text{ raies} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{total} = 5 * 3 = 15 \text{ raies}$$

Multiplicateurs de fréquence

Un multiplicateur de fréquence est la combinaison d'un élément non-linéaire et d'un filtre passe bande.



Exemple d'un circuit multiplicateur de fréquence. Typiquement, le transistor fonctionne en mode classe C. Il délivre en sortie un courant collecteur sous forme d'impulsions de même période que le signal d'attaque mais riche en harmoniques (multiples entiers de la fréquence du signal d'attaque f_0). Le circuit résonant parallèle LC est accordé à la résonance du nième harmonique de fréquence f_0 du signal d'entrée. La sélectivité du circuit permettra de faire passer uniquement la fréquence $(r.f_0)$ ce qui permet de réaliser une multiplication de fréquence (par un entier).

Génération d'une onde FM :

Un signal FM a une fréquence qui varie, instantanément, en fonction d'un signal message comme l'équation indique

$$f(t) = f_c + k_f m(t)$$

L'équation précédente montre que la fréquence du signal FM dépend de l'amplitude et la fréquence du signal message ($m(t)$) ainsi que de la déviation en fréquence produite pour un niveau d'entrée donné (sensibilité k_f en [Hz/V]). Pour générer une onde FM, on doit :

- produire un signal (porteuse) à une fréquence f_c précise en utilisant un oscillateur très stable.
- réaliser une excursion en fréquence $k_f m(t)$

La sensibilité en fréquence (k_f) doit être linéaire, elle est donnée par le constructeur du système. Par exemple, si $k_f = 10$ kHz/mV, un niveau d'entrée de signal modulant avec une tension de crête positive de 20 mV va engendrer un décalage de fréquence de +200 kHz (croissant). Un niveau d'entrée de signal modulant avec un pic négatif de -20 mV donnera un décalage de fréquence de -200 kHz (décroissant).

Essentiellement, il existe deux méthodes pour générer des ondes FM. Une méthode directe et une autre indirecte

FM directe

Dans un système FM direct, le signal modulant est appliqué directement à l'un des éléments déterminants la fréquence de l'oscillation (par exemple, le condensateur dans un circuit oscillant LC), ce permet de varier la fréquence de l'oscillateur (porteuse) directement en accord avec le signal modulant. En effet, le process de modulation FM de l'émetteur FM direct est effectué à l'intérieur de l'oscillateur. Ce type de générateur FM est largement utilisé dans les systèmes modernes telles que la radio mobile bidirectionnelle (Talkie-Walkie dans une gamme de fréquence UHF allant de 462 à 467 MHz).

On prend l'exemple d'un générateur FM en utilisant un oscillateur VCO de Hartley. Le circuit oscillant est constitué principalement par trois composants (L_1 , L_2 et C).

La capacité est variable ($C(t)$), elle est composée d'une capacité fixe C_o et une diode varicap dont sa capacité est variée en fonction de la tension appliquée entre ses extrémités, et en écrit

$$C(t) = C_o + \Delta C \cdot \cos(2\pi f_m t)$$

La fréquence d'oscillation de Hartley est donnée par

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot [(L_1 + L_2) \cdot C(t)]^{-\frac{1}{2}}$$

En remplaçant $C(t)$ par son expression, on trouve

$$f_i(t) = f_o \cdot \left[1 + \frac{\Delta C}{C_o} \cdot \cos(2\pi f_m t) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

avec f_o est la fréquence d'oscillation libre (non modulée), elle est donnée par

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \cdot [(L_1 + L_2) \cdot C_o]^{-\frac{1}{2}}$$

On note que $\Delta C \ll C_o \Rightarrow f_i(t) = f_o \cdot \left[1 - \frac{\Delta C}{2C_o} \cdot \cos(2\pi f_m t) \right]$ (règle de Moivre)

Enfin, la fréquence instantanée d'une onde FM est exprimée par

$$f_i(t) = f_o - \Delta f \cdot \cos(2\pi f_m t) \text{ avec } \Delta f = \frac{\Delta C}{2C_o} \cdot f_o$$

Pour générer une onde FM à large bande, on doit utiliser un multiplieur de fréquence comme nous le montrons dans la configuration suivante

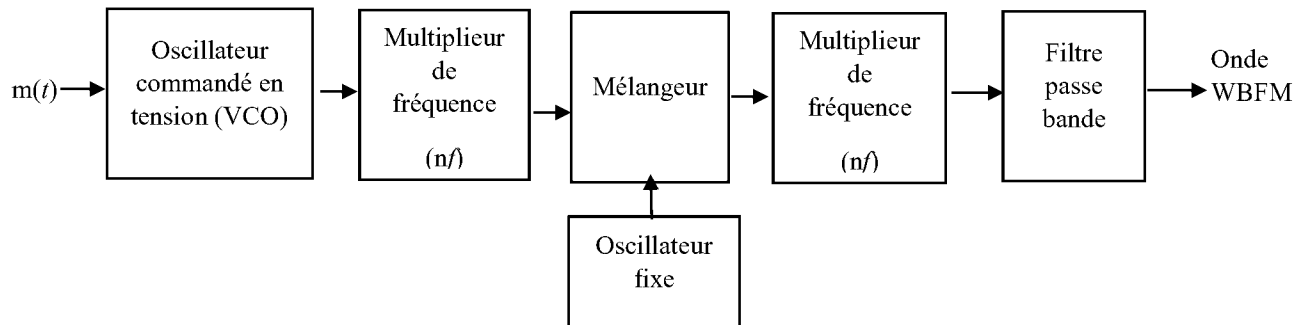


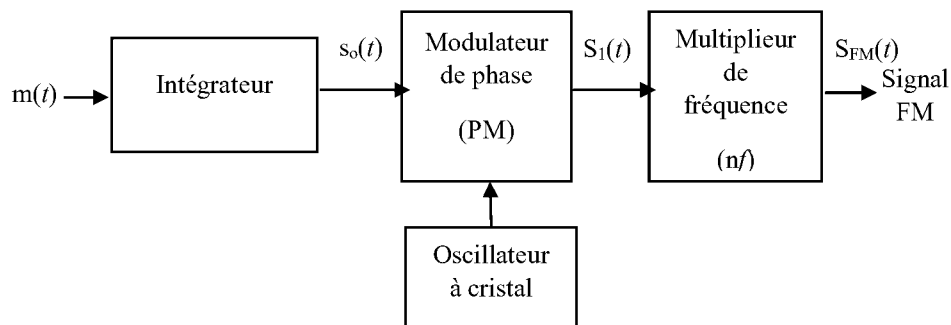
Figure III.20 : Schéma bloc d'un modulateur de fréquence à large bande

NB : Le mélangeur est un changeur de fréquence, deux sinusoïdes d'entrée (f_x, f_y) attaquent un circuit non-linéaire. A la sortie, on peut trouver des composantes harmoniques et d'intermodulation. Cela suivi par un filtre passe bande pour sélectionner la composante désirée ($f_x \pm f_y, \dots$)

FM indirecte

Si la phase d'un signal généré par un oscillateur à cristal varie, on parle donc à une modulation de phase (PM). Comme on a déjà démontré, précédemment, que le changement dans la phase d'un signal entraîne indirectement un changement dans sa fréquence. Donc, la modulation d'un oscillateur à cristal est possible via PM, ce qui permet de créer indirectement le signal FM.

Soit le schéma bloc suivant



L'onde modulante est intégrée puis utilisée pour moduler la phase d'un oscillateur à cristal. L'indice de modulation est fixé à une valeur faible afin d'avoir une modulation FM à bande étroite (NBFM).

Le signal résultant à la sortie du modulateur de phase est ensuite multiplié en fréquence pour produire l'onde FM à large bande (WBFM).

On pose $s_o(t)$ comme une sortie de l'intégrateur

$$S_o(t) = \int_0^t m(\tau) d\tau$$

La sortie du modulateur de phase

$$S_1(t) = A_1 \cdot \cos \left(2\pi f_1 t + 2\pi k_f \cdot \int_0^t m(\tau) d\tau \right)$$

avec f_1 est la fréquence de l'oscillateur à cristal et k_f = la sensibilité = Cte.

Pour une onde modulante sinusoïdale : $m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$

$$S_1(t) = A_1 \cdot \cos(2\pi f_1 t + \beta_1 \cdot \sin 2\pi f_m t) ; \beta_1 = \frac{A_m k_f}{f_m} \text{ l'indice de modulation } (\beta_1 < 0.5)$$

La sortie $s(t)$: (après multiplication)

$$S(t) = A_c \cdot \cos\left(2\pi n f_1 t + 2\pi n k_f \cdot \int_0^t m(\tau) d\tau\right), f_c = r \cdot f_1$$

On a $m(t)$ sinusoïdal, alors $\beta = n \cdot \beta_1$

$$S(t) = A_c \cdot \cos(2\pi f_c t + \beta \cdot \sin 2\pi f_m t)$$

S est un signal FM à large bande ($\beta = n \cdot \beta_1$)

β est choisi à n'importe quelle valeur désiré suivant n .

Cette méthode indirecte de génération FM est généralement appelée la méthode d'Armstrong, d'après son auteur, E. H. Armstrong.

Le modulateur d'Armstrong

Soit un modulateur d'Armstrong simple comme illustré dans la figure suivante

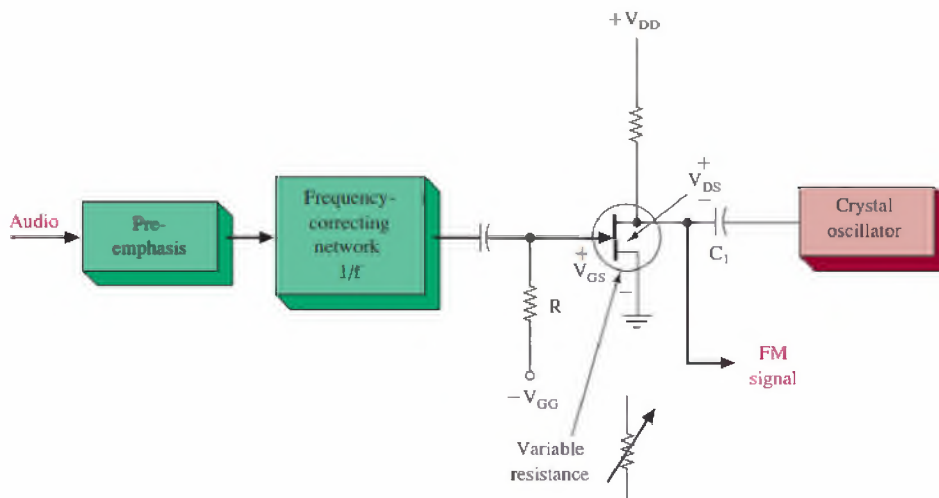


Figure III.21 : Un modulateur d'Armstrong

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu les différentes techniques de transmission analogiques en sorte que la modulation AM, FM et PM. En plus, les différents modulateurs de chaque type de modulations sont présentés. Ce chapitre est un passage vers une autre technique qui sera le sujet du chapitre suivant.

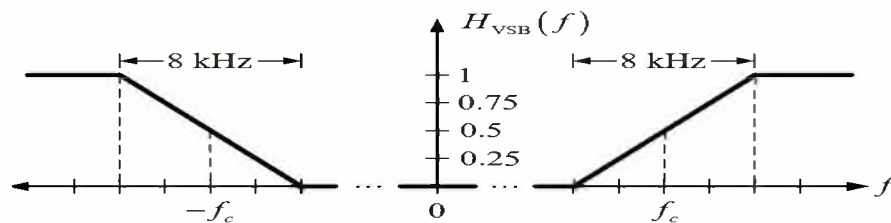
III.7 Problèmes et exercices

III.7.2 Problèmes et exercices corrigés

Exercice 01 :

Soit un signal modulant $m(t)$ donné par : $m(t) = 20 \cdot \cos(4000\pi t) + 4 \cdot \cos(12000\pi t)$

- a) Donner l'expression du spectre correspondant $M(f)$
- b) On va transmettre ce signal $m(t)$ en modulation d'amplitude DSB-SC avec une fréquence porteuse (f_c) de 100 KHz et $A_c=1$.
 - b.1) Donner l'expression du signal modulé $S_{DSB}(t)$
 - b.2) Donner l'expression spectrale $S_{DSB}(f)$ du signal modulé puis dessiner ce spectre.
 - b.3) Donner la puissance moyenne du signal transmis, P_{DSB}
- c) On veut transmettre le signal $m(t)$ en utilisant la modulation VSB. Ce système de transmission utilise un filtre passe haut ayant les caractéristiques suivantes :



- c.1) Donner l'expression spectrale $S_{VSB}(f)$ du signal VSB puis dessiner son spectre.
- c.2) Donner la puissance moyenne du signal VSB, P_{VSB} . Comparer.

Solution :

Le signal modulant $m(t)$ donné par : $m(t) = 20 \cdot \cos(4000\pi t) + 4 \cdot \cos(12000\pi t)$

- a) L'expression du spectre correspondant $M(f)$

$$M(f) = TF[m(t)] = 20 \cdot TF[\cos(4000\pi t)] + 4 \cdot TF[\cos(12000\pi t)]$$

$$TF[\cos(4000\pi t)] = \frac{1}{2} [\delta(f - 2000) + \delta(f + 2000)]$$

$$\text{De même, } TF[\cos(12000\pi t)] = \frac{1}{2} [\delta(f - 6000) + \delta(f + 6000)]$$

Alors,

$$M(f) = 10 \cdot [\delta(f - 2000) + \delta(f + 2000)] + 2 \cdot [\delta(f - 6000) + \delta(f + 6000)]$$

b) On va transmettre ce signal $m(t)$ en modulation d'amplitude DSB-SC avec une fréquence porteuse (f_c) de 100 KHz et $A_c=1$.

b.1) L'expression du signal modulé $S_{DSB}(t)$

$$S_{DSB}(t) = m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)$$

$$S_{DSB}(t) = [20 \cdot \cos(4000\pi t) + 4 \cdot \cos(12000\pi t)] \cdot \cos(2\pi f_c t)$$

b.2) L'expression spectrale $S_{DSB}(f)$ du signal modulé et le spectre correspondant.

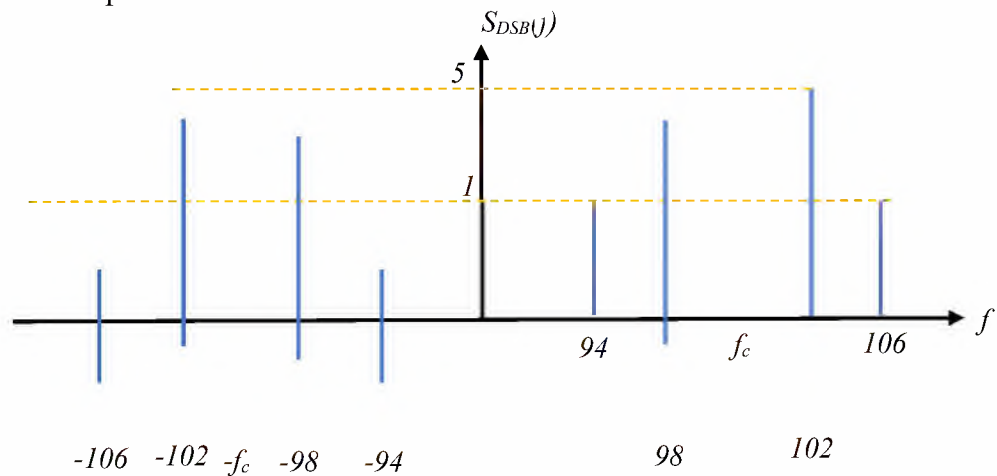
$$S_{DSB}(f) = TF[S_{DSB}(t)] = TF[m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)]$$

$$S_{DSB}(f) = M(f) * \frac{1}{2} [\delta(f - 10^5) + \delta(f + 10^5)]$$

Donc,

$$\begin{aligned} S_{DSB}(f) = & 5 \cdot [\delta(f - 102 \cdot 10^3) + \delta(f - 98 \cdot 10^3) + \delta(f + 98 \cdot 10^3) \\ & + \delta(f + 102 \cdot 10^3)] + [\delta(f - 106 \cdot 10^3) + \delta(f - 94 \cdot 10^3) \\ & + \delta(f + 94 \cdot 10^3) + \delta(f + 106 \cdot 10^3)] \end{aligned}$$

Le spectre correspondant



b.3) La puissance moyenne du signal transmis, P_{DSB}

On a pour un signal $s(t) = A_c \cdot \cos(2\pi f_c t)$, sa transformée de Fourier $s(f) = \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)]$

Alors que sa densité de puissance $P_s(f) = \frac{A_c^2}{4} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)]$

La puissance moyenne est donnée par la puissance trouvée dans toutes les raies spectrales

$$P_{DSB} = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{DSB}(f) df$$

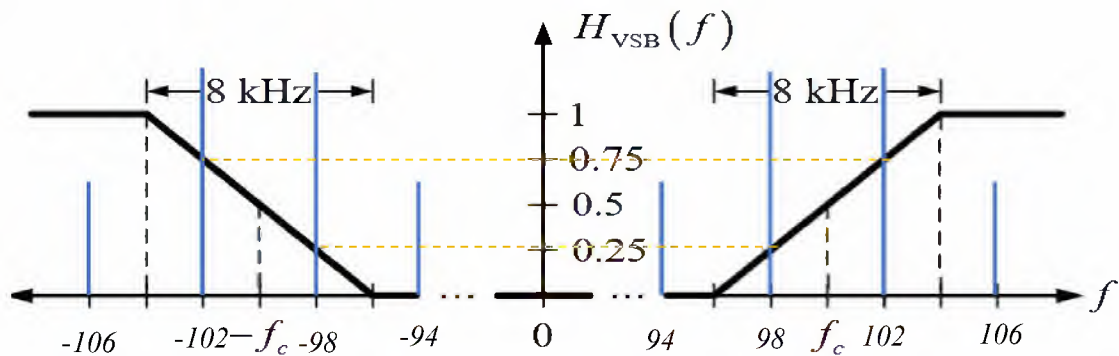
$$P_{DSB}(f) = (5)^2 \cdot [\delta(f - 102 \cdot 10^3) + \delta(f - 98 \cdot 10^3) + \delta(f + 98 \cdot 10^3) + \delta(f + 102 \cdot 10^3)] + (1)^2 \cdot [\delta(f - 106 \cdot 10^3) + \delta(f - 94 \cdot 10^3) + \delta(f + 94 \cdot 10^3) + \delta(f + 106 \cdot 10^3)]$$

Donc, $P_{DSB} = 25 \cdot (4) + 1 \cdot (4) = 104 [W]$

c) On veut transmettre le signal $m(t)$ en utilisant la modulation VSB.

c.1) L'expression spectrale $S_{VSB}(f)$ du signal VSB.

$$S_{VSB}(f) = S_{DSB}(f) \cdot H_{VSB}(f)$$



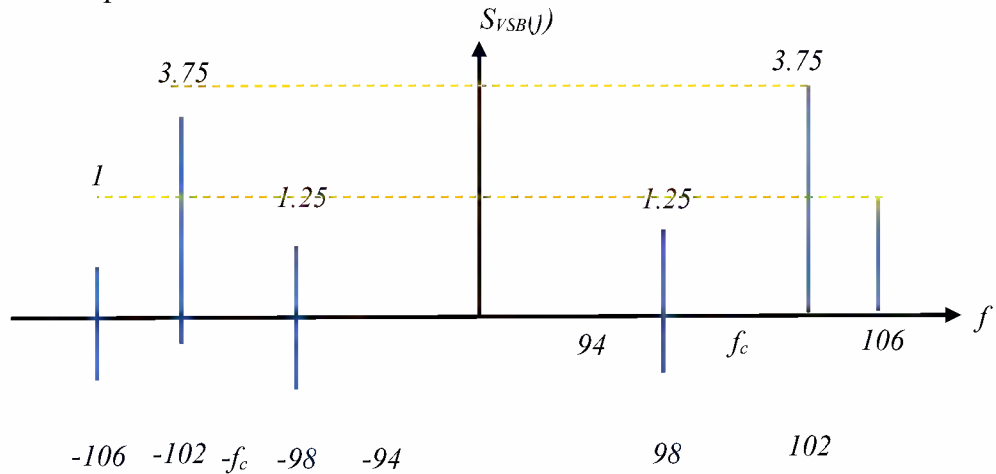
Après le filtrage,

$$S_{VSB}(f) = 1 \cdot [\delta(f - 106 \cdot 10^3) + \delta(f + 106 \cdot 10^3)] + (0.75) \cdot 5 \cdot [\delta(f - 102 \cdot 10^3) + \delta(f + 102 \cdot 10^3)] + (0.25) \cdot 5 \cdot [\delta(f - 98 \cdot 10^3) + \delta(f + 98 \cdot 10^3)] + (0) \cdot 1 \cdot [\delta(f - 94 \cdot 10^3) + \delta(f + 94 \cdot 10^3)]$$

Alors,

$$S_{VSB}(f) = [\delta(f - 106 \cdot 10^3) + \delta(f + 106 \cdot 10^3)] + 3.75 \cdot [\delta(f - 102 \cdot 10^3) + \delta(f + 102 \cdot 10^3)] + 1.25 \cdot [\delta(f - 98 \cdot 10^3) + \delta(f + 98 \cdot 10^3)]$$

Le spectre correspondant



c.2) Donner la puissance moyenne du signal VSB, P_{VSB} .

De même que celle précédente, la puissance moyenne P_{VSB} est donnée par

$$P_{VSB}(f) = (1)^2 \cdot [\delta(f - 106 \cdot 10^3) + \delta(f + 106 \cdot 10^3)] + (3.75)^2 \cdot [\delta(f - 102 \cdot 10^3) + \delta(f + 102 \cdot 10^3)] + (1.25)^2 \cdot [\delta(f - 98 \cdot 10^3) + \delta(f + 98 \cdot 10^3)]$$

Donc,

$$P_{VSB} = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{VSB}(f) df = 1 \cdot (2) + 14.06 \cdot (2) + 1.56 \cdot (2) = 33.25 [W]$$

Comparaison : $P_{VSB} < P_{DSB}$

La transmission par VSB permet de gagner un plus de puissance de transmission

Exercice 02 :

Soit un signal modulé en Amplitude AM est exprimé par l'équation suivante

$$S_{AM}(t) = 10(1 + 0.85 \cos 50t) \cdot \cos 500t$$

1. Déterminer A_c , l'indice de modulation m , la bande de transmission B_T et les fréquences f_c et f_m
2. Représenter $S(f)$ pour les cas suivants AM, AM-P et SSB (USB+LSB)
3. On suppose que l'émetteur AM a une puissance porteuse de 30 W. Le pourcentage de modulation est de 85 %. Calculer la puissance totale d'émission puis la puissance dans chaque bande latérale.
4. Déduire la valeur de la résistance d'antenne de transmission R

Solution :

Soit un signal modulé en Amplitude AM est exprimé par l'équation suivante

$$S_{AM}(t) = 10(1 + 0.85 \cos 50t) \cdot \cos 500t$$

- Détermination de A_c , l'indice de modulation m , la bande de transmission B_T et les fréquences f_c et f_m

L'expression d'un signal AM est donnée par

$$S_{AM}(t) = A_c(1 + m \cos W_m t) \cdot \cos W_c t$$

Par analogie, on trouve que

$$\begin{cases} A_c = 10V \\ m = 0.85 = 85\% \\ w_m = 50 \text{ rd/s} \\ w_c = 500 \text{ rd/s} \end{cases}$$

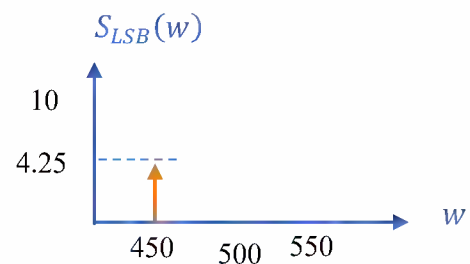
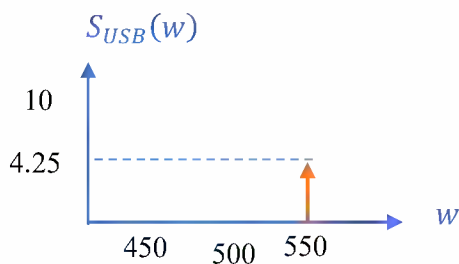
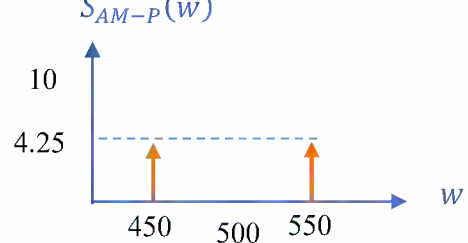
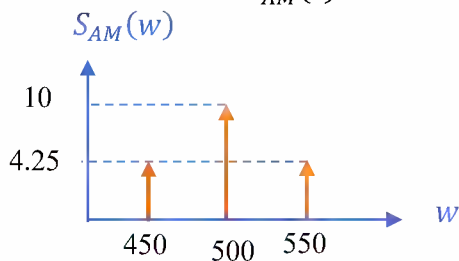
- Représentation du spectre $S(j)$ pour les cas suivants AM, AM-P et SSB (USB+LSB)

On peut réécrire l'expression d'un signal AM par

$$S_{AM}(t) = A_c \cos W_c t + m \frac{A_c}{2} \cos(W_c - W_m)t + m \frac{A_c}{2} \cos(W_c + W_m)t.$$

Dans notre cas,

$$S_{AM}(t) = 10 \cos 500t + 4.25 \cdot \cos 450t + 4.25 \cdot \cos 550t.$$



- Calcul de la puissance totale d'émission puis la puissance dans chaque bande latérale.

On suppose que l'émetteur AM a une puissance porteuse de 30 W. Le pourcentage de modulation est de 85 %.

$$\text{On a } P_{tot} = P_c \left[1 + \frac{m^2}{2} \right]$$

alors,

$$P_{tot} = 30 \left(1 + \frac{(0.85)^2}{2} \right) = 30(1.36125) = 40.84W$$

$$\text{De même, } P_{tot} = P_c + 2P_{SSB}$$

Donc,

$$P_{SSB} = \frac{1}{2}(P_{tot} - P_c)$$

Enfin,

$$P_{SSB} = P_{USB} = P_{LSB} = \frac{1}{2}(40.84 - 30) = 5.42 W$$

4. Déduire la valeur de la résistance d'antenne de transmission R

On suppose que le signal est une tension en [V]

Alors,

$$p_c = \frac{V^2}{R} = \frac{(A_c/\sqrt{2})^2}{R}$$

La résistance R est exprimée par

$$R = \frac{(A_c/\sqrt{2})^2}{p_c}$$

A.N :

$$R = \frac{(10/\sqrt{2})^2}{30} = 1.66\Omega$$

Exercice 03 :

On va transmettre un signal message $m(t) = \cos(2\pi t) + 2.\cos(12\pi t)$ en utilisant la modulation FM avec une porteuse d'amplitude $A_c=10$ V et de fréquence f_c de 200 Hz.

- Donner l'expression du signal transmis, $S_{FM}(t)$ pour une sensibilité de fréquence $k_f=18$ Hz/v.
- Déterminer la fréquence instantanée $f_i(t)$.

- c) Déterminer la déviation maximale en fréquence Δf .
- d) Calculer l'indice β puis déterminer le type de modulation FM. Justifier votre réponse
- e) Estimer la largeur de bande effective de transmission en utilisant la règle de Carson.

On donne : $\text{TF}\{A_c \cdot \cos(2\pi f_c t)\} = \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)]$

Solution :

On va transmettre un signal message $m(t) = \cos(2\pi t) + 2 \cdot \cos(12\pi t)$ en utilisant la modulation FM avec une porteuse d'amplitude $A_c=10$ V et de fréquence f_c de 200 Hz.

- a) L'expression du signal transmis, $S_{FM}(t)$ pour une sensibilité $k_f = 18$ [Hz/V].

$$\text{On a } S_{FM}(t) = A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right]$$

$$\text{Alors, } S_{FM}(t) = 10 \cos \left[400\pi t + 36\pi \int_0^t (\cos(2\pi\tau) + 2 \cdot \cos(12\pi\tau)) d\tau \right]$$

$$S_{FM}(t) = 10 \cos \left[400\pi t + 36\pi \left(\frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\pi t) + \frac{2}{12\pi} \cdot \sin(12\pi t) \right) \right]$$

$$S_{FM}(t) = 10 \cos[400\pi t + 18\pi \cdot \sin(2\pi t) + 6 \cdot \sin(12\pi t)]$$

- b) Détermination de la fréquence instantanée $f_i(t)$.

$$\text{La phase instantanée } \theta_i(t) = 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau$$

$$\text{Alors que la fréquence instantanée est donnée par } f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta_i(t)}{dt} = f_c + \frac{1}{2\pi} (2\pi k_f m(t))$$

$$\text{Dans ce cas, } f_i(t) = 200 + 18 \cdot \cos(2\pi t) + 36 \cdot \cos(12\pi t)$$

- c) Détermination de la déviation maximale en fréquence Δf .

$$\text{La déviation maximale } \Delta f = 18 \cdot (\cos(2\pi t) + 2 \cdot \cos(12\pi t))_{max}$$

$$\text{Voir que à } t=0, \cos(2\pi t) = 1 \text{ et } \cos(12\pi t) = 1$$

$$\text{Donc, } \Delta f = 18 \cdot 3 = 54 \text{ Hz}$$

- d) Calcul de l'indice de modulation β puis la détermination de type de modulation FM.

$$\text{Mathématiquement, l'indice } \beta \text{ est donné par } \beta = \Delta f / f_m$$

Ici, $m(t)$ a deux fréquences f_{m1} et f_{m2} , pour calculer β , on doit utiliser le maximum ($f_{m1}=1$ Hz et $f_{m2}=6$ Hz)

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_{m2}} = \frac{54}{6} = 9$$

Le type de modulation FM est FM à large bande (WBFM)

Justification

L'indice β est quelconque (n'est pas négligeable), ce qui rend l'approximation n'est pas possible.

Théoriquement sa bande de transmission est infinie

- e) Estimation de la largeur de bande effective de transmission en utilisant la règle de Carson.

Suivant la règle de Carson, le nombre des raies significatives est donné par $N(\beta) = \beta + 1$, alors

$$B_T = 2 \cdot (\beta + 1) f_{m2}, (f_{m2} \text{ est la fréquence maximale du message})$$

$$B_T = 2 \cdot (9 + 1) \cdot 6 = 120 \text{ Hz}$$

Exercice 04 :

On considère une onde FM à bande étroite : $S(t) = A_c \cos 2\pi f_c t - \beta A_c \sin 2\pi f_c t \cdot \sin 2\pi f_m t$

- Déterminer l'enveloppe de cette onde modulée. Quelle est la valeur du rapport de maximum au minimum de cette enveloppe ? Tracer ce rapport en fonction de β , en supposant que β est limité à l'intervalle $0 \leq \beta \leq 0.25$.
- Déterminer la puissance moyenne de l'onde FM à bande étroite, exprimée comme un pourcentage de la puissance moyenne de l'onde porteuse non modulée. Tracer ce résultat en fonction de β ; $0 \leq \beta \leq 0.25$;
- Déterminer la fréquence instantanée de l'onde FM à bande étroite.

Solution :

- Détermination l'enveloppe de l'onde modulée

Une onde FM à bande étroite : $S(t) = A_c \cos 2\pi f_c t - \beta A_c \sin 2\pi f_c t \cdot \sin 2\pi f_m t$

Trigonomériquement, on a $A \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta = L \cdot \cos(\theta - \phi)$

$$\begin{aligned} A \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta &= \sqrt{A^2 + B^2} \cdot \left[\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cdot \cos \theta + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cdot \sin \theta \right] \\ &= \sqrt{A^2 + B^2} \cdot [\cos \phi \cdot \cos \theta + \sin \phi \cdot \sin \theta] \end{aligned}$$

Par comparaison, on trouve

$$\begin{cases} L = \sqrt{A^2 + B^2} \\ \sin \phi = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \frac{B}{L} \\ \cos \phi = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \frac{A}{L} \end{cases}$$

Dans $S(t) = A_c \cos 2\pi f_c t - \beta A_c \sin 2\pi f_c t \cdot \sin 2\pi f_m t$

On pose $A=A_c$, $\theta=2\pi f_c t$, $B=-\beta A_c \sin 2\pi f_c t$

Donc, $L = \sqrt{A_c^2 + (\beta A_c \sin 2\pi f_c t)^2} = A_c [1 + \beta^2 \sin^2 2\pi f_c t]^{1/2} = A_c \left[1 + \frac{1}{2}\beta^2 \sin^2 2\pi f_c t\right]$

$\beta \ll 1$ (bande étroite, on peut appliquer la règle de Moivre: $(1 + \alpha)^n = 1 + n\alpha$)

Alors, l'enveloppe $L(t)$: $L(t) = A_c \left[1 + \frac{1}{2}\beta^2 \sin^2 2\pi f_c t\right]$

La valeur du rapport de maximum au minimum de cette enveloppe

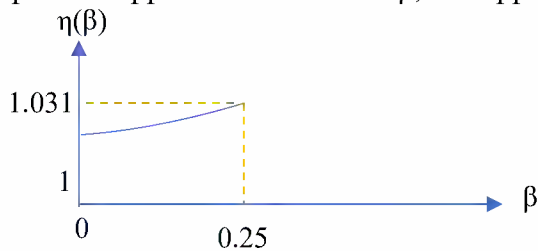
Le rapport $\eta = \frac{L_{max}}{L_{min}}$

$$L_{max} = L(t)_{\sin^2 2\pi f_c t = \pm 1} = A_c \left[1 + \frac{1}{2}\beta^2\right]$$

$$L_{min} = L(t)_{\sin^2 2\pi f_c t = 0} = A_c$$

$$\eta = \frac{L_{max}}{L_{min}} = \left[1 + \frac{1}{2}\beta^2\right]$$

Le graphe du rapport en fonction de β , en supposant que β est limité à l'intervalle $0 \leq \beta \leq 0.25$.



2. Détermination de la puissance moyenne de l'onde FM à bande étroite, exprimée comme un pourcentage de la puissance moyenne de l'onde porteuse non modulée.

La puissance moyenne de la porteuse non modulée est donnée par

$$p_c = \frac{V^2}{R} = \frac{(A_c/\sqrt{2})^2}{R} = (A_c/\sqrt{2})^2 \text{ pour une } R=1\Omega$$

La puissance moyenne de signal FM est donnée par

$$P_S = \frac{A_c^2}{2} + \frac{\beta^2 A_c^2}{8} + \frac{\beta^2 A_c^2}{8} = \frac{A_c^2}{2} \left(1 + \frac{\beta^2}{2}\right) = P_c \left(1 + \frac{\beta^2}{2}\right)$$

$$\text{Soit le rapport } \gamma = \frac{P_S}{P_c} = \left(1 + \frac{\beta^2}{2}\right)$$

On note que le graphe γ est le même que celui de η

3. La fréquence instantanée de l'onde FM à bande étroite.

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} \text{ avec } \theta_i(t) = \theta - \Phi(t) = 2\pi f_c t - \Phi(t)$$

$$f_i(t) = f_c - \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

$$\Phi(t) = \text{Arccos}\left(\frac{A}{L}\right) = \text{Arccos}\left(1 - \frac{1}{2}\beta^2 \sin^2 2\pi f_c t\right)$$

Rappel $[\text{Arccos } x]' = \frac{-1}{\sqrt{1-x^2}}$

$$\text{Alors, } \frac{d\Phi(t)}{dt} = 2\pi f_m \beta \cos 2\pi f_m t$$

Car $\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$ et $[\sin^2 x]' = 2 \sin x \cos x$

$$\text{Enfin, } f_i(t) = f_c - \beta f_m \cos 2\pi f_m t$$

Exercice 05:

Solution :

III.7.1 Problèmes et exercices

Exercice 01 :

Soit un signal modulé en Amplitude (AM) $f(t) = 5(1 + \cos 50t) \cdot \cos 500t$

5. Déterminer A_c , l'indice m et les fréquences f_c et f_m
6. Représenter $F(f)$ en AM, A_m sans porteuse et SSB (USB+LSB)
7. Si on considère la résistance de l'antenne de transmission $R=75\Omega$, déterminer la puissance d'émission totale, de la porteuse et de chaque bande latérale.

Exercice 02:

On considère une onde modulée en AM, le signal message est donné par $m(t) = A_m \cdot \cos w_m t$

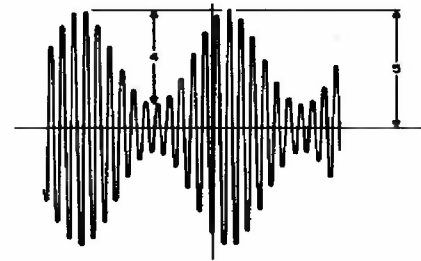
1. Ecrire l'équation de l'onde modulée $s(t)$ et représenter cette onde temporellement pour différents indices de modulation m : $m=0$, $m=0.1$, $m=0.25$, $m=0.5$ et $m=1$. Exprimer, dans chaque cas, les valeurs minimale et maximale positives de l'onde modulée
2. On pose $A_m=1.5A_c$ Réécrire l'équation $s(t)$.
3. Que peut-on dire de l'enveloppe du signal modulé. Peut-on récupérer le signal message au niveau de récepteur (démodulation)

Exercice 03 :

Un signal AM a une fréquence de porteuse de 100 kHz, une fréquence modulante de 4 kHz et une puissance d'émission de 150 kW. Le signal reçu par le récepteur a l'allure suivante :

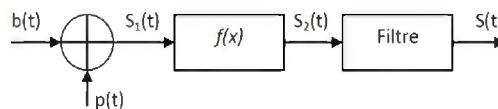
Déterminer :

- Les fréquences contenues dans ce signal
- La bande de fréquence occupée
- L'indice de modulation
- La puissance de la porteuse
- La puissance d'une bande latérale



Exercice 04 :

On donne le schéma suivant

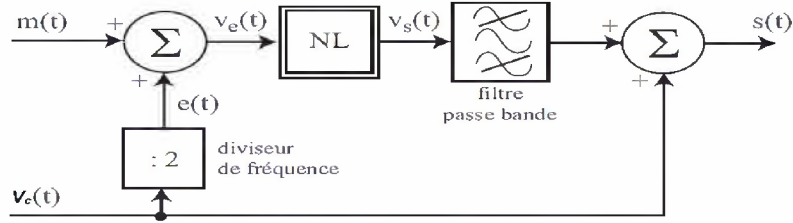


Avec $f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$, $p(t) = P \cos(\omega t + \varphi)$ et $b(t) = B \cos(\omega_b t)$

1. Déterminer l'expression de chacun des signaux $S_1(t)$, $S_2(t)$ et donner son spectre.
2. Pour produire un signal AM en sortie, quelle doivent être les caractéristiques du filtre utilisé.

Exercice 05 :

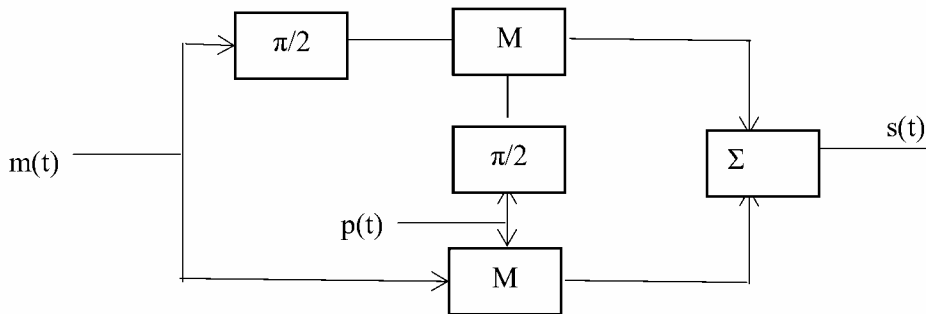
Le schéma bloc suivant représente un modulateur d'amplitude où $V_c(t) = A \cos 2\pi f_0 t$ représente la porteuse et $m(t) = b \cdot x(t)$ le signal modulant avec $|x(t)| \leq 1$. Le circuit non linéaire est caractérisé par l'équation $V_s = a \cdot V_e^3$ où V_s désigne sa sortie et V_e son entrée.



1. Donner l'expression des signaux $V_e(t)$ et $V_s(t)$.
2. Quelle est la condition sur le filtre passe bande pour obtenir un signal AM DBAP en sortie ? Donner alors l'expression de $s(t)$.
3. Déterminer l'indice de modulation k du signal AM si $A = 1$, $a = 2$ et $b = 0,2$. Donner la représentation temporelle puis spectrale de $s(t)$.

Exercice 06 :

Soit le dispositif de la figure suivante comprenant des déphaseurs ($+90^\circ$), des multiplicateurs analogiques (M) de coefficient k ($z=k.x.y$) et un additionneur. La porteuse utilisée est sinusoïdale $p(t)=P_m \cdot \cos(\omega_0 t)$ et l'information $m(t)=M_m \cdot \cos(\omega_m t + \phi)$



1. Exprimer $s(t)$.
2. le signal modulant $m(t)$ est déterministe, à spectre borné de support $[0, F_{\max}]$. Indiquer dans quel intervalle se trouve compris le spectre de s .
3. Quelle différence présente ce signal par rapport à celui obtenu par modulation à porteuse supprimée.

Exercice 07 :

On va moduler, en AM, une porteuse donnée en utilisant un signal vidéo de l'expression suivante $m(t)=-20+60 \sin(\omega_m t)$ avec $f_m=3.57\text{MHz}$. On donne $A_c=100$.

1. Donner l'expression du signal modulé puis sa représentation temporelle $S_{AM}(t)$.
2. Calculer S_{\max} , S_{\min} et le taux de modulation en pourcentage %

3. Calculer l'expression $S(f)$ du spectre de signal modulé en amplitude et donner sa représentation autour de f_c

Exercice 08 :

Le signal $v(t)$ est un signal modulé en fréquence par le signal sinusoïdale $m(t)$

$$v(t) = 17. \cos(2\pi. 103,7. 10^6. t + 5. \sin(3554,3. t))$$

- a. Donner l'amplitude v_o du signal $v(t)$ et l'amplitude P_o de la porteuse $P(t)$.
- b. Donner la fréquence f_p de la porteuse $P(t)$.
- c. Donner la fréquence f_m du signal modulant $m(t)$.
- d. Donner l'indice de modulation β et l'excursion en fréquence Δf .
- e. Donner la largeur du spectre BV de $v(t)$.
- f. Montrer que pour une constante d'intégration $k=4000\text{Hz/V}$, le signal modulant $m(t)$ peut s'écrire sous la forme suivante : $m(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}. \cos(2\pi. f_m. t)$

Exercice 09 :

On considère un signal $S(i)$ modulé en fréquence.

1. Ecrire l'expression de définition de ce signal d'une manière générale.
2. Le signal $m(i)$ modulant est une composante continue de valeur égale à « b » ; b = constante réelle
 - 2.1 Ecrire dans ce cas l'expression du signal modulé.
 - 2.2 Quelle est la fréquence du signal modulé et quelle est l'indice de modulation ?
3. Calculer le spectre du signal modulé et donner sa représentation pour les cas suivants : b=0 ; b=0.5.

Exercice 10 :

On considère le signal modulé en fréquence $S(i)$. L'excursion maximale en fréquence de ce signal est égale à 40 KHz. Le signal modulant $m(i)$ est de type sinusoïdal de fréquence $f_m=80\text{KHz}$.

1. Trouver la bande passante du système capable de transmettre le signal modulé en fréquence et donner le spectre représentatif du $S_{FM}(i)$.
2. Refaire la première question pour $f_m=8\text{ KHz}$.

Exercice 11 :

On considère une onde FM à bande étroite :

$$S(t) = A_c \cos(2\pi f_c t - \beta A_c \sin(2\pi f_m t))$$

- Déterminer l'enveloppe de cette onde modulée. Quelle est la valeur du rapport de maximum au minimum de cette enveloppe ? Tracer ce rapport en fonction de β , en supposant que β est limité à l'intervalle $0 \leq \beta \leq 0.5$.
- Déterminer la puissance moyenne de l'onde FM à bande étroite, exprimée comme un pourcentage de la puissance moyenne de l'onde porteuse non modulée. Tracer ce résultat en fonction de β ; $0 \leq \beta \leq 0.5$;
- Déterminer la fréquence instantanée de l'onde FM à bande étroite.

Exercice 12 :

Une onde FM ayant un indice de modulation $\beta=1$ est transmise à travers un filtre passe bande de fréquence f_c et de largeur de bande $5f_m$ où f_c est la fréquence de l'onde sinusoïdale modulante.

Déterminer l'enveloppe, la phase et la fréquence instantanée du signal à la sortie du filtre.

Exercice 13 :

On considère une onde FM à bande étroite de l'expression suivante

$$S(t) = A_c \cos(2\pi f_c t - \beta A_c \sin(2\pi f_m t))$$

- Déterminer l'enveloppe de cette onde modulée. Quelle est la valeur du rapport de maximum au minimum de cette enveloppe ? Tracer ce rapport en fonction de β , en supposant que β est limité à l'intervalle $0 \leq \beta \leq 0.5$.
- Déterminer la puissance moyenne de l'onde FM à bande étroite, exprimée comme un pourcentage de la puissance moyenne de l'onde porteuse non modulée. Tracer ce résultat en fonction de β ; $0 \leq \beta \leq 0.5$;
- Déterminer la fréquence instantanée de l'onde FM à bande étroite.

Exercice 14 :

La représentation cartésienne d'un signal en bande de base $s(t)$ est appartenue à la modulation linéaire (AM), $S(t) = a(t) \cos [2\pi f_c t + \phi(t)]$

Alors que la représentation polaire de ce signal définit par l'équation suivante

$$S(i) = S_i(i) \cos [2\pi f_c i] - S_Q(i) \sin [2\pi f_c i]$$

Où $S_i(i)$ est la partie réelle alors que $S_Q(i)$ est la partie imaginaire.

- A. Monter que les deux représentations sont équivalentes.

Exercice 15 :

Un signal AM à bande latérale unique est donné par

$$S_{SSB}(t) = [1000 \cdot \text{sinc}(1000\pi t)] \cdot \cos(11000\pi t)$$

On donne $C(t) = \cos(10000\pi t)$

- a. Calculer $S(f)$ puis représenter le spectre du signal AM.
- b. Donner un schéma de démodulation de ce signal AM
- c. Déterminer le signal message $m(t)$.

CHAPITRE IV

TECHNIQUE DE TRANSMISSION NUMERIQUES

IV.1 Introduction

IV.2 Principe de transmission numérique

IV.3 Echantillonnage

IV.4 Quantification

IV.5 Codage

IV.6 Conclusion

IV.7 Problèmes et exercices



La modulation numérique est la technique la plus utilisée dans les systèmes de télécommunications modernes. Parmi ces systèmes, on cite les différentes générations du réseau mobile, et des autres systèmes de communications.

TECHNIQUES DE TRANSMISSION NUMERIQUES

Objectif :

Ce chapitre est consacré aux techniques de transmission numériques. L'étudiant va apprendre les concepts de base de la transmission numérique et les procédures de numérisation d'un signal analogique. A la fin du chapitre, l'étudiant doit avoir une bonne idée sur

- ✓ L'importance de la transmission numérique dans le domaine de télécommunication
- ✓ Les différentes étapes de numérisation (échantillonnage, quantification et codage)
- ✓ Quelques types de modulation numérique (MIC, ...)

IV.1 Introduction

Les phénomènes physiques sont des fonctions continues (de nature analogique). Dans les systèmes de communications analogiques, les phénomènes physiques sont transformés en grandeurs exploitables par le système en utilisant des transducteurs (camera, microphone, ...). Au début, les communications sont traitées en tant qu'électronique analogique, par ce que les signaux d'information (messages) transmis et reçus sont identiques aux quantités physiques qu'ils représentent.

Malgré que les systèmes analogiques présentent plusieurs avantages tels que la simplicité (pas de besoin de la conversion des signaux de numérique vers l'analogique), elles présentent un inconvénient majeur présenté dans la sensibilité au bruit. De même, les interférences de forte puissance peuvent détruire les informations transmises de sorte qu'elles

ne peuvent pas être récupérées. Rien dans le signal analogique transmis ne permet de récupérer les informations perdues. Pour cela et pour d'autres raisons, le domaine des communications est entré dans le domaine numérique, où les informations sont encodées dans le système binaire (0, 1).

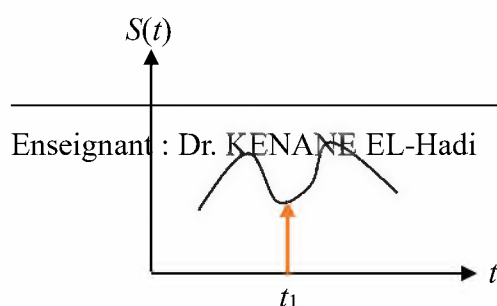
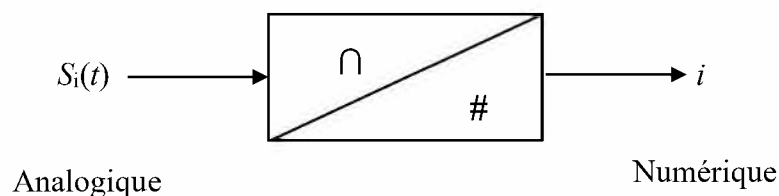
Les systèmes de communication numériques présentent plusieurs avantages. Parmi ces avantages les plus importants est la possibilité de récupérer des informations perdues grâce à diverses techniques de correction d'erreurs. Les effets du bruit et d'autres phénomènes indésirables existant dans le canal de transmission sont faibles dans les systèmes numériques que dans les systèmes analogiques. Dans la transmission analogique, la récupération de l'information originale est impossible lorsqu'on ne connaît pas la tension d'origine, par contre, dans la transmission numérique, les caractéristiques du signal sont connues d'où on peut le reconstruire à l'identique du signal produit à la source. Ces avantages et des autres ont conduit à une large diffusion du traitement du signal numérique et des techniques de transmission numériques au cours des deux dernières décennies.

Avant d'aborder les différents process de la transmission numérique, on va voir le principe de transmission de cette technique.

IV.2 Principe de transmission numérique

La transmission numérique est très intéressante dans le domaine des télécommunications, où elle permet de transmettre un signal à des distances très longues avec une grande fidélité (système fiable).

La modulation numérique consiste à convertir une information analogique, portée par un signal à variations continues, en une séquence de caractères discrets.



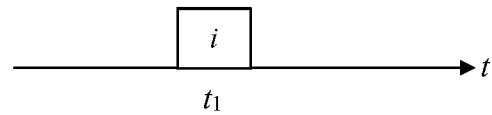


Figure IV.1 : *Principe de la modulation numérique*

Généralement, un système de transmission numérique englobe trois parties d'une manière similaire que celle existe dans un système analogique, seulement quelques éléments seront inclus dans la chaîne de transmission pour faire la numérisation tels que les convertisseurs CAN et CNA. La chaîne de transmission numérique est schématisée dans la figure suivante

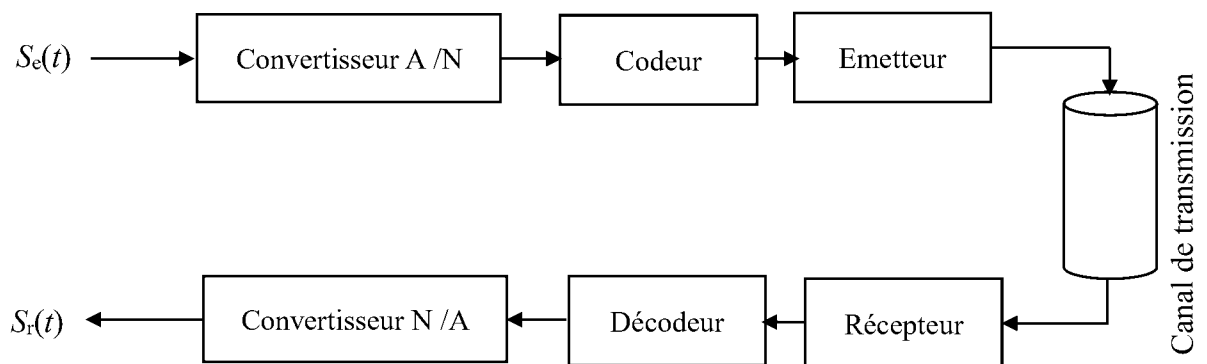


Figure IV.2 : *Schéma d'un système de transmission numérique*

IV.2.1 Représentation d'une information numérique

Dans un système numérique, une information est représentée par des caractères où chaque caractère est représenté par une suite de moments (par exemple train des bits) de durée T_M . Dans une transmission m -aire (un moment va prendre m valeurs), le débit de décision \dot{D} (bit/s) est donné par

$$\dot{D} = \dot{M} \cdot \ln m \quad \text{avec } \dot{M} \text{ est le débit de moments et donné par } \dot{M} = \frac{1}{T_M}$$

Pour représenter un nombre n de caractères, un nombre η de moments nécessaires doit prendre $\eta \geq \frac{\ln n}{\ln m}$

IV.2.2 La modulation d'impulsions codées (MIC)

En réalité, il existe quatre types de modulation par impulsions

- La modulation PAM (*pulse amplitude modulation*)
- La modulation PPM (*pulse position modulation*)
- La modulation PWM (*pulse width modulation*)
- La modulation PCM

Dans ce cours, on s'intéresse par le dernier type de modulation par impulsions. La modulation d'impulsions codées (MIC ou PCM à partir de la notation anglaise pulse code modulation). C'est une combinaison de trois opérations : échantillonnage, quantification et codage. A chaque échantillon analogique, la modulation MIC affecte un niveau (parmi q niveaux) qui est correspondant à un nombre de bits (code adéquat). Le schéma de base de cette modulation est illustré dans la figure suivante :

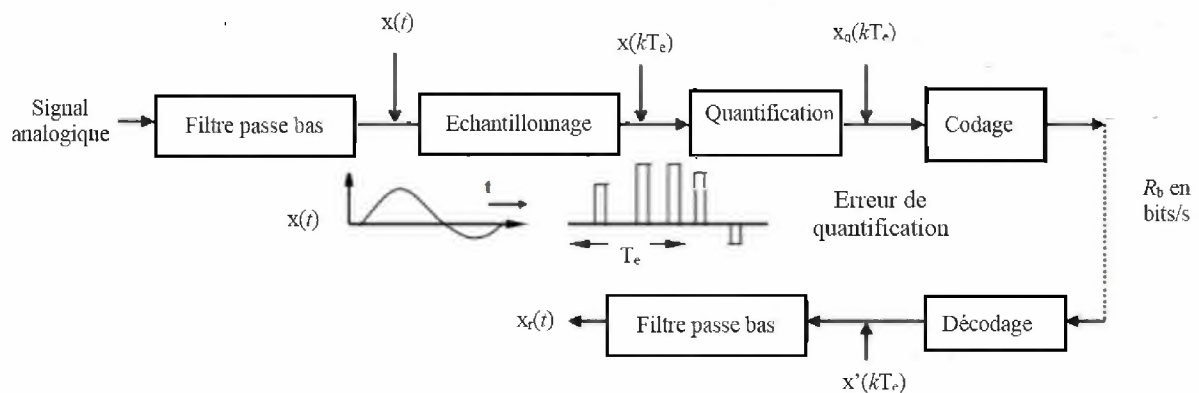


Figure IV.3 : Schéma bloc d'un système numérique à modulation MIC

Soit $x(t)$ est le signal filtré par le filtre passe bas (dans la téléphonie). La numérisation de ce signal sera passée par trois opérations principales : l'échantillonnage à une fréquence f_e afin d'avoir $x(kT_e)$, la quantification (approximation) de l'échantillon $x(kT_e)$ à q niveaux et le codage de q nombres correspondant aux échantillons quantifiés. $T_e = 1/f_e$ où f_e indique la fréquence d'échantillonnage. Généralement, le codage est binaire (les moments D sont binaires : 0 et 1). Dans la téléphonie, la fréquence d'échantillonnage pour bande passante de 300 Hz à 3.4 KHz a été fixée par 8 KHz ($f_e = 8$ KHz, par convention internationale) où le théorème de Nyquist est réalisé.

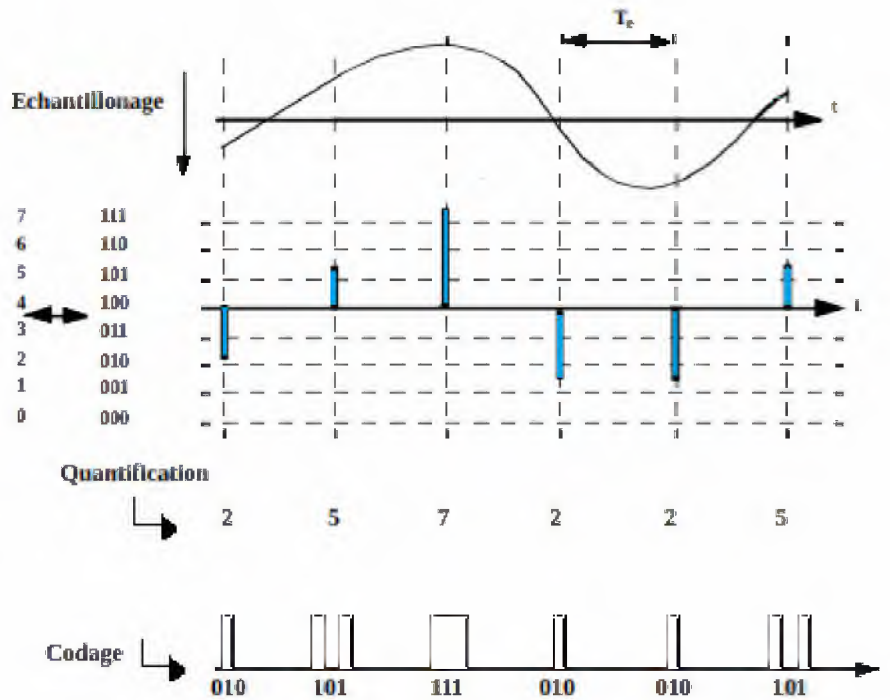


Figure IV.4 : Les trois étapes de la modulation MIC

La récupération des signaux, au niveau de réception, nécessite un signal horloge pour faire la synchronisation.

IV.3 Echantillonnage

Toute information produite est un signal analogique. Ce type de signal ne peut pas être traité par un système numérique car il est continu dans le temps c'est-à-dire à tout instant «t» le signal $s(t)$ a une amplitude (une infinité d'amplitudes). Un échantillonnage est donc nécessaire afin de choisir certain nombre de valeurs du signal continu $s(t)$. Ces valeurs sont connues par des échantillons.

Généralement, ces échantillons sont pris à des intervalles de temps réguliers. Ensuite, ils sont transformés en une suite discrète d'échantillons et le signal produit est noté par $S^*(t)$. Ces impulsions sont espacées de T_e , de largeur τ et d'amplitude $S(nT_e)$.

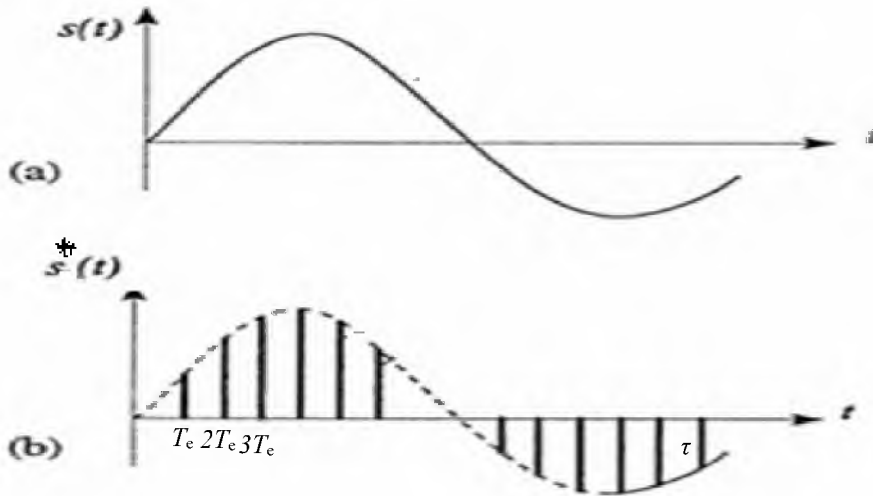
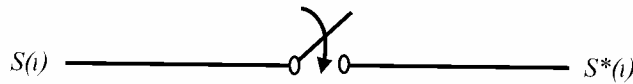


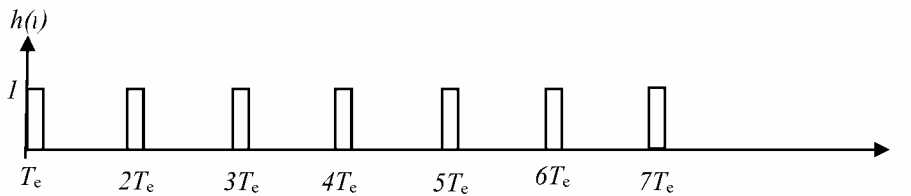
Figure IV.5 : Procédure de l'échantillonnage

On note ici que la période T_e avec laquelle on prélève ces échantillons. On a alors une fréquence d'échantillonnage $F_e = 1/T_e$.

L'échantillonneur est un interrupteur commandé (transistor à commutation rapide) par une horloge qui se forme pendant une durée τ et s'ouvre le reste de la période T_e .



L'horloge peut prendre la forme suivante



Le signal échantillonné $s^*(t)$ serait donc le résultat du produit $s(t)$ et l'horloge $h(t)$:

$$S^*(t) = S(t) \cdot h(t)$$

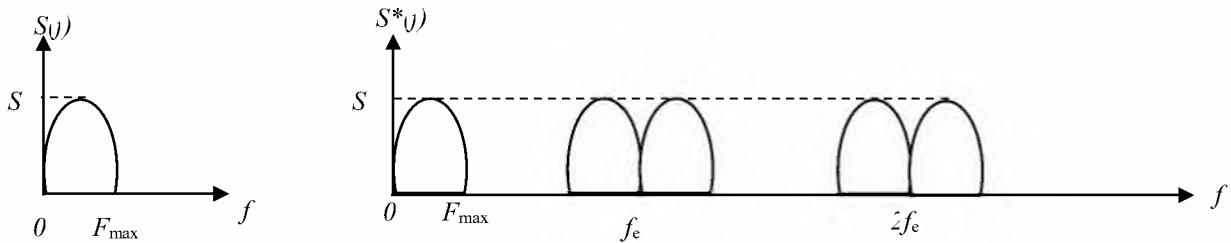
NB : h est périodique, on a la possibilité de le décomposer en série de Fourier.

$$h(t) = h_0 + h_1 \cdot \cos w_e t + h_2 \cdot \cos 2w_e t + \dots + h_n \cdot \cos n w_e t$$

avec $h_0 = \tau/T_e$ et $h_n = \frac{2 \sin n\pi \frac{\tau}{T_e}}{n\pi}$, $n > 1$

$$S^*(t) = S(t) \cdot \frac{\tau}{T_e} + \frac{2\tau}{T_e} \cdot S(t) \cdot \cos w_e t + \frac{2\tau}{T_e} \cdot S(t) \cdot \cos 2w_e t + \dots$$

Voir que le signal $S^*(t)$ est très riche en harmoniques et son spectre se présente comme une reproduction de $S(f)$ autour de $n f_e$.



Pour ne pas perdre l'information, le théorème de Nyquist doit être respecté, d'où la fréquence d'échantillonnage doit être au moins égale au double de la fréquence maximale du $S(t)$: $f_e \geq 2 \cdot F_{max}$.

A la réception, pour récupérer l'information, un filtre passe bas est suffisant.

IV.3.1 Echantillonnage et maintien (*sample and hold*)

Cet échantillonneur est un échantillonneur bloqueur, d'où on prélève un échantillon du signal $S(t)$ pendant une durée τ puis on maintient sa valeur jusqu'à l'impulsion suivante de $h(t)$. Ce blocage permettra au convertisseur CAN de générer le code nécessaire sur N bits correspondant à cette valeur échantillonnée.

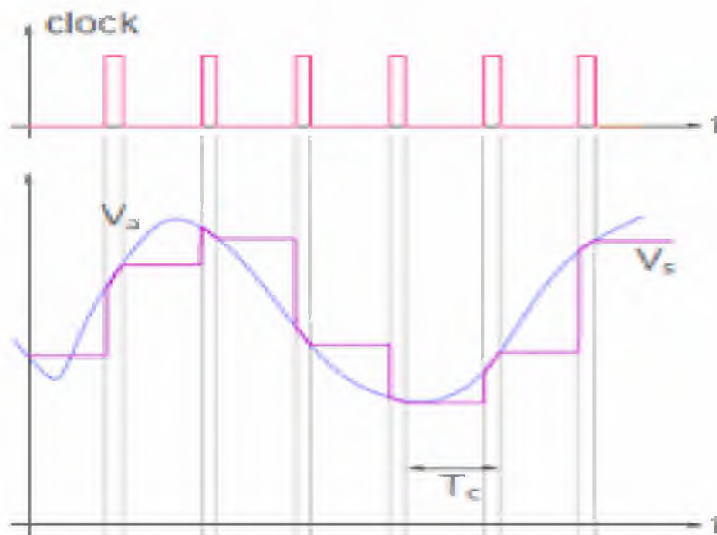


Figure IV.6 : Echantillonnage avec maintien

Pratiquement, ce maintien est réalisé par la charge/ décharge d'un condensateur qui possède un faible courant de fuite.

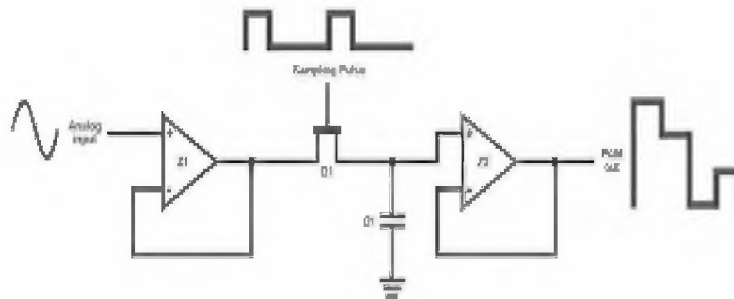


Figure IV.7 : Circuit d'un échantillonneur avec maintien

IV.4 Quantification

Dans la quantification, on doit représenter les impulsions MIC par un nombre fini (limité) de niveaux qui dépend du nombre de bits choisis pour faire le codage du signal à transmettre.

Il existe deux types de quantification, une quantification uniforme ou linéaire et une autre non uniforme ou non linéaire, où les pas de quantification peuvent être différents les uns des autres.

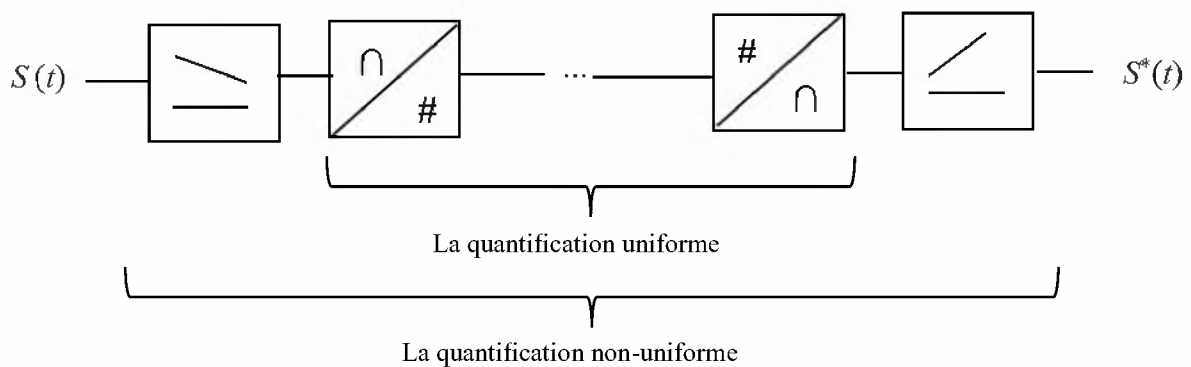


Figure IV.8 : Quantification avec compression et extension

IV.4.1 Quantification uniforme

Dans ce type de quantification, les éléments binaires étant en nombre limité, N bits, on ne disposera donc de 2^N combinaisons pour quantifier des échantillons qui peuvent prendre

une infinité de valeurs. Elle consiste à choisir les niveaux de quantifications de sorte que toute la gamme des échantillons soit quantifiable avec un pas de quantification fixe (q).

Exemple

Soit un signal échantillonné $S_e(t)$ dont les échantillons sont compris entre les tensions S_{min} et S_{max} . On va effectuer une quantification linéaire sur N bits. On dispose donc de 2^N combinaisons possibles qu'il faut répartir entre S_{min} et S_{max} .

3 bits $\longrightarrow 2^N=2^3=8$ niveaux.

Dans ce cas, le pas de quantification Δ est donné par

$$\Delta = \frac{(S_{max} - S_{min})}{2^N} = \frac{2S_{max}}{q}$$

La figure suivante montre un exemple de quantification uniforme ($\Delta=constante$)

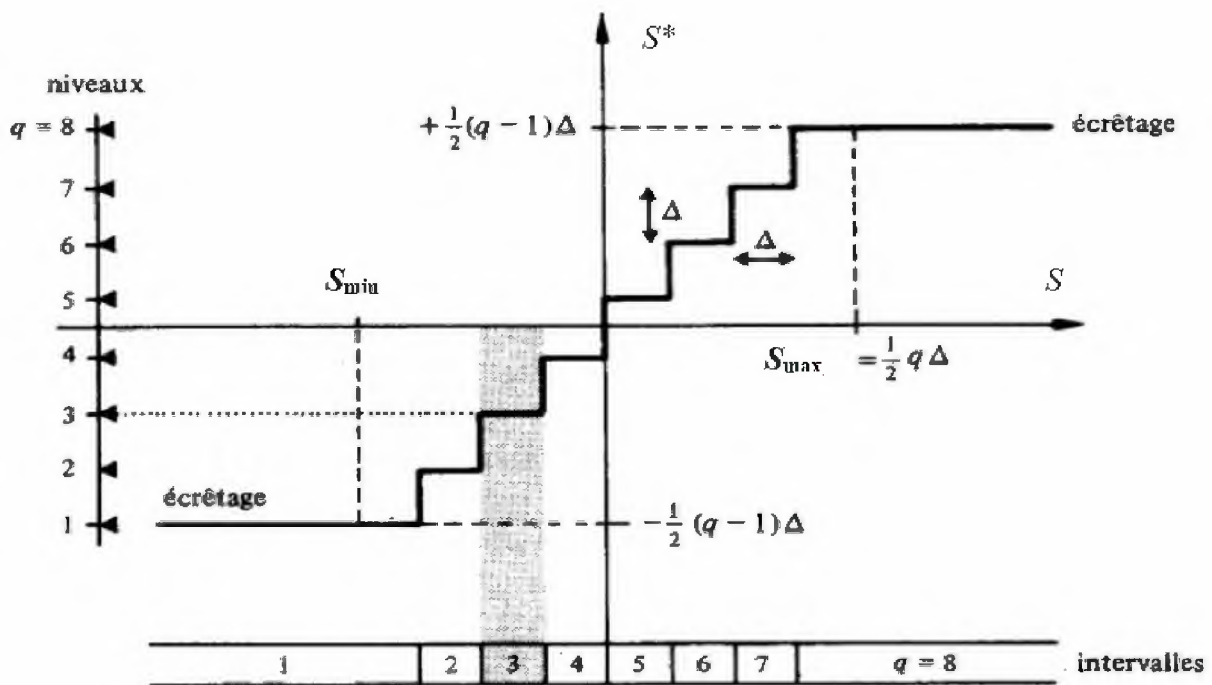


Figure IV.9 : Exemple d'une quantification uniforme

IV.4.2 Distorsion et bruit de quantification

Le fait de quantifier une valeur, c'est-à-dire de remplacer une valeur d'un échantillon par une autre valeur voisine, introduit une erreur $e(t)$ de quantification.

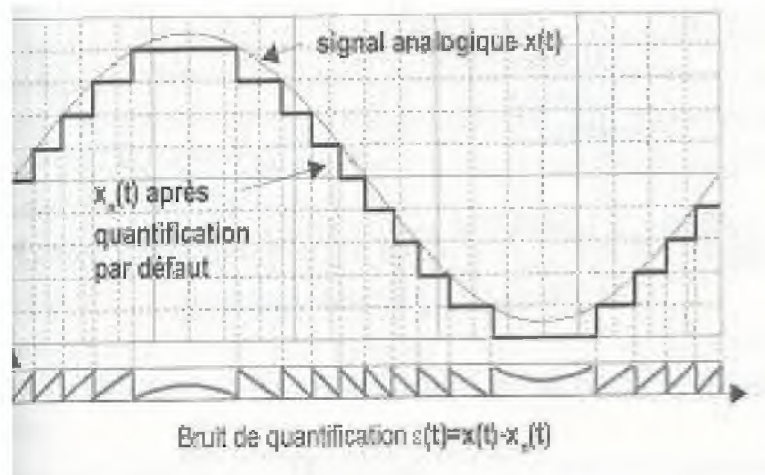


Figure IV.10 : Erreur de quantification uniforme

D'après la courbe de l'erreur $e(t)$

$$e(t) = \frac{\Delta/2}{T/2} t = \frac{\Delta}{T} t$$

Le bruit de quantification est la puissance moyenne de l'erreur

$$B = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} e^2(t) dt = \frac{1}{T} \cdot \frac{\Delta^2}{T^2} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} t^2 dt = \frac{\Delta^2}{12}$$

B est l'estimation de la puissance du bruit de quantification dans un quantificateur uniforme.

IV.5 Codage

Après l'échantillonnage et la quantification, on obtient des valeurs discrètes en temps et en amplitude. Le codage va traduire ces valeurs à des états logiques (généralement binaire) convenables pour faire la transmission. Dans l'enchaînement de la transmission numérique, Il existe deux process de codage

IV.5.1 Codage de source

Il s'agit de traduire les états logiques en niveaux de tension en utilisant des codes binaires (0 & 1) ou des codes M-aires (M niveaux). Le résultat est un signal électrique à 2 ou M niveaux. Ces codes se différencient, outre par leur règle, par le spectre du signal électrique qui en résulte.

IV.5.2 Codage de canal

Généralement, le codage du canal est défini comme un rajout de bits d'informations supplémentaires dans le message transmis ce qui permet de corriger les éventuelles erreurs de transmission.

IV.5.3 Type de codeur

Le codage est une opération très importante et prend beaucoup du temps. Pour cela, de préférence on va choisir un échantillonneur avec maintien que ce soit le type de codeur. Généralement, il existe plusieurs types de codeur. Parmi ces codeurs, on peut trouver

- Codeur sériel
- Codeur parallèle
- Codeur itératif

Note :

Dans certain cas, on a le besoin d'utiliser la compression des données. Cette opération est réversible pour assurer la récupération des informations originales au niveau de réception. Généralement, on utilise cette opération dans le cas où les données sont trop volumineuses ou bien leur débit est trop important pour le canal de transmission. Le principe général est de créer une information plus petite en taille que l'information originale.

Exemple

- Fichiers archives d'extension .zip ou .rar
- Fichiers audios d'extension .mp3
- Fichier images de type .png
- Des autres fichiers de type exécutable d'extension .exe ou fichier texte d'extension .txt

IV.6 Conclusion

Les techniques de transmission numériques jouent un rôle essentiel dans les systèmes de communication modernes ce qui permet de faire un transfert de données fiable et efficace. Dans ce chapitre, on a présenté les techniques de transmission numériques. Après, on a vu la numérisation d'un signal analogique en passant par trois étapes essentielles (échantillonnage, quantification et codage). Les différentes procédures de numérisation sont présentées.

IV.7 Problèmes et exercices

On considère le signal cosinus tel que : $x[k] = \cos(2\pi k/6)$, observé sur une durée limitée $T=N.T_e$, avec comme fréquence d'échantillonnage $f_e = 1\text{kHz}$. On considère trois cas : $N=6$, $N=12$ et $N=16$.

1. Quelle est la fréquence du signal à temps discret s'il était défini sur une durée infinie ?
2. Calculez la TFD dans les deux premiers cas. On pourra s'aider de ce que sur l'ordinateur on trouve les résultats affichés sur la figure suivante.
3. Le calcul de la TFD dans ces 3 configurations donne les résultats suivants montrés sur la figure 2. Mettez les bonnes échelles en fréquences pour les trois graphiques. Confrontez ce résultat à ceux trouvés précédemment. Expliquez pourquoi le troisième cas est différent.
4. Proposez une idée pour atténuer les distorsions dans le 3ème cas ?

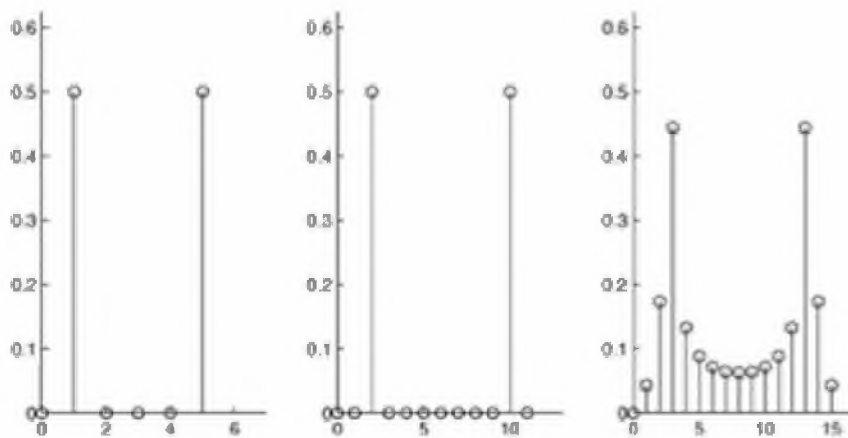


Figure : s0,se,sa

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

1. Louis E. Frenzel Jr., *Principles of Electronic Communication Systems*, Fourth Edition, 2016
2. John G. Proakis and Masoud Salehi. *Communication Systems Engineering*, 2nd Ed, 2008
3. A. Bruce Carlson, *Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication*, Fourth Edition, 2002
4. Adel Bouras, *Transmissions analogiques et numériques des signaux*, Ellipse, 2013
5. Christophe More, *Transmission des signaux : cours et exercices d'électronique*, deuxième édition, 1999
6. François de Dieuleveult, *Composants pour télécoms : amplificateurs, oscillateurs, PLL, filtres théorie et simulation*, Ellipse, 2013.

Résumé :

Ce support de cours, en « Télécommunications Fondamentales », est principalement destiné aux étudiants de deuxième année Licence Télécommunications. Ce cours permet aux étudiants d'aborder les principes de base des différents mécanismes utilisés dans la transmission des signaux d'une source à une destination. A la fin de ce cours, l'étudiant acquerra la maîtrise des différentes techniques de transmission analogiques ainsi que numériques. Ce cours sert de base pour le cours des Communications analogiques de la troisième année licence en Télécommunications. Avant d'entamer les différentes techniques de transmission, on va voir les notions de base liées à la télécommunication ainsi que les différents services offerts par les systèmes de télécommunications. De même, l'étudiant va voir une idée générale sur la classification des signaux et les modes de transmission. Ensuite, l'étudiant va apprendre les différentes techniques de transmissions analogiques et numériques. Au premier, on va voir la nécessité d'utiliser la modulation d'une manière générale puis l'étudiant va entamer les différents types de la modulation analogiques (AM, FM et PM). Enfin, le cours présentera les différentes techniques de la transmission numérique (modulation numérique), où l'étudiant va apprendre les concepts de base de la transmission numérique et les procédures de numérisation d'un signal analogique (échantillonnage, quantification et codage).

Mots-clés : Transmission analogique-Transmission en bande de base-Transmission Numérique-Modulation AM/FM- Modulation numérique.