

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Frères Mentouri Constantine 1

Socle commun

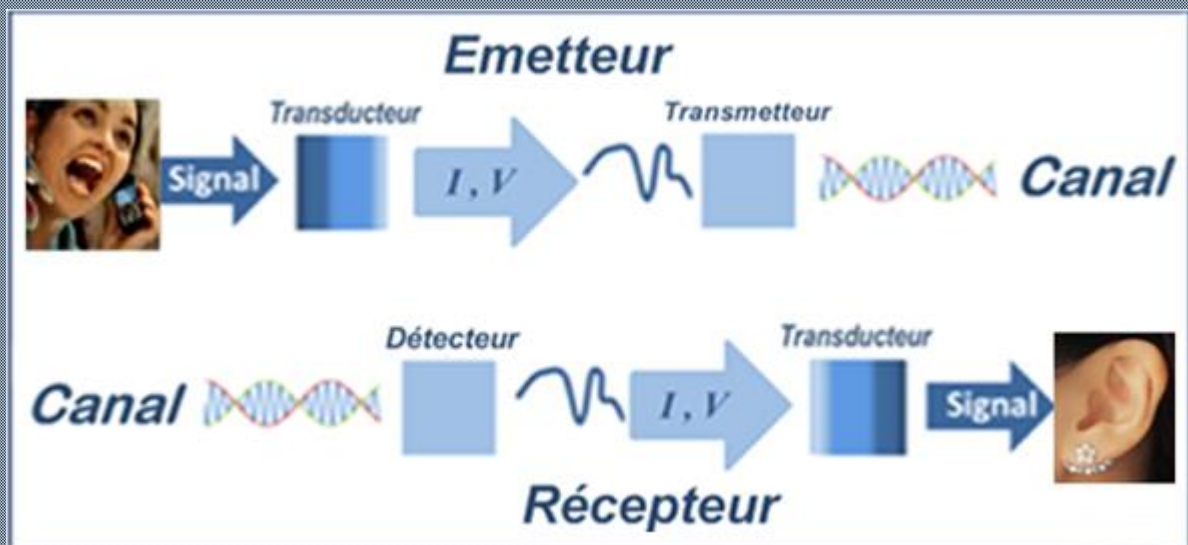
Sciences et Technologies

4<sup>ème</sup> semestre

Filière : Télécommunication

UEF 2.2.1

# TÉLÉCOMMUNICATIONS FONDAMENTALES



Cours et TD

M. T. BENHABILES

# Sommaire

Chapitres	page
<b>1 Généralités sur les télécommunications</b>	<b>3</b>
1.1 Concepts élémentaires : signal, message, information	4
1.2 Historique et évolution des télécommunications	5
1.2.1 Antiquité : Le carré de Polybios	5
1.2.2 Le télégraphe de Chappe	6
1.2.3 Le télégraphe de Morse	7
1.2.4 Graham Bell et l'invention du téléphone	8
1.2.5 La télégraphie sans fil	8
1.2.6 Chronologie des télécommunications au 20 <sup>ème</sup> siècle	10
1.3 Normes et standards de télécommunications	11
<b>2 Systèmes de communication</b>	<b>13</b>
2.1 Schéma de base d'un système de communication	14
2.2 Signaux de source en télécommunications	15
2.2.1 Le signal sonore et le signal vocal	15
2.2.2 Lumière, image et vidéo	16
2.2.3 Texte	17
2.3 Les supports de transmission	17
2.3.1 Propagation libre	17
2.3.2 Propagation guidée	18
2.3.2.a. La ligne bifilaire	18
2.3.2.b. Le câble coaxial	19
2.3.2.c. La fibre optique	20
2.3.2.d. Les guides d'ondes métalliques	21
2.3.2.e. La ligne imprimée	21
<b>3 Techniques de transmission analogique</b>	<b>22</b>
3.1 Classes de signaux	22
3.1.1 Signal continu et signal discret	22
3.1.2 Signal permanent et signal transitoire	23
3.1.3 Signaux périodiques	23
3.1.4 Spectre d'un signal	27
3.1.4 Les distributions	27

3.2	Filtres électriques	29
3.3	Modulation analogique	35
3.3.1	Généralités sur la modulation d'un signal analogique	35
3.3.2	Méthodes de modulation en amplitude AM	37
3.3.2.a.	Modulation DBL à porteuse supprimée	37
3.3.2.b.	Modulation DBL avec porteuse	38
3.3.2.c.	Modulation à bande latérale unique BLU	40
3.3.2.d.	Démodulation	40
3.3.3	Modulation en fréquence FM	43
3.3.3.a.	Représentation temporelle	43
3.3.3.b.	Cas d'un signal modulant sinusoïdal	44
3.3.3.c.	Spectre du signal FM	44
3.3.3.d.	Signaux FM réels	45
3.3.3.e.	Règle de Carson	46
<b>4</b>	<b>Techniques de transmission numérique</b>	<b>48</b>
4.1	Principe de la transmission numérique	49
4.2	Modulation par impulsions codées	50
4.2.1.	Echantillonnage	50
4.2.2.	Quantification	51
4.2.3.	Codage de l'amplitude quantifiée des impulsions	51
4.2.4.	Reconstitution du signal d'origine	51
4.3	Codage dans le canal de transmission	52
	<b>Travaux dirigés – Enoncés</b>	<b>56</b>
	<b>Travaux dirigés – Solutions</b>	<b>64</b>
	<b>Documents de référence</b>	<b>75</b>

# **Chapitre 1**

## **GÉNÉRALITÉS SUR LES TELECOMMUNICATIONS**

### 1.1. Concepts élémentaires : *signal, message, information*

Une définition technique du terme *information* que nous adopterons dans ce module, et qui restera valable dans toute la technologie des télécommunications est la suivante :

**« Une information est un élément de connaissance nouveau annoncé à un destinataire, que ce dernier n'avait pas auparavant »**

المعلومة هي عنصر معرفة جديد أعلن إلى متلق، ولم يكن يدركه من قبل

Claude Shannon a développé une théorie mathématique dans laquelle l'information contenue dans un message est quantifiée.

**« L'aspect le plus important en science des télécommunications est la mesure de la quantité d'information contenue dans un message »**

Dans la théorie de Shannon la quantité d'information est un nombre réel compris entre **0** et **1**. Une information nulle a pour mesure **0** et une information « pleine échelle » a pour mesure **1**. Cette valeur est assez difficile à cerner, et seul le destinataire est habilité à la fixer comme l'a précisé Shannon :

« Le concept d'*information* ne s'applique pas à des messages individuels (comme le concept de *signification*), mais plutôt à une situation dans son ensemble, l'information **1** indique une situation dans laquelle le destinataire a la liberté de choisir parmi plusieurs messages reçus un message qu'il convient de considérer comme *quantité standard* ou égale à **1** »

Voici un exemple simple pour clarifier le concept, et surtout établir un lien qui existe réellement entre l'information au sens des masses media et l'information au sens de la théorie des télécommunications :

- 1- Si je dis à quelqu'un « **la température maintenant est de 8°** », et qu'il ne le savait pas jusque là, il y a communication d'information
- 2- Si je lui répète juste après « **la température maintenant est de 8°** », la quantité d'information est nulle car il savait déjà que la température est de 8°
- 3- Il existe un troisième cas de figure, j'aurais pu annoncer à mon interlocuteur « **la température maintenant est de 47° Fahrenheit** », ici il y a information, mais en moins grande quantité que dans le cas 1. C'est à la charge du destinataire de faire l'effort supplémentaire de convertir 47°F en 8°C pour être réellement informé

Il est important de noter dans cette introduction que dans la théorie de Shannon une nette distinction est établie entre les concepts *message, signal* et *information*. En règle générale dans le domaine des télécommunications, **un message contenant ou non de l'information est transporté par un signal**

## 1.2. Historique et évolution des télécommunications

### 1.2.1. Antiquité : Le carré de Polybios

L'historien grec Polybios (200 –118 av. J.-C.) inventa ce système de codage. Les lettres de l'alphabet (grec à l'origine) sont arrangées dans un tableau. Chaque lettre est codée par deux nombres, le premier indique sa ligne et le deuxième sa colonne

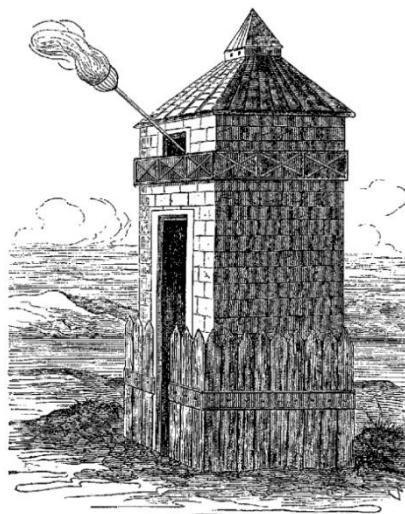
	1	2	3	4	5
1	A	B	C	D	E
2	F	G	H	I	K
3	L	M	N	O	P
4	Q	R	S	T	U
5	V	W	X	Y	Z

Exemple:

Texte : *message secret*

Code : 32154343112215 431513421544

Les Romains ont utilisé ce système pour passer l'information vers un lieu éloigné en construisant les **tours à signaux**, ou tours à feux. Les deux chiffres du code de Polybios sont représentés par deux torches allumées, et brandies autant de fois que le chiffre l'exige. Une longue lunette était nécessaire pour voir les torches de loin.



Le système de Polybios resta au fil des siècles le moyen de communication dominant jusqu'à l'avènement du **télégraphe Chappe**, et il est encore utilisé de nos jours par certains prisonniers dans des cellules séparées pour communiquer. Le prisonnier tape sur un tuyau de robinet ou sur les barreaux de la fenêtre avec un objet dur un nombre de coups représentant le chiffre du code de Polybios.

L'inconvénient du code de Polybios est le nombre de **symboles** (agitations de la torche, ou coups tapés sur le tuyau) trop élevé par rapport au nombre de lettres d'un message : dans l'exemple précédent 74 symboles (**message codé**) sont utilisés pour 13 lettres du **message source**, soit un rapport de **5.7**

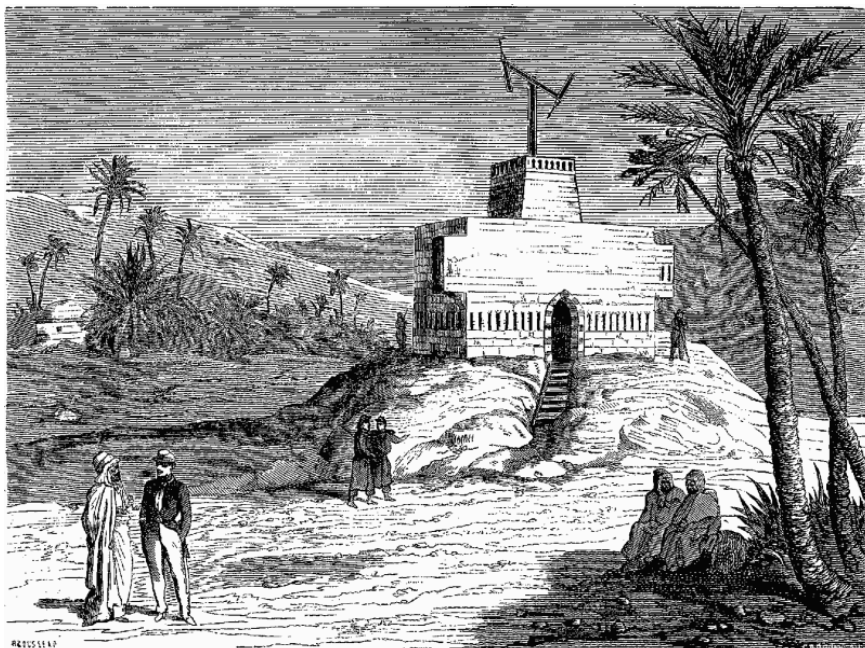
### 1.2.2. Le télégraphe de Chappe

C'est un système, appelé aussi télégraphe **à bras**, ou télégraphe **aérien**, constitué de deux **ailes articulées** et visibles de loin au moyen d'une lunette. Un manipulateur modifie la disposition des ailes, représentant ainsi les lettres de l'alphabet. Le télégraphe Chappe était placé sur une hauteur naturelle, colline, montagne, ou une tour érigée à cet effet.



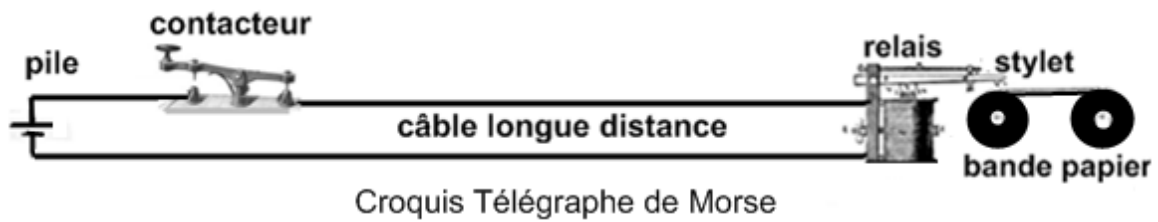
La première expérience du télégraphe aérien des frères Chappe a été réalisée le 3 mars 1791 sur une distance de 14 km dans le département de la Sarthe en France, et aussitôt, 5000 km de réseau et 533 stations étaient mises en place sur le territoire français.

Le télégraphe à bras fut installé à Alger en 1842 pour les besoins de l'administration militaire coloniale qui crée un réseau constitué de deux axes principaux, Alger-Oran et Alger-Constantine avec des ramifications vers Médéa, Mascara et Tlemcen. Achievées complètement en 1853, les lignes Ouest s'étendent sur 850 km de long. La ligne Est vers Constantine, construite à partir de 1848, est achevée en 1853.



### 1.2.3. Le télégraphe de Morse

Samuel Morse envoya le premier message télégraphique le 11 Janvier 1838 dans le New-Jersey à travers un câble de 3 km de long. Le télégraphe électrique de Morse est constitué de la pile inventée par Alessandro Volta en 1800, et d'un contacteur manuel à l'émission. Le récepteur consiste en une bobine-relais couplée mécaniquement à un stylet, de sorte que celui-ci laisse une marque sur une bande de papier quand la bobine est alimentée.



Morse a conçu un code dans lequel les lettres de l'alphabet sont représentées par une combinaison de points et de tirets, correspondant à la durée pendant laquelle le contacteur est maintenu fermé, 1 et 3 secondes pour le point et le tiret respectivement.

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

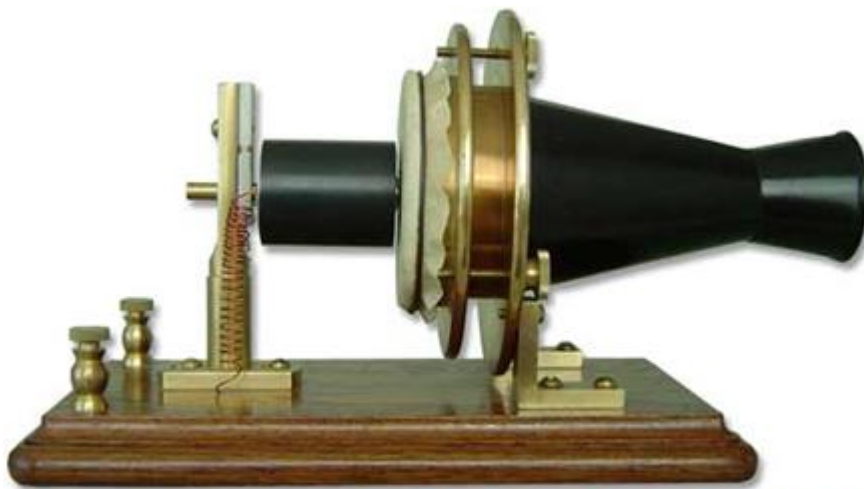
Il y a beaucoup d'intelligence dans ce code. Ainsi, plus une lettre est fréquente dans un texte anglais, plus son code est court (**E** et **T**), ce qui permet de réduire la longueur moyenne des messages. Mais aussi il a été constaté que le code Morse se mémorise très facilement : un opérateur d'intelligence moyenne l'apprend par cœur et sans effort au bout de trois jours d'utilisation. Cet aspect qui était éventuellement intentionnel dans la conception du code, permet à l'opérateur de se passer rapidement de la table de conversion, et même de retranscrire un message en écoutant le bruit que fait le stylet au contact du papier.

En Algérie, les premières lignes du télégraphe électrique furent installées en 1854, d'Oran à Mostaganem (76 kilomètres), d'Alger à Médéa (90 kilomètres), et de Constantine à Philippeville (Skikda) (83 kilomètres). En 1900 tous les bureaux de poste étaient pourvus du télégraphe. Six câbles télégraphiques sous-marins reliant la France et l'Algérie furent posés par l'administration française entre 1870 et 1913.

#### 1.2.4. Alexander Graham Bell et l'invention du téléphone

**Mister Watson, come here I want you**

Ce sont les premières paroles intelligibles transmises sur un système téléphonique le 7 Mars 1876, par Alexander Graham Bell appelant son assistant dans la pièce voisine pour lui annoncer qu'il a reçu le brevet US174465, qui lui accorde la propriété sur les deux instruments, le téléphone et le système téléphonique. En Octobre, il teste son téléphone sur une distance de deux miles entre Boston et Cambridgeport. En 1877, il fonde avec deux investisseurs la Bell Telephone Company, et les premières applications commerciales de la téléphonie ont lieu. Cette compagnie, cédée à AT&T en 1899, est aujourd'hui la plus grande firme de télécommunications dans le monde.



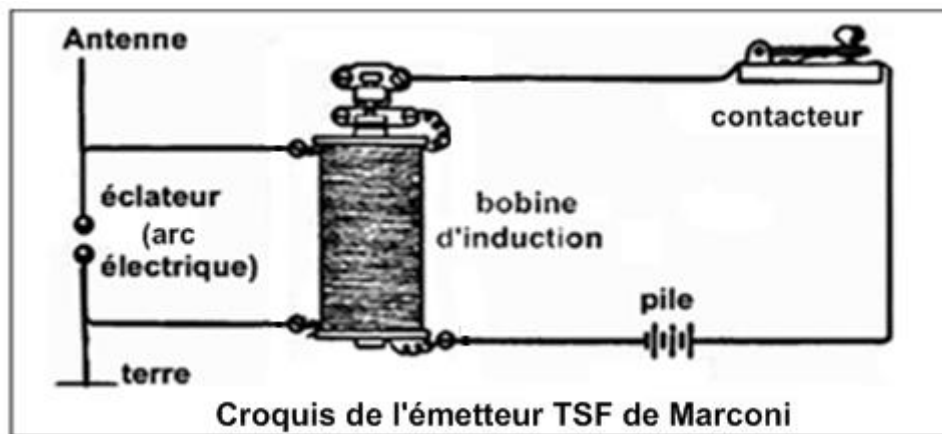
Le premier modèle commercialisé, baptisé The Centennial, car il a été présenté à l'Exposition du Centenaire à Philadelphie, le 25 Juin 1876

En Algérie, le service téléphonique fut d'abord concédé à une compagnie privée en 1882, la Société Générale des Téléphones, qui installa et exploita pendant sept ans les réseaux urbains d'Oran et d'Alger; en 1889, il fut pris en charge par l'administration des P.T.T. Depuis, les progrès de l'exploitation ont suivi une marche constamment ascendante, la longueur des lignes a passé de 469 kilomètres en 1900 à 94400 kilomètres en 1928.

#### 1.2.5. En 1897 Guglielmo Marconi invente la TSF télégraphie sans fil

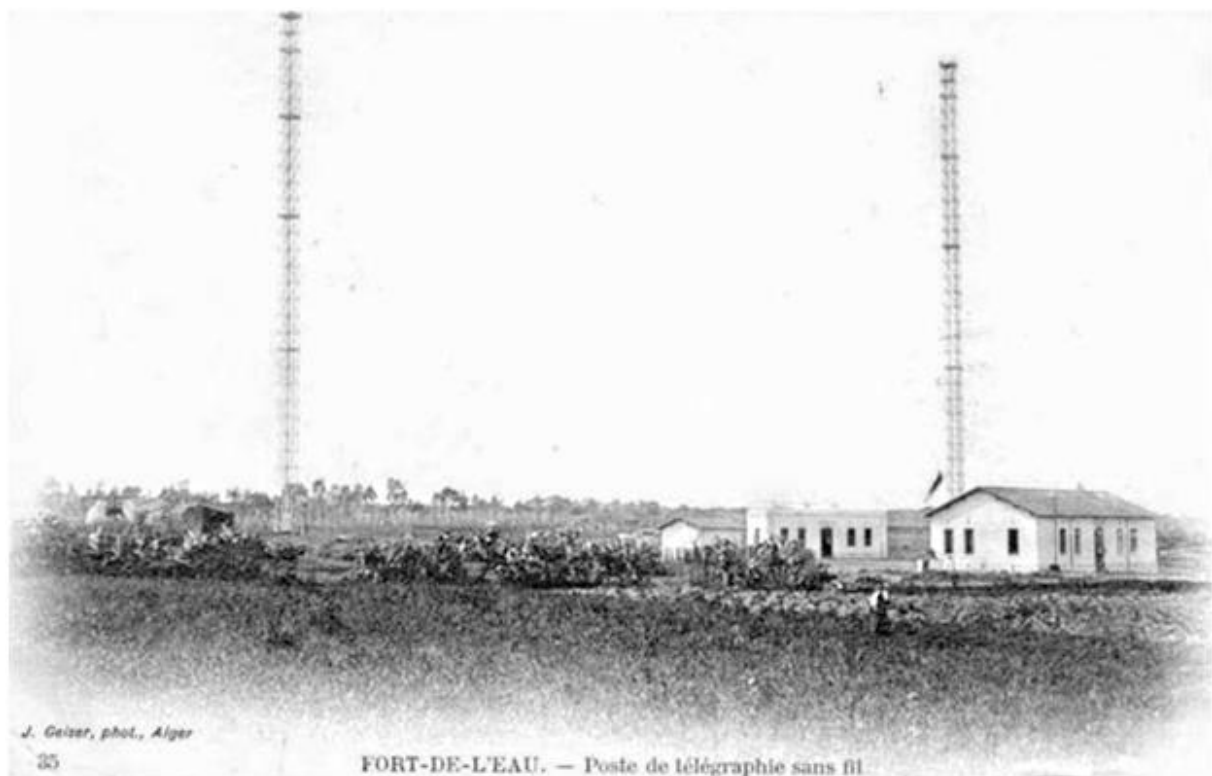
Marconi met en application l'expérience sur l'émission et la réception des ondes électromagnétiques de Heinrich Rudolf Hertz, 1887, qui lui-même tenait à avoir une évidence de la théorie de James Clerc Maxwell, encore désignée à cette époque par « Doctrine de Maxwell ».

Marconi installe en 1897 le télégraphe sans fil à South Wellfleet, Massachusetts. Cette installation est parmi celles qui avaient intercepté le SOS lancé lors du naufrage du paquebot Titanic le 15 Avril 1912, qui a permis le sauvetage de plusieurs vies humaines.



Le TSF de Marconi a continué à communiquer au moyen du code Morse, mais la restitution des signaux était sonore pour la plupart, la technologie des parleurs et sonneries électrodynamiques ayant atteint un niveau de maturité à partir de 1900.

L'Algérie a vu sa première station TSF installée en 1907 dans un domaine militaire à Fort-de-l'eau (Bordj el Kiffan). Avec une puissance de 1kW par antenne, elle permet des communications avec des navires jusqu'à 500 km d'Alger. Cette distance fut portée à 3000 km avec une puissance de 12 kW par antenne. Elle fut rapidement utilisée comme station de radiodiffusion dont la mission avouée était de propager les idées coloniales de la France auprès des populations algériennes.



### 1.2.6. Chronologie des télécommunications au 20<sup>ème</sup> siècle

- **1906**, Reginald Aubrey Fessenden expérimente l'émission et la détection d'une onde radio en **Modulation d'Amplitude**
- **1924, Fax**, AT&T transmet des images photographiques sur le circuit téléphonique entre Cleveland et Manhattan
- **1933, Telex**, premier réseau de télécriteurs (teletype) en Allemagne
- **1939, Télédiffusion.** RCA diffuse par télévision noir et blanc l'ouverture de l'Exposition universelle de New York, le 30 Avril, avec un discours du président Roosevelt
- **1960, la téléphonie numérique** commence à remplacer le réseau analogique.
- **1962, le satellite de télécommunications** expérimental Telstar 1 est lancé le 10 Juillet. Intelsat I, premier de la série commerciale, est placé en orbite géostationnaire le 6 Avril, **1965**.
- **1969, Réseaux téléinformatiques** à commutation par paquets. L'Interface Message Processor IMP a été le premier routeur réalisé pour interconnecter les réseaux ARPANET. IMP fait l'objet de RFC 1
- **1970, les émissions TV couleur** dépassent en nombre les émissions noir et blanc.
- **1974, Ethernet** est développé par Xerox Palo Alto Research Center, et lance les réseaux locaux
- **1977, Fibre Optique.** Le premier trafic téléphonique direct par fibre optique est réalisé le 22 Avril par General Telephone and Electronics à Long Beach, Californie, avec un débit 6Mbit/s. La fibre optique est introduite en Algérie en **1987**.
- **1984, Cisco Systems** est fondée par Leonard Bosack et Sandy Lerner, respectivement responsable des ordinateurs au département informatique, et directrice de l'école d'informatique commerciale, à l'Université de Stanford.
- **1990, ADSL** est breveté par Bellcore. Il est introduit dans L'ensemble du territoire en Algérie en **2008**
- **1995, Téléphonie mobile.** le premier réseau GSM 1900 MHz est devenu opérationnel aux Etats-Unis.
- **2003, wifi** les réseaux locaux sans fil

### 1.3. Normes et standards en télécommunications

Les termes **norme** ou **standard** désignent dans tous les secteurs de la technologie des prescriptions techniques et des spécifications relatives à la construction et au fonctionnement d'un équipement, ou d'un système dans son ensemble.

Ces prescriptions sont établies à des fins d'homogénéisation et de performance par des organismes d'experts, qui les éditent en des documents officiels après de minutieuses études, de longues concertations, et des tests rigoureux sur terrain.

Les organismes de normalisation activent à l'échelle internationale, et leur autorité est reconnue de façon universelle. Tout équipement produit pour usage public ou commercial doit être conforme à la norme en vigueur.

Dans le domaine des télécommunications très particulièrement, la normalisation consiste certes en les prescriptions techniques pour appareils, mais souvent elle consiste aussi en des protocoles et des procédures de communication.

Il convient de présenter les organismes de normalisation les plus en vue actuellement :



**IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers**, organisme international de professionnels très influent, qui en plus de ses activités courantes dans toutes les spécialités de l'électricité, édite régulièrement des standards en télécommunications, comme le standard de réseaux internet sans fil Wifi **IEEE 802.11**



**UIT Union Internationale des Télécommunications** (ITU en anglais), basée à Genève en Suisse. Elle comporte notamment la section **UIT-T** (T pour technique) qui coordonne les normes des télécommunications auprès des 193 pays membres. Avant 1992, UIT s'appelait CCITT, Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique.



**IETF Internet Engineering Task Force**, basé à Information Sciences Institute ISI, de l'University of Southern California où il fut fondé en 1986, cet organisme informel de bénévoles est l'autorité mondiale des standards et des protocoles qui régissent le fonctionnement de tout l'internet. Ces standards sont édités dans des documents techniques appelés **RFC Request For Comment**



**ISO International Organisation for Standardization**, organisation internationale indépendante dont les 163 membres sont des organismes nationaux de normalisation. ISO couvre tous les domaines de l'ingénierie, mais vue son importance elle doit être mentionnée dans le contexte exclusif des télécommunications.

## Samuel Finley Morse (1791-1872)



ولد مورس في تشارلستاون بولاية ماساتشوستس، ودرس في أكاديمية فيليبس في أندوفر بولاية ماساتشوستس، ثم التحق بكلية بيل ليدرس الفلسفة الدينية والرياضيات، حيث تخرج سنة 1810، وكان مورس يمارس الرسم لتدبير نفقات دراسته.

في سنة 1825 كلف برسم صورة زيتية في واشنطن مقابل \$509، وأثناء قيمه بالرسم أتمته رسالة من أبيه نصها "زوجتك العزيزة في فترة نقاهة"، فغادر واشنطن فوراً دون أن يكمل اللوحة متوجهاً إلى نيو هافن ليجد أن زوجته قد ماتت ودفنت. تحت تأثير صدمة بعد أن ظل لا يعلم شيئاً عن مرض زوجته ثم وفاتها بعيداً عنه، ترك مورس الرسم وأخذ يبحث عن طريقة سريعة للتواصل عبر المسافات الطويلة. أثناء رحلة بحرية قام بها سنة 1832، التقى شخصاً من بوسطن يدعى تشارلز جاكسون، كان قد درس الكهرومغناطيسية، فشاهد العديد من تجاربه. وعقب ذلك طور مورس التلغراف ذي السلك الواحد.

في سنة 1838 فشل في الحصول على دعم الحكومة المركزية في واشنطن لإنجاز خط تلغرافي، فسافر إلى أوروبا باحثاً عن رعاة وعن براءات لاختراعه أيضاً. اكتشف في لندن أن كلاً من وليام كوك وتشارلز ويتسون سبقاه إلى تنفيذ الفكرة في بريطانيا.

في ديسمبر 1842 ذهب مرة أخرى إلى واشنطن محاولاً إقناع الحكومة الفيدرالية، فقام بتوصيل أسلاك بين غرفتين في الكابيتول وأخذ يرسل بينهما بالتبادل ليوضح لرجال السياسة طبيعة اختراعه. فخصص الكونجرس \$30000 سنة 1843 لإنشاء خط تجريبي طوله 38 ميلاً بين واشنطن وبالتيمور. في 24 مايو 1844 جرى حفل افتتاح الخط و أرسل فيه مورس عبارته الشهيرة "What hath God wrought"

في 1845 أنشئت شركة ماغنيتيك تلغراف لتوصيل خطوط التلغراف من نيويورك إلى فيلادلفيا وبوسطن وبفالو ومنطقة المسيسيبي.

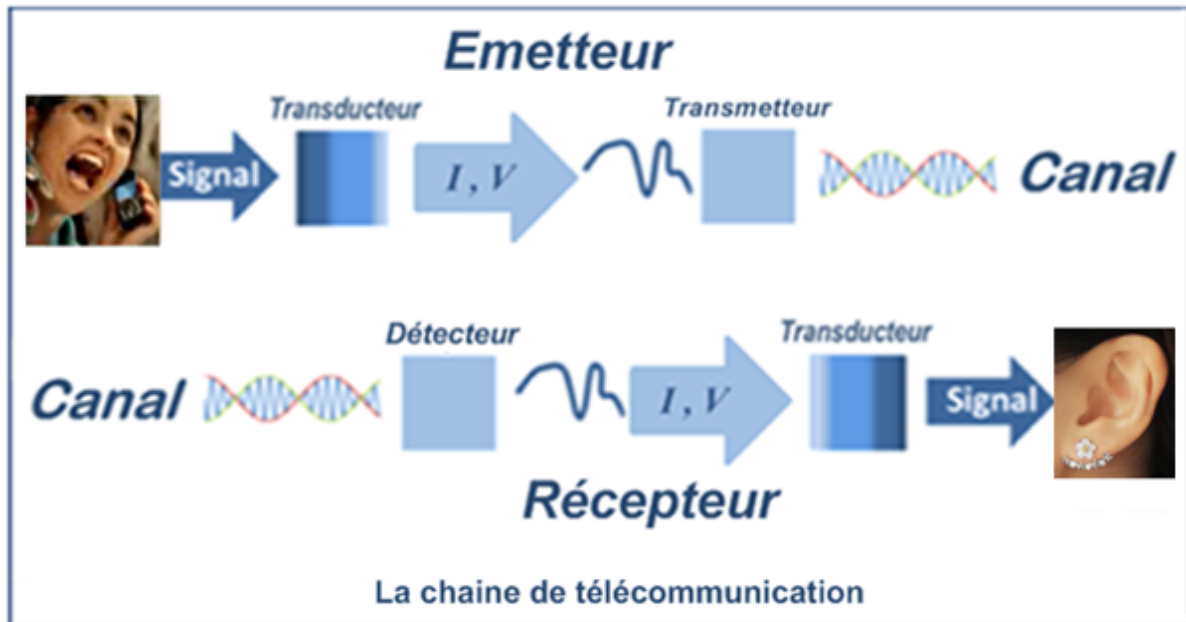
حصل مورس على براءة لاختراع التلغراف سنة 1847 بقصر البيلربي القديم في إسطنبول من أيادي السلطان العثماني عبد المجيد الأول، الذي قام بتجربة الاختراع الجديد بنفسه.

## **Chapitre 2**

# **SYSTÈMES DE COMMUNICATION**

## 2.1. Schéma de base d'un système de communication

Le schéma synoptique général d'une chaîne de télécommunication est constitué d'un **émetteur**, un **canal de transmission**, et un **récepteur**



L'**émetteur** prend un signal de source, qui est une grandeur physique (son, image, etc..) représentée par une fonction du temps  $s(t)$ , et il le transforme au moyen d'un **transducteur**, généralement en signal électrique, de sorte qu'il puisse être transporté sur une grande distance à travers un **canal de transmission**. L'information à transmettre réside dans la forme de la fonction  $s(t)$  qui décrit le signal de source.

Le **canal de transmission** est une abstraction du support ou milieu de transmission (rayonnement en espace libre qu'on appelle onde Hertzienne, ligne de transmission, fibre optique, etc...)

Tout signal subit des perturbations au cours de son transit dans le canal de transmission : **atténuation, ajout de signaux parasites ou bruit, distorsions**, etc... de sorte que le signal qui parvient au niveau du **récepteur** n'est jamais exactement le même que celui qui a été transmis par l'émetteur. De plus, le signal transmis arrive au récepteur après un **délai de transmission**. Ces deux règles sont un fondement de la science des télécommunications.

La fonction du **récepteur** est d'abord de reconstituer le signal transmis avec le maximum de fidélité, ensuite d'analyser sa forme pour en extraire l'information contenue à la source.

## 2.2. Les signaux de source en télécommunications

Le signal source est la forme sous laquelle se présente la toute première apparition de l'information émise dans la chaîne de télécommunication. La nature physique du signal source est non électrique, les principaux types de signaux source sont le son, l'image, et le texte.

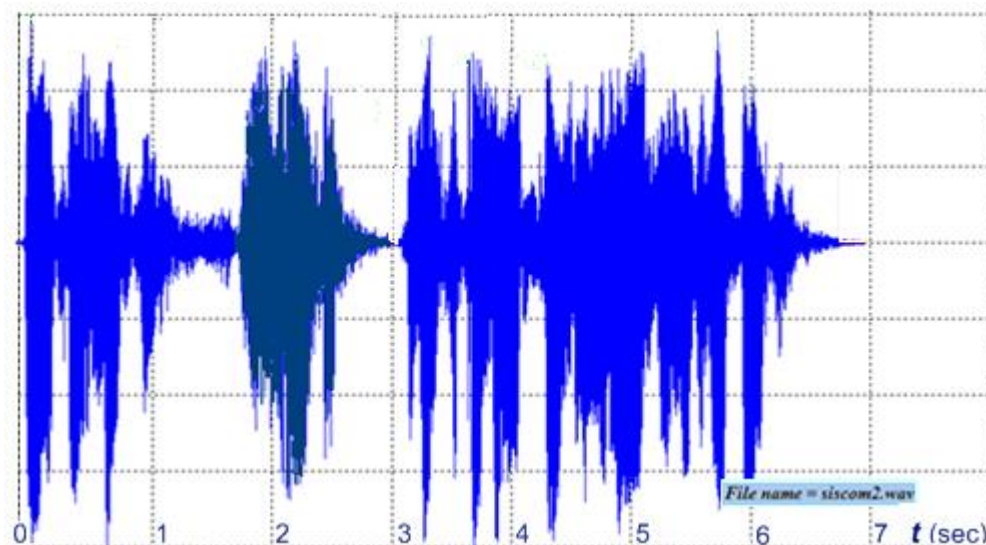
### 2.2.1. Le signal sonore et le signal vocal

Le son consiste en une **onde de pression** se propageant dans l'air, qui est désignée en physique par **onde acoustique**.

- La fréquence des vibrations acoustiques varie de 20 Hz (son grave) à 20.000 Hz (son aigu).
- La vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'air est en moyenne de 330 m/s.
- L'**intensité acoustique** est la puissance transportée par unité de surface du front d'onde.

Le signal vocal ou la parole humaine sont des spécificités du signal sonore. Il est statistiquement établi que la plage des fréquences du signal vocal allant de 100 Hz à 4000 Hz suffit amplement pour identifier une personne. C'est la bande de fréquence juridiquement requise pour les réseaux de télécommunication publics.

La figure suivante montre un spécimen de la variation temporelle du signal de la parole



Les étudiants **Boulkour Chaabane** et **Guidoum Nouh**, Master 2 Systèmes de Télécommunications, récitent un vers du poète **Ahmad Matar**

ما تُهمتي؟ العُروبة      أسألكم عن تهمتي ليس عن العقوبة

### 2.2.2. Lumière, image, et vidéo

La lumière est une grandeur qui obéit selon le besoin à deux modèles physiques, corpusculaire (photons) et ondulatoire (onde électromagnétique).

On s'intéresse plus dans les télécommunications au modèle ondulatoire, la lumière est une onde électromagnétique qui se propage à la vitesse  $3 \cdot 10^8$  m/s dans le vide, et comme toute onde possède une puissance, l'**intensité lumineuse**, et une bande de fréquence  $f$  allant de  $4 \cdot 10^{14}$  Hz à  $8 \cdot 10^{14}$  Hz pour la lumière visible, soit une longueur d'onde  $\lambda$  allant de 740 nm (Infrarouge) à 380 nm (Ultraviolet)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide

En électronique, une image fixe est transformée par un capteur (caméra) en un tableau de points lumineux (pixels) qui sont des valeurs représentant l'intensité lumineuse et la couleur de chaque point de l'image.

Toute couleur dans la nature peut être décomposée et représentée sous la forme des trois couleurs fondamentales Rouge Vert Bleu (**RGB Red Green Blue**)

Le signal vidéo, est une suite d'images (trames ou image animée) auxquelles est fusionné un son.



Cette image numérique noir et blanc (pixels à valeur 1 et 0) est le **Code QR** représentant les noms de ses auteurs **Aouchette Meriem** et **Kara Ali Hadjer**, étudiantes en Master 2

Systèmes de Télécommunications

Un **code QR** (Quick Response) est une étiquette optique lisible par machine, qui contient une information incorruptible concernant l'article sur lequel elle figure

### 2.2.3 Texte

Un texte est un ensemble de caractères d'un alphabet. Il peut représenter un signal de source aussi bien sous forme de l'information visuelle extraite d'une image (fax, photocopie), ou par une représentation numérique de chaque caractère selon un codage, qui est ensuite ramené à un signal digital, c'est-à-dire une séquence de **1** et de **0**, qu'on désigne par unités binaires ou bits. Plusieurs bits sont nécessaires pour désigner un caractère. Historiquement, après le code Morse, il y a eu le code Baudot à 5 bits qui a été adopté pour le télex, ensuite il y a eu le code ASCII à 8 bits pour les ordinateurs, et actuellement l'unicode à 16 bits.

## 2.3. Les supports de transmission

La partie de la chaîne de télécommunication que nous avons désignée de façon générale par **canal de transmission** représente le milieu physique dans lequel le signal émis se propage et arrive au récepteur.

La nature physique de ce signal est une **onde électromagnétique** avec des fréquences allant de 3 kHz jusqu'à 300 GHz, ou **optique** avec des fréquences de l'ordre de  $10^{14}$  Hz.

En électromagnétisme aussi bien qu'en optique, il y a deux façons selon lesquelles le signal se propage : la propagation libre et la propagation guidée

### 2.3.1. Propagation libre :

L'onde électromagnétique est rayonnée par une antenne aérienne au niveau de l'émetteur, elle se propage en ligne droite dans l'espace, et elle est détectée par une antenne au niveau du récepteur.

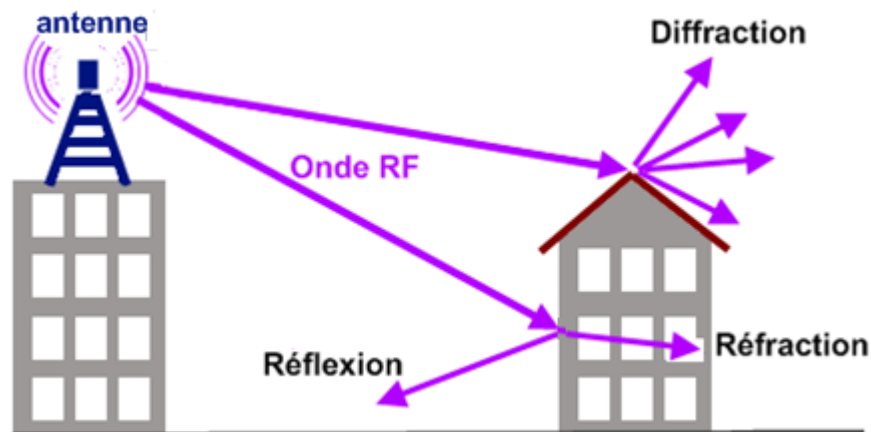
Cette onde est très souvent désignée par **onde hertzienne** ou **onde radio**. Des systèmes de télécommunications par ondes hertziennes existent pour toutes les fréquences, de 3 kHz jusqu'à 300 GHz, qu'on désigne par **Radio-Fréquences RF**.

En espace libre, l'onde hertzienne se propage à la vitesse de la lumière  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s. Cette propagation est généralement assimilée à une propagation dans le vide.

L'intensité de l'onde hertzienne varie en  $1/r$ ,  $r$  étant la distance parcourue par l'onde ou de façon équivalente la distance qui sépare la source d'émission et le point de détection de l'onde en visibilité directe.

Ceci signifie en pratique que l'onde hertzienne en propagation libre subit une atténuation due uniquement à la distance parcourue, et proportionnelle à celle-ci, en l'absence de tout obstacle ou matériau traversé.

Cette onde interagit avec les obstacles et les matériaux qu'elle traverse selon les lois de l'optique géométrique. Comme un rayon lumineux, elle peut subir une **réflexion**, une **réfraction**, ou une **diffraction**.



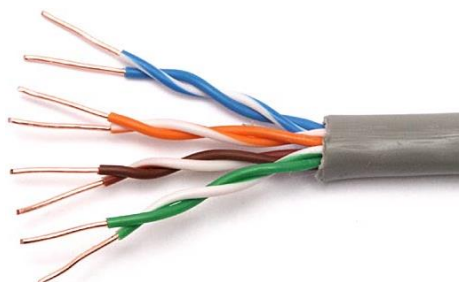
Les ondes optiques en propagation libre sont aussi utilisées en télécommunication, mais uniquement dans la bande infrarouge.

### 2.3.2. Propagation guidée :

L'émetteur est matériellement connecté à un support, tel qu'un câble, qui va transporter l'onde émise jusqu'au récepteur. Les supports de transmission les plus utilisés sont la **ligne bifilaire**, le **câble coaxial**, et la **fibres optiques**.

#### 2.3.2.a. La ligne bifilaire :

Une ligne bifilaire se compose de deux fils de cuivre isolés disposés en torsade. Le matériau isolant est généralement du polyéthylène. Une paire de fils réalise une liaison de communication. En pratique, plusieurs paires sont regroupées ensemble et enveloppées dans une gaine de protection, pour former un **câble de télécommunications**.



La ligne bifilaire convient pour les fréquences les plus basses. Mais au dessus de 30kHz, d'une part la ligne bifilaire se comporte comme une antenne : l'onde n'est plus entièrement guidée car une partie est perdue par radiation vers l'extérieur de la ligne. Le but de la torsade est de confiner cette radiation parasite entre les deux fils. D'autre part ce type de ligne possède une capacité parallèle équivalente non négligeable proportionnelle à sa longueur, qui réduit la ligne à un court-circuit aux très hautes fréquences.

Toute ligne de transmission composée de deux conducteurs possède une capacité parallèle équivalente par unité de longueur  $C$  [exprimée en F/m], qui est égale au rapport entre la charge électrique sur les conducteurs et la tension entre eux. Elle possède aussi une inductance série équivalente par unité de longueur  $L$  [exprimée en H/m], qui est définie par le rapport entre le flux magnétique passant entre les fils et le courant dans les fils.

Une telle ligne est caractérisée par une **impédance caractéristique**, notée  $Z_c$ , qui est égale à la racine carrée du rapport entre ces deux éléments constitutifs.

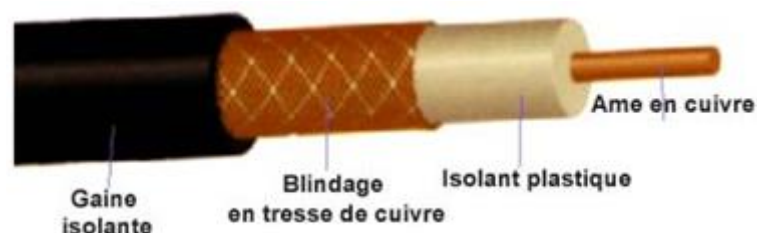
$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

L'intérêt pratique de ce paramètre est que si la ligne est connectée à une charge d'impédance égale à  $Z_c$ , la totalité de la puissance du signal est transmise à la charge, on dit que l'impédance de la charge est **adaptée**. Dans le cas contraire, une partie de la puissance du signal est retournée vers la ligne, on dit qu'elle est réfléchie par la charge.

L'usage le plus commun de la paire torsadée en télécommunications est la liaison téléphonique d'abonné, dont l'impédance caractéristique typique est 600  $\Omega$ .

### 2.3.2.b. Le câble coaxial :

Le câble coaxial est constitué d'une tresse cylindrique externe en cuivre qui représente la masse du signal et agit comme un écran à l'onde guidée, un fil de cuivre appelé âme, situé sur l'axe du câble, transporte le signal. L'isolant qui les sépare est constitué d'une matière (le polyéthylène) conçue pour minimiser l'atténuation de l'onde guidée.



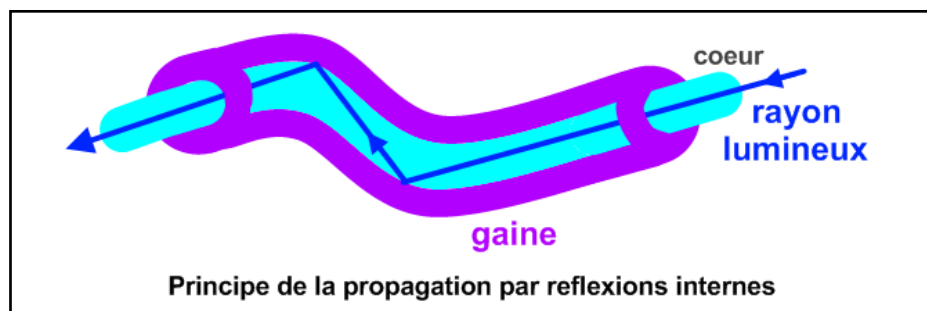
- Les fuites par radiations sont énormément réduites.
- Le câble coaxial est utilisé pour des fréquences allant jusqu'à 1 GHz.
- Il existe deux standards d'impédance caractéristique : 50Ω et 75Ω.

Le câble coaxial est énormément utilisé en télécommunication. Vous avez sûrement reconnu que c'est un câble coaxial qui relie votre antenne parabolique à votre démo TV.

### 2.3.2.c. La fibre optique :

Une fibre optique est constituée d'un matériau isolant flexible, la silice  $\text{SiO}_2$ , de forme cylindrique. Sa section transversale est divisée en une partie centrale appelée **cœur**, qui est entouré d'une **gaine** d'indice de réfraction légèrement plus élevé, le tout est protégé par une couche plastique extérieure. Le diamètre extérieur de la fibre est inférieur au millimètre.

Un rayon de lumière introduit dans le cœur est réfléchi de façon successive à la surface intérieure de la gaine par réflexion totale interne, la lumière est guidée le long de la fibre et permet de transmettre l'information.



En pratique, plusieurs fibres optiques sont rassemblées dans un câble à l'intérieur d'une gaine blindée pour la protection mécanique.



### 2.3.2.d. Le guide d'onde métallique :

Ce support est utilisé en télécommunications aux hyperfréquences (3GHz à 300GHz) pour la transmission sur courte distance de signaux à très haute puissance, par exemple comme tronçon final de connexion d'une antenne radar. Il est constitué d'un seul conducteur dont la section transversale est creuse, de forme rectangulaire ou circulaire.

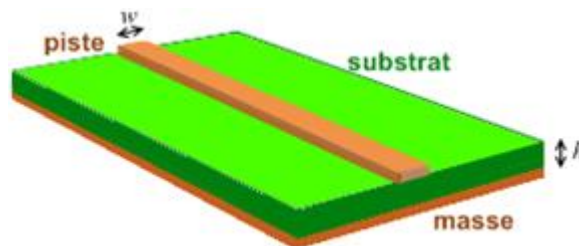
Le laiton, qui est un alliage Cu-Zn, est le métal conducteur le plus utilisé.



Une onde électromagnétique est guidée le long du vide intérieur de la structure.

### 2.3.2.e. La ligne imprimée :

C'est un support de transmission miniature utilisé en hyperfréquence au sein d'un même dispositif où sont intégrés l'émetteur et le récepteur que cette ligne relie. La ligne imprimée est constituée de deux conducteurs plans séparés par une couche isolante appelée **substrat diélectrique** sur laquelle ils sont déposés. Il existe diverses configurations géométriques de conducteurs, mais la ligne micro-ruban est la plus représentative.



Une couche de cuivre recouvre entièrement une face du substrat et forme la masse du signal. Une piste en cuivre sur la face opposée (le micro-ruban), guide le signal électrique.

L'impédance caractéristique de la ligne micro-ruban dépend de la permittivité du substrat et du rapport largeur  $w$  du ruban sur épaisseur  $h$  du substrat. Dans le cas où le substrat est de l'Epoxy,  $w/h = 2$  donne une impédance caractéristique de  $50\Omega$

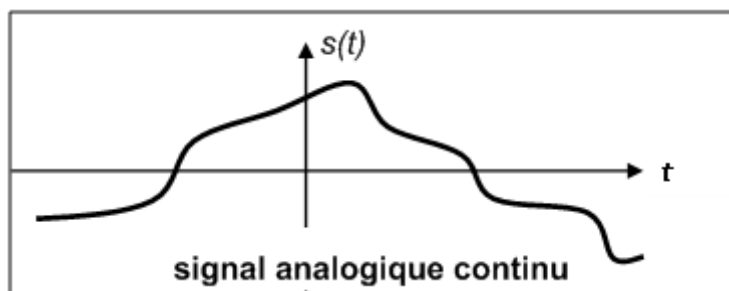
# **Chapitre 3**

## **TECHNIQUES DE TRANSMISSION ANALOGIQUE**

### 3.1. Classes de signaux

La notion de signal n'est pas nouvelle dans ce module. Nous avons déjà vu que différents signaux de différentes formes, et de différentes natures physiques, sont présents en plusieurs endroits de la chaîne de communication.

Ce paragraphe est spécialement consacré aux **signaux analogiques**, qui peuvent être définis sans ambiguïté par une tension électrique dont la valeur représente une grandeur physique mesurable et variable dans le temps. Le signal analogique, noté  $s(t)$ , en règle générale peut ne pas être formulé par une expression mathématique, mais il peut toujours être représenté par un graphique, comme celui de la figure suivante

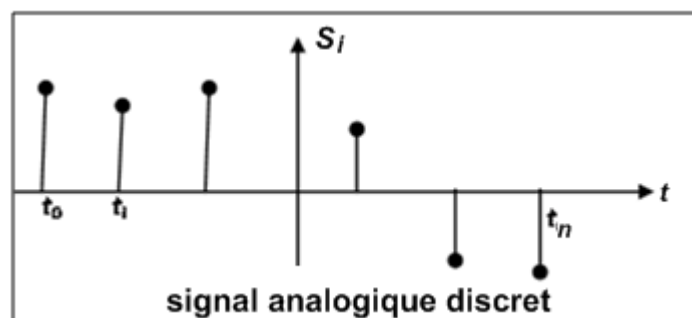


Une classification des signaux est communément adoptée dans les télécommunications.

#### 3.1.1. Signal continu et signal discret

Un signal à variation **continue** est une fonction continue de la variable temporelle  $t$ , définie dans un intervalle continu, par exemple entre  $t = -1$  et  $t = +1$ . Le signal représenté sur la figure ci-dessus en est un exemple.

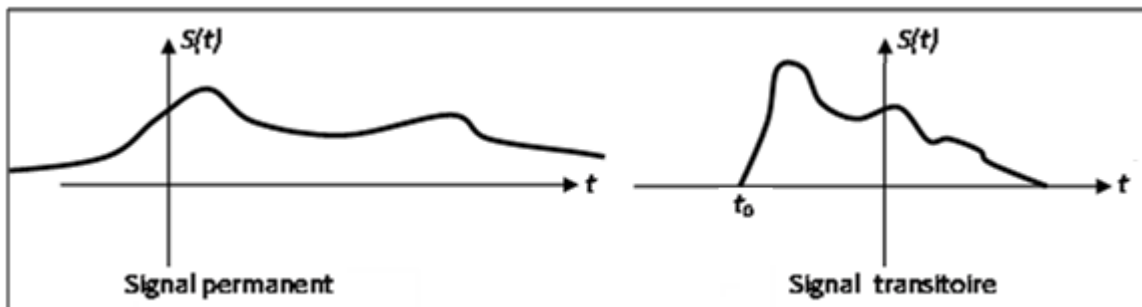
Un signal à variation temporelle **discrète** est défini uniquement en un ensemble fini d'instants  $t_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, k$  sur un intervalle donné. Le signal n'existe pas sur le reste de l'axe du temps. En général, la valeur du signal en l'instant  $t = t_i$  est notée  $s_i$ , cette notation spécifie la nature discrète du signal.



### 3.1.2. Signal permanent et signal transitoire

Un signal (continu ou discret) est en théorie **permanent** s'il est défini pour  $t$  variant de moins l'infini à plus l'infini. En pratique est considéré comme signal permanent un signal dont la borne inférieure de l'intervalle de définition est un instant précis  $t = t_0$  appelé **instant initial**, et dont la borne supérieure tend vers plus l'infini.

Un signal **transitoire** est un signal continu ou discret dont l'instant initial est  $t_0$  et la borne supérieure de son domaine de définition est un instant fini. En pratique le signal est négligeable ou tend vers zéro au delà de cette borne supérieure



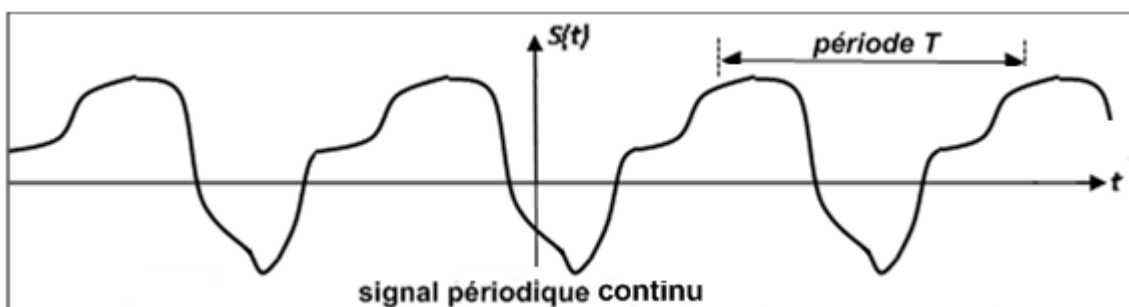
### 3.1.3. Signaux périodiques

Un signal périodique est un signal permanent  $s(t)$  qui satisfait la condition

$$s(t) = s(t+T) \quad (3)$$

pour toute valeur de  $t$

$T$  est une constante réelle positive, appelée **période** du signal



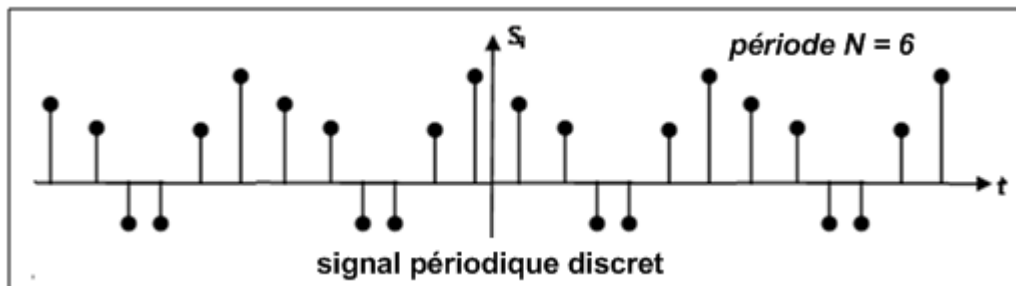
La période définit la durée d'un cycle complet du signal, elle représente le temps que met le signal pour revenir à une même valeur, d'où parfois l'appellation **signal cyclique** pour un signal périodique. Si on suit l'axe du temps, on voit que le signal sur n'importe quel intervalle de durée  $T$  se répète indéfiniment

Pour un signal discret, la condition de périodicité est

$$S_i = S_{i+N} \quad (4)$$

où  $N$  est un entier positif

Un exemple de signal périodique discret, est donné sur la figure suivante



L'inverse de la période est appelé la **fréquence** du signal, notée  $f$

Elle décrit le nombre de fois que le signal se reproduit par seconde.

$$f = 1/T \quad (5)$$

La fréquence se mesure en Hertz (Hz) ou en cycles par seconde (cps).

La **fréquence angulaire** ou **pulsation**, mesurée en radians par seconde (rd/s), est définie par

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T \quad (6)$$

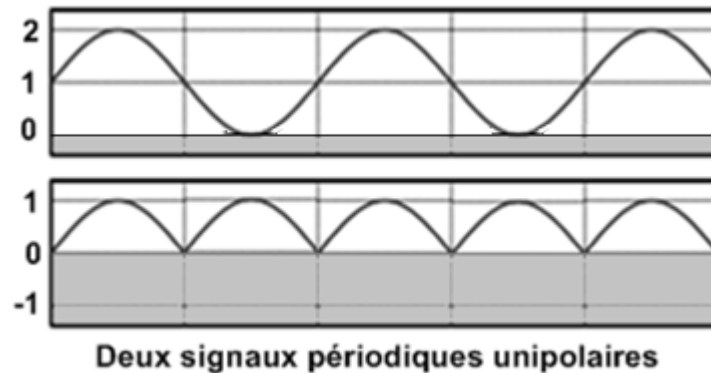
Pour un signal discret la fréquence est égale à  $1/N$  et la pulsation est  $2\pi/N$

L'**amplitude**, est la plus grande valeur absolue atteinte par le signal, elle est parfois désignée par valeur de **crête** ou **pic** du signal, il s'agit de l'écart entre l'axe du temps et la valeur du point le plus haut ou le plus bas atteint par le signal  $s(t)$ .

La **phase** est l'écart séparant l'axe des ordonnées avec l'origine du premier cycle du signal. Elle a les dimensions d'un angle et s'exprime par conséquent en degrés ou en radians.

Deux signaux périodiques identiques sont dits en **quadrature de phase** s'ils sont décalés de  $90^\circ$ , un quart de période. S'ils sont décalés de  $180^\circ$ , une demi-période, ils sont en **opposition de phase**.

Pour finir, les signaux ayant des parties positives et des parties négatives sont qualifiés de **bipolaires**, tandis qu'un signal uniquement positif (ou uniquement négatif) est **unipolaire**.



Les graphes ci-dessus montrent deux exemples de signaux périodiques unipolaires.

En haut, c'est un signal sinusoïdal classique mais ses valeurs se situent entre 0 et 2, c'est-à-dire la valeur +1 a été ajoutée à la fonction  $\sin(\omega t)$ , on dit que la sinusoïde est *surélevée*.

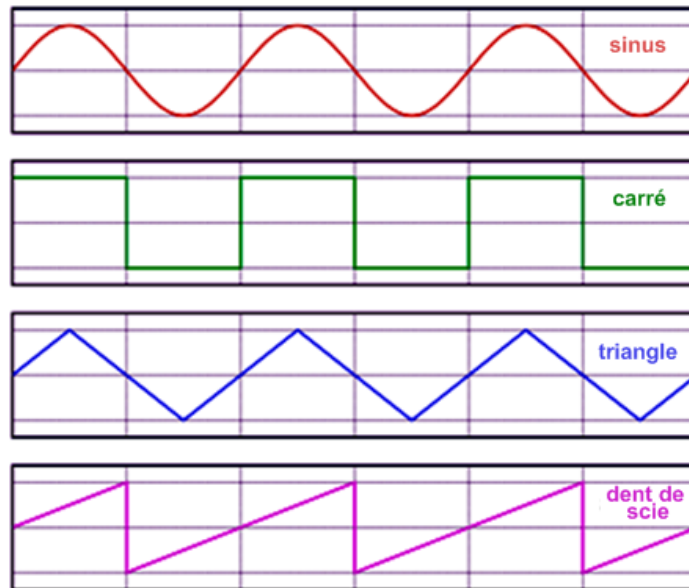
En bas, c'est un signal sinusoïdal dont les parties à valeurs négatives ont été inversées en valeurs positives, on dit que la sinusoïde est *redressée*.

### Signaux périodiques élémentaires

- **Signal sinusoïdal** : L'expression générale de la sinusoïde est

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (7)$$

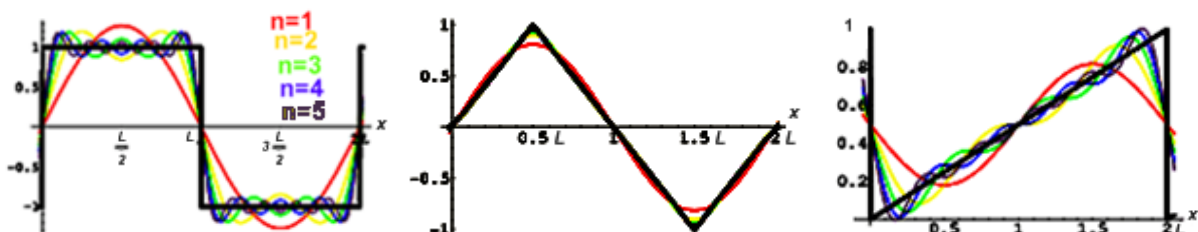
- **Signal carré** : Ce signal n'est pas exactement carré mais plutôt rectangulaire. Il est caractérisé par le rapport de la durée positive sur la période, appelé **rapport cyclique**, et un signal parfaitement carré a un rapport cyclique de 50%. La principale utilisation est le signal d'horloge en électronique digitale. Quand le rapport cyclique est très faible, le signal tend vers un **train d'impulsions**.
- **Signal triangulaire** : Le signal triangulaire croît et décroît de manière linéaire, lui conférant la forme dont il tire son nom.
- **Signal dents de scie** : Le signal en dents de scie idéal croît de manière linéaire (en rampe) et décroît instantanément. Sa principale utilisation est la base de temps des écrans cathodiques.



Comme tous les signaux périodiques, ceux-ci possèdent également une période qui se répète indéfiniment, et par conséquent une fréquence dont la valeur est égale à  $1/2L$  en Hz, où  $2L$  représente la durée de la période.

Il existe un puissant outil mathématique appelé **série de Fourier** qui stipule que n'importe quel signal périodique peut être perçu comme une addition d'un certain nombre de signaux sinusoïdaux, d'amplitudes variables et de fréquences multiples de celle du signal. Même les signaux carrés ou triangulaire peuvent être obtenus par l'addition de signaux sinusoïdaux.

	Expression de la période	Série de Fourier
Carré de période $2L$	$\begin{aligned} +1 & \text{ si } t < L \\ -1 & \text{ si } t \geq L \end{aligned} \quad (8)$	$\frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi t}{L} \quad (9)$
Triangle	$\arcsin(\sin \pi t/L) \quad (10)$	$\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{-1^{(n-1)/2}}{n^2} \sin \frac{n\pi t}{L} \quad (11)$
Dent de scie	$t/2L \quad (12)$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \sum_n \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi t}{L} \quad (13)$



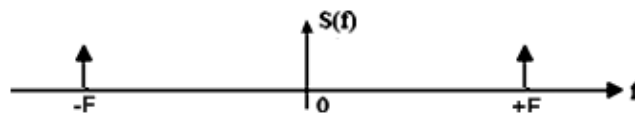
### 3.1.4. Spectre d'un signal

Dans le cas général où le signal  $s(t)$  est quelconque, il contient un ensemble continu de composantes en fréquences qui forment le **spectre du signal**. Le spectre de  $s(t)$  est formulé analytiquement par une fonction de la fréquence  $S(f)$ , appelée la **transformée de Fourier**.

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (14)$$

où  $j$  est le nombre imaginaire  $\sqrt{-1}$

La transformée de Fourier de la sinusoïde  $\cos(2\pi F t)$ , qui est composée d'une seule fréquence  $F$ , est représentée sur l'axe positif des fréquences par une raie unique,

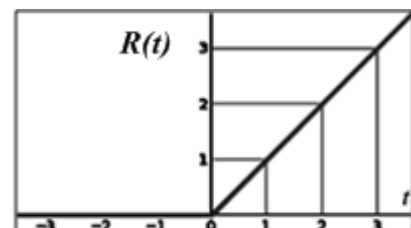
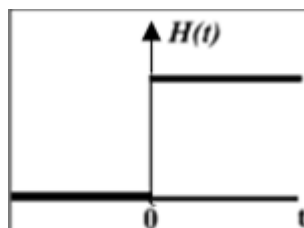
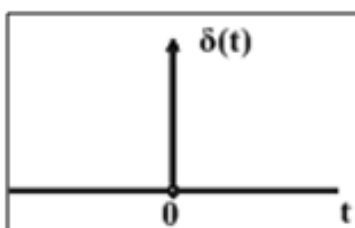


Elle s'exprime au moyen de l'impulsion de Dirac  $\frac{1}{2}(\delta(f - F) + \delta(f + F))$  (15)

### 3.1.5. Les distributions

Une distribution, appelée aussi fonction généralisée, se formule au moyen de différentes expressions sur des intervalles distincts du domaine de définition. Les distributions suivantes ont un intérêt particulier en traitement du signal,

	Expression de la distribution	Transformée de Fourier
<b>Impulsion de Dirac</b>	$\delta(t) = \begin{cases} +\infty & \text{si } t = 0 \\ 0 & \text{si } t \neq 0 \end{cases} \quad (16)$	1 (17)
<b>Fonction de Heaviside, ou échelon</b>	$H(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 0 \\ 1 & \text{si } t \geq 0 \end{cases} \quad (18)$	$\frac{1}{2} \left( \delta(f) - \frac{j}{\pi f} \right) \quad (19)$
<b>Fonction Rampe</b>	$R(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 0 \\ t & \text{si } t \geq 0 \end{cases} \quad (20)$	$\frac{j}{4\pi} \frac{d\delta(f)}{df} - \left( \frac{1}{2\pi f} \right)^2 \quad (21)$



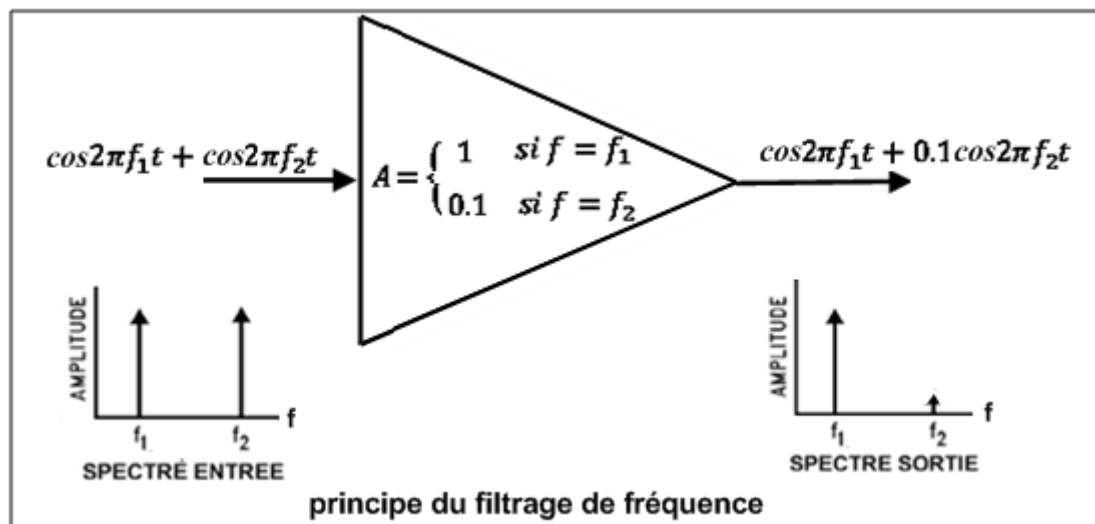
## 3.2. Filtres électriques

En théorie des circuits électriques, un filtre est un quadripôle qui modifie l'amplitude ou la phase du signal d'entrée en fonction de sa fréquence.

Un filtre n'ajoute pas de nouvelles fréquences au signal d'entrée.

Les filtres sont utilisés dans les systèmes électroniques pour accentuer des signaux dans certaines gammes de fréquence et réduire d'autres signaux dans d'autres gammes de fréquences.

A titre d'exemple, envisageons le cas où un signal utile de fréquence  $f_1$  est contaminé par un signal parasite de fréquence  $f_2$ . Si le signal contaminé passe à travers un circuit qui a un très faible gain à la fréquence  $f_2$  par rapport à son gain à la fréquence  $f_1$ , à la sortie de ce circuit le signal indésirable est négligeable, et le signal utile reste intact.



Le gain du filtre est plus généralement spécifié pour une bande continue de fréquences.

Les filtres étant définis par leurs effets sur les fréquences des signaux, il est plus approprié, et plus utile, de les décrire analytiquement ou graphiquement dans le domaine fréquentiel.

Les courbes de gain et de phase en fonction de la fréquence, **Diagramme de Bode**, sont communément utilisées pour illustrer les caractéristiques des filtres, et les outils mathématiques les plus utilisés sont basés sur le domaine de la fréquence.

Le comportement dans le domaine fréquentiel d'un filtre est décrit mathématiquement par une **fonction de transfert**, qui est rapport de la transformée de Laplace du signal de sortie sur celle du signal d'entrée.

La fonction de transfert  $H(s)$  en tension d'un filtre s'écrit:

$$H(s) = \frac{V_S(s)}{V_E(s)} \quad (22)$$

où  $V_E(s)$  et  $V_S(s)$  sont les transformées de Laplace de la tension d'entrée et de la tension de sortie respectivement.

$s$  est une variable complexe représentant la fréquence.

La fonction de transfert définit la **réponse du filtre** à un signal d'entrée quelconque, mais le plus souvent on s'intéresse aux signaux sinusoïdaux continus.

En remplaçant la variable  $s$  par  $j\omega$ , on peut connaître l'effet du filtre sur l'amplitude et la phase du signal d'entrée.

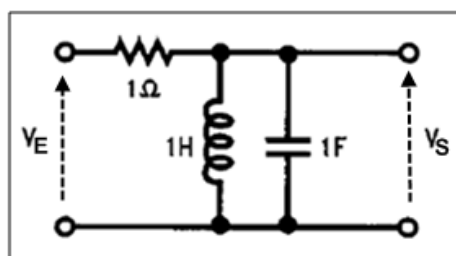
Le **module** de la fonction de transfert en fonction de la fréquence indique l'effet du filtre sur les amplitudes des signaux à différentes fréquences. Le module de la fonction de transfert en fonction de la fréquence est appelé la **réponse en amplitude**, ou **gain**.

$$|H(j\omega)| = \left| \frac{V_S(j\omega)}{V_E(j\omega)} \right| \quad (23)$$

De même, la **réponse en phase** du filtre donne le décalage dans le temps introduit sur les signaux sinusoïdaux en fonction de la fréquence. Dans certaines applications, les relations de temps entre les composantes du signal à des fréquences différentes sont très utiles.

$$\arg(H(j\omega)) = \arg\left(\frac{V_S(j\omega)}{V_E(j\omega)}\right) \quad (24)$$

A titre d'exemple, observons le circuit simple suivant :



Sa fonction de transfert est

$$H(j\omega) = \frac{j\omega}{-\omega^2 + j\omega + 1} \quad (25)$$

$$|H(j\omega)| = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + (1 - \omega^2)^2}} \quad (26)$$

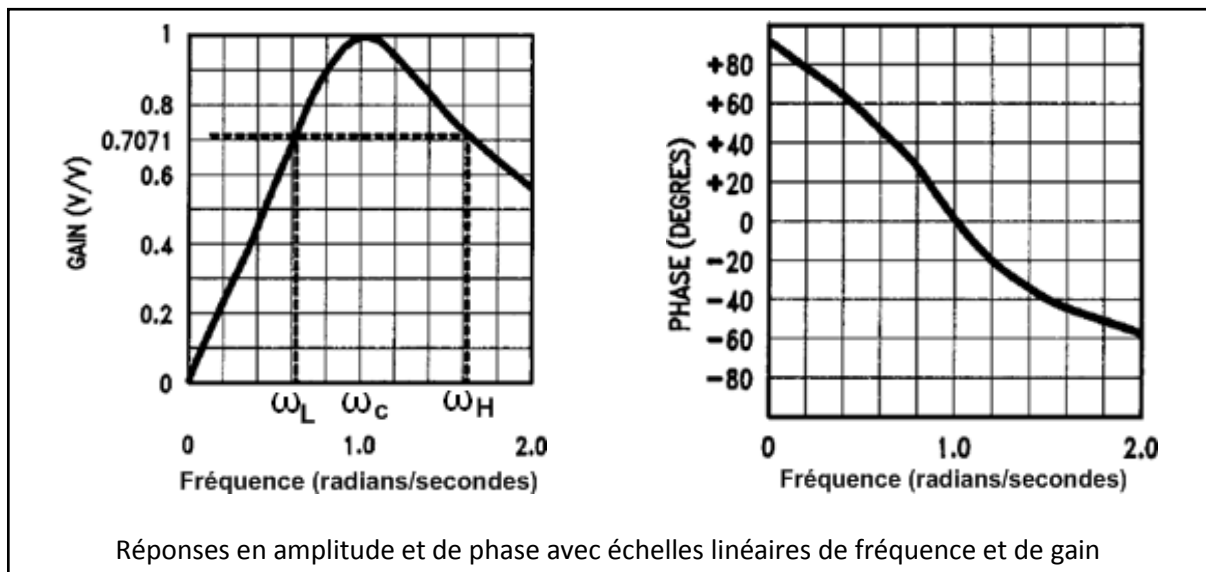
$$\arg(H(j\omega)) = \text{atan}\left(\frac{1 - \omega^2}{\omega}\right) \quad (27)$$

C'est un système de 2<sup>ème</sup> ordre. L'ordre d'un filtre est la plus grande puissance de la variable  $j\omega$  dans sa fonction de transfert. En pratique l'ordre du filtre est égal au nombre total de condensateurs et inductances contenus dans son circuit. Un condensateur obtenu en combinant deux ou plusieurs condensateurs individuels est compté un condensateur.

Avant de tracer la réponse en amplitude du circuit, on peut facilement voir qu'à très basses fréquences ( $\omega \ll 1$ ), le numérateur devient très faible, tout comme les deux premiers termes du dénominateur. Ainsi, comme  $\omega$  tend vers zéro, le numérateur se rapproche de zéro, le dénominateur se rapproche de 1, et  $H(j\omega)$  se rapproche de zéro.

De même, si la fréquence du signal d'entrée tend vers l'infini,  $H(j\omega)$  devient progressivement plus petite, parce que le dénominateur augmente avec le carré de fréquence alors que le numérateur augmente linéairement avec la fréquence.

Par conséquent,  $H(j\omega)$  aura sa valeur maximale à une fréquence intermédiaire entre 0 et  $\infty$ , et diminuera pour les fréquences supérieures et inférieures à cette valeur de crête.



La courbe montre que l'amplitude de la fonction de transfert présente une valeur maximale à la fréquence spécifique  $\omega_c$ , et décroît de part et d'autre de  $\omega_c$ . Ce filtre est désigné **filtre passe-bande**, car il laisse passer les signaux qui se situent dans une bande de fréquences et atténue ceux qui sont en dehors de cette bande. La gamme de fréquences qui ne sont pas atténuées par un filtre est appelée la **bande passante** du filtre.

La courbe de réponse en amplitude de ce filtre est assez lisse, il n'y a pas de limites nettes pour la bande passante. Les limites de la bande passante sont généralement les fréquences où le gain diminue de 3 décibels (à  $1/\sqrt{2}$  de son gain en tension maximal). Ces fréquences sont appelées les **fréquences à -3 dB** ou les **fréquences de coupure**.

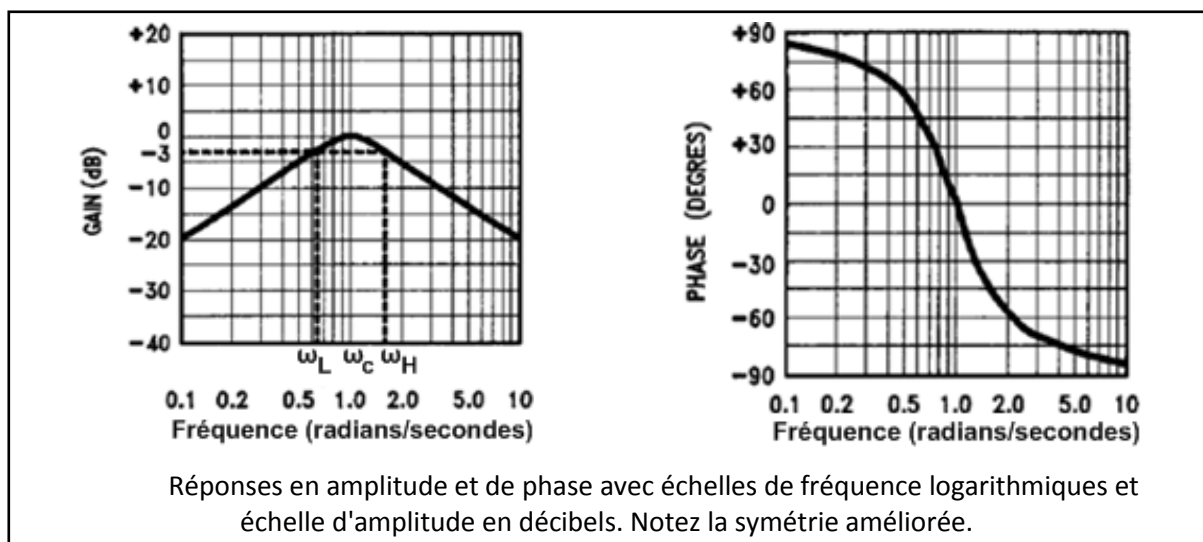
La forme précise de la courbe de réponse en amplitude du filtre passe-bande dépend de son circuit particulier, mais toute courbe de réponse d'un filtre passe-bande du deuxième ordre aura une valeur de crête à la fréquence centrale du filtre. La fréquence centrale est égale à la moyenne géométrique des fréquences de coupure à -3 dB:

$$\omega_c = \sqrt{\omega_L \omega_H} \quad (28)$$

Une autre quantité très utilisée pour décrire la performance d'un filtre est le facteur de mérite " $Q$ ". C'est une mesure de la netteté de la réponse en amplitude. Le  $Q$  d'un filtre passe-bande est le rapport de la fréquence centrale sur la différence entre les fréquences -3 dB (également connu sous le nom **largeur de la bande passante à -3 dB**).

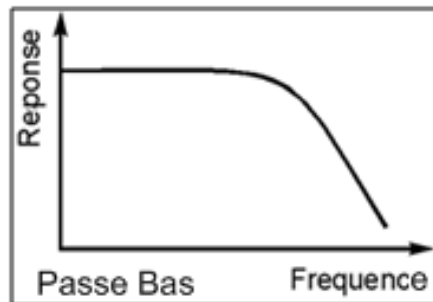
$$Q = \frac{\omega_c}{\omega_H - \omega_L} \quad (29)$$

Une échelle de fréquence logarithmique est très utile dans de tels cas, car elle donne un intervalle égal à un égal rapport de fréquences. L'échelle d'amplitude aussi est généralement exprimée en décibels ( $20 \log |H(j\omega)|$ ).

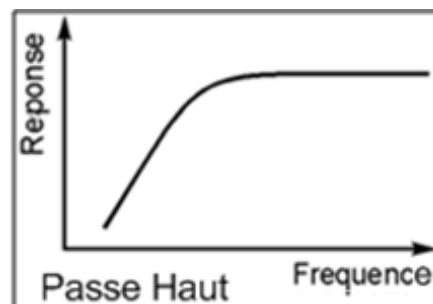


## Autres types de filtres RF

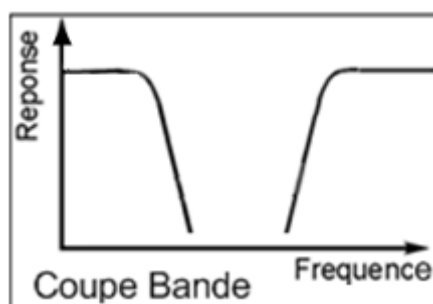
- **Filtre passe-bas:** Un filtre passe-bas permet uniquement aux signaux dont les fréquences sont inférieures à sa fréquence de coupure de passer sans atténuation.



- **Filtre passe-haut:** Un filtre passe-haut ne fait passer que les signaux de fréquence au dessus de sa fréquence de coupure et rejette ceux dont la fréquence est en dessous de la fréquence de coupure.



- **Filtre coupe-bande:** Le filtre coupe-bande, parfois appelé filtre à rejection de bande, fait passer les signaux dont la fréquence n'est pas comprise dans une certaine bande, et rejette les signaux dont la fréquence est à l'intérieur de cette bande.



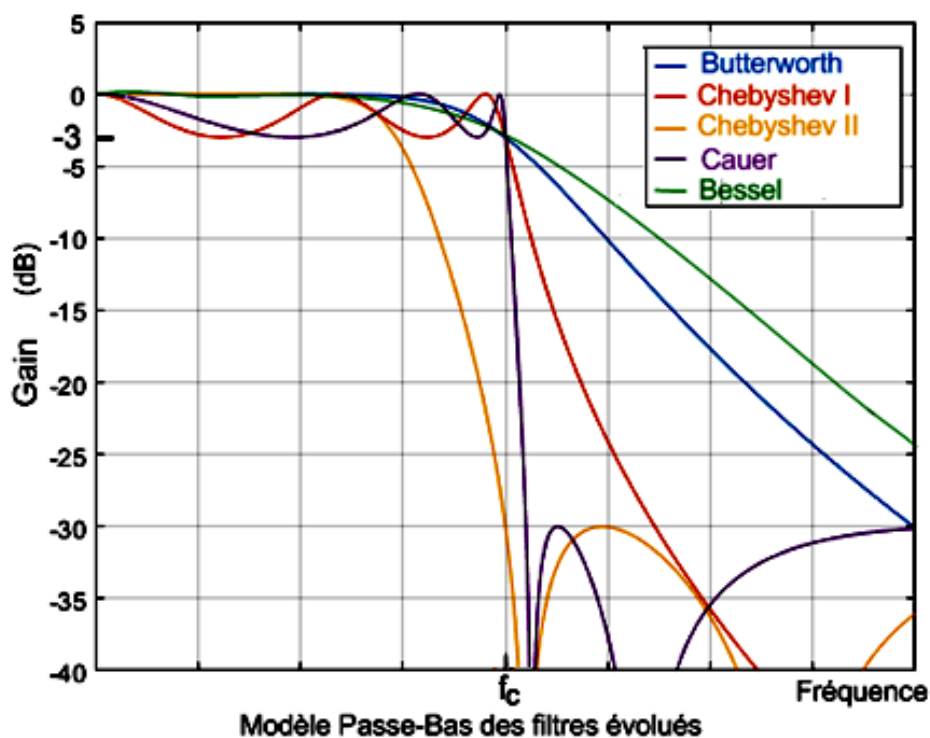
## Filtres évolués

Les filtres utilisés dans les équipements réels ont une conception beaucoup plus robuste que ceux que nous étudions ici, avec des fonctions de transfert assez compliquées, et des ordres élevés pouvant aller jusqu'à 10.

Nous présentons les propriétés spectrales des filtres les plus renommés, que vous étudierez dans des modules spécialisés

- **Butterworth** : Ce type de filtre fournit le maximum de planéité dans la bande.
- **Bessel** : Ce type de filtre fournit le plus faible déphasage dans la bande et donc fournit la meilleure réponse à un échelon.
- **Chebyshev Type I** : Ce type de filtre fournit la plus grande atténuation hors-bande au détriment d'une ondulation dans la bande.
- **Chebyshev Type II** ou **Chebyshev inverse** : Ce type de filtre a une réponse plane dans la bande passante, et présente une ondulation hors bande comprise entre des minima de gain  $-\infty$  en dB (atténuation totale) et des pics d'égale valeur de gain.
- **Elliptique (Cauer)** : Ce type de filtre fournit la pente de transition la plus abrupte

La figure suivante montre les réponses en amplitude de ces quatre types de filtres pour le cas passe-bas avec une même fréquence de coupure à -3dB

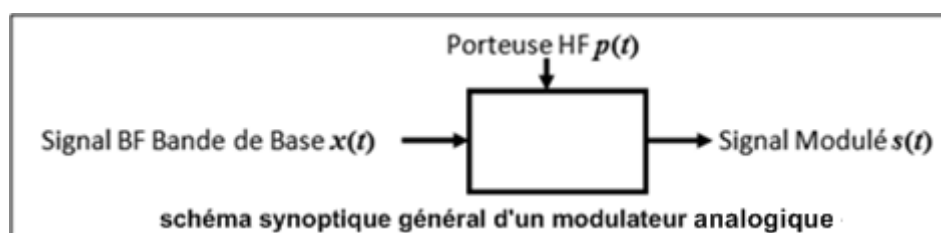


## 3.3. Modulation analogique

### 3.3.1. Généralités sur la modulation d'un signal analogique

En télécommunications, la pratique de moduler une porteuse à haute fréquence par un signal de source avant de le transmettre, est née de la nécessité d'adapter ses propriétés électriques et spectrales à celle du canal de transmission. D'autres avantages ont été introduits, telle que la possibilité d'utiliser une même ligne de transmission pour plusieurs communications simultanées au moyen de la modulation et du filtrage.

Le schéma synoptique d'un modulateur analogique est représenté sur la figure suivante :



#### 3.3.1.a. Porteuse $p(t)$

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

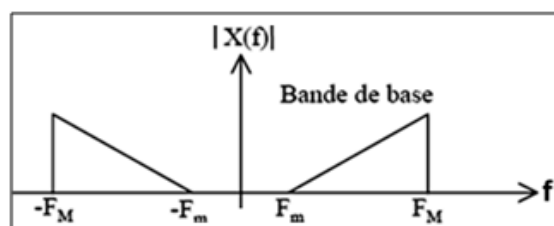
$$p(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t) \quad (30)$$

La phase  $2\pi f_0 t$  de  $p(t)$  est **la référence de phase** pour tous les signaux

#### 3.3.1.b. Signal modulant $x(t)$

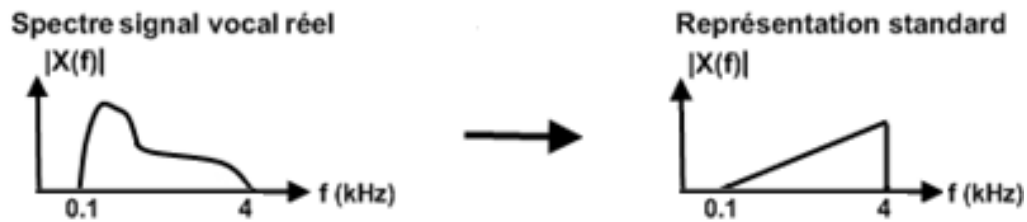
Le signal  $x(t)$  contenant l'information est à valeurs réelles. On note respectivement  $F_m$  et  $F_M$  la plus basse et la plus haute fréquence qu'il contient. La fréquence  $F_M$  est beaucoup plus faible que la fréquence porteuse  $f_0$ . La fréquence  $F_m$  peut être égale à 0.

La transformée de Fourier  $X(f)$  est en règle générale à valeurs complexes avec une partie réelle et une partie imaginaire. Le spectre est représenté sous une forme standard par le module de  $X(f)$ .



Ce spectre occupe la bande de fréquence  $F_m \leq f \leq F_M$ , qui est appelée **bande de base**.

Faites attention, le profil triangulaire du spectre de la bande de base n'est qu'une représentation graphique standard. La forme réelle du spectre peut être très différente, et pour chaque type de signal modulant elle retrace le profil de ses fréquences naturelles.



### 3.3.1.c. Signal modulé $s(t)$

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

$$s(t) = A(t) \cos(\phi(t)) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t)) \quad (31)$$

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

$$\phi(t) \text{ la phase instantanée du signal modulé } s(t), \quad \phi(t) = 2\pi f_0 t + \varphi(t) \quad (32)$$

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

On définit la fréquence instantanée  $f_i(t)$  du signal modulé  $s(t)$  par la relation :

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (33)$$

Les différentes techniques de modulation analogique qui existent sont définies d'après le paramètre dans lequel l'information contenue dans le signal modulant  $x(t)$  est insérée

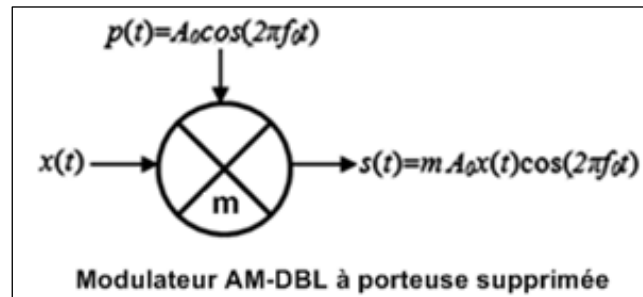
- Modulation d'amplitude **AM** : l'information est insérée dans l'amplitude instantanée  $A(t)$
- modulation de fréquence **FM** : l'information est insérée dans la fréquence instantanée  $f_i(t)$ ,
- Modulation de phase **PM** : l'information est insérée dans la déviation de phase  $\varphi(t)$

En général la transformée de Fourier  $S(f)$  du signal modulé n'est pas reliée aux transformées  $X(f)$  et  $P(f)$  des signaux d'entrée par une fonction de transfert, car le circuit de modulation est **non linéaire**.

### 3.3.2. Méthodes de modulation en amplitude AM

#### 3.3.2.a. Modulation AM à double bande latérale à porteuse supprimée

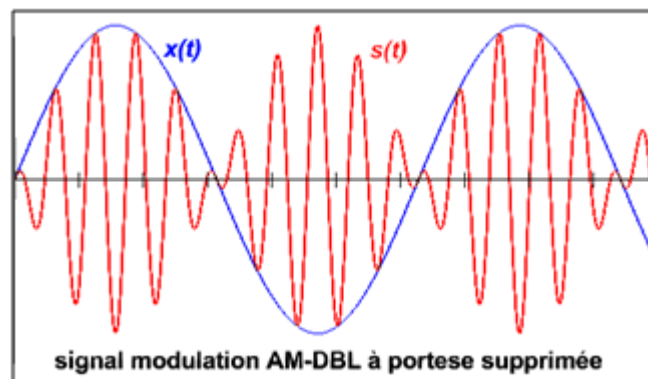
Cette technique consiste à multiplier la porteuse  $p(t)$  par le signal modulant  $x(t)$  au moyen d'un circuit multiplieur de tension comme illustré sur la figure suivante



Le signal à la sortie du montage a pour expression :

$$s(t) = m A_0 x(t) \cos(2\pi f_0 t) \quad (34)$$

où le coefficient  $m$ , positif et sans dimension, est un facteur multiplicatif caractéristique du multiplieur. La fréquence instantanée de la sortie  $s(t)$  du multiplieur est égale à celle de  $p(t)$ ,  $f_0$ . Les signaux  $p(t)$  et  $s(t)$  sont en phase. L'amplitude instantanée de  $s(t)$  varie proportionnellement au signal modulant  $x(t)$ .



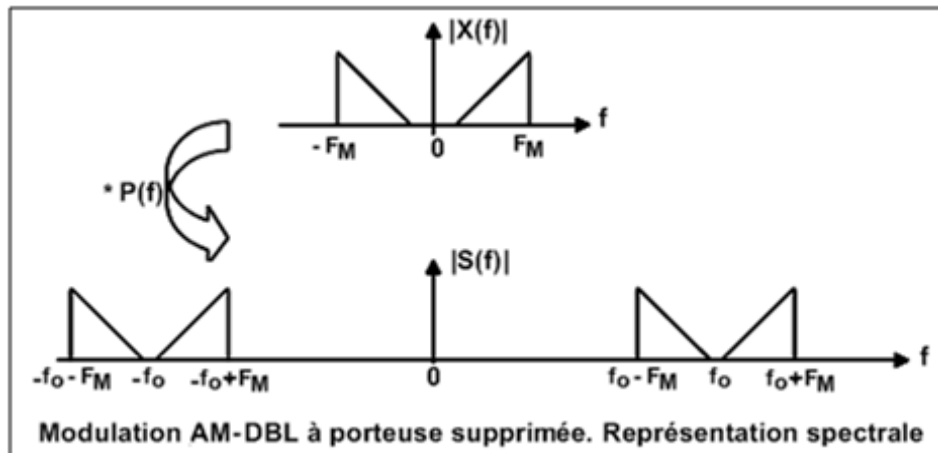
#### Spectres des signaux

La transformée de Fourier  $S(f)$  de  $s(t)$  s'écrit :

$$S(f) = \frac{1}{2} m A_0 (X(f - f_0) + X(f + f_0)) \quad (35)$$

où  $X(f)$  est la transformée de Fourier du signal modulant  $x(t)$

Le spectre du signal modulé reproduit celui du signal modulant décalé de  $+f_0$  pour  $f > 0$  et de  $-f_0$  pour  $f < 0$ . On dit que la modulation effectue une **transposition** de fréquence.

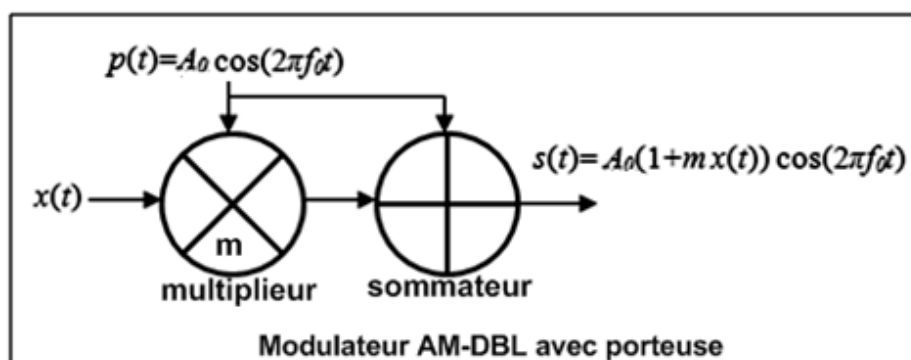


Pour  $f > 0$ , la bande de fréquence du spectre de  $s(t)$  située au-delà de  $f_0$  est appelée la bande latérale supérieure (**USB** *upper sideband*), et la bande de fréquence située en dessous de  $f_0$  s'appelle la bande latérale inférieure (**LSB** *lower sideband*). Le besoin en fréquence correspondant à ces deux bandes est égal à  $2F_M$  où  $F_M$  est la fréquence maximale apparaissant dans le spectre du signal modulant.

Ce type de modulation d'amplitude s'appelle **à porteuse supprimée** car la raie correspondant à la porteuse sinusoïdale n'apparaît pas dans le spectre du signal modulé. Physiquement ça signifie que la puissance de la porteuse n'est pas transmise, c'est l'avantage de cette technique par rapport à la modulation avec porteuse étudiée ci-après.

### 3.3.2.b. Modulation AM à double bande latérale avec porteuse

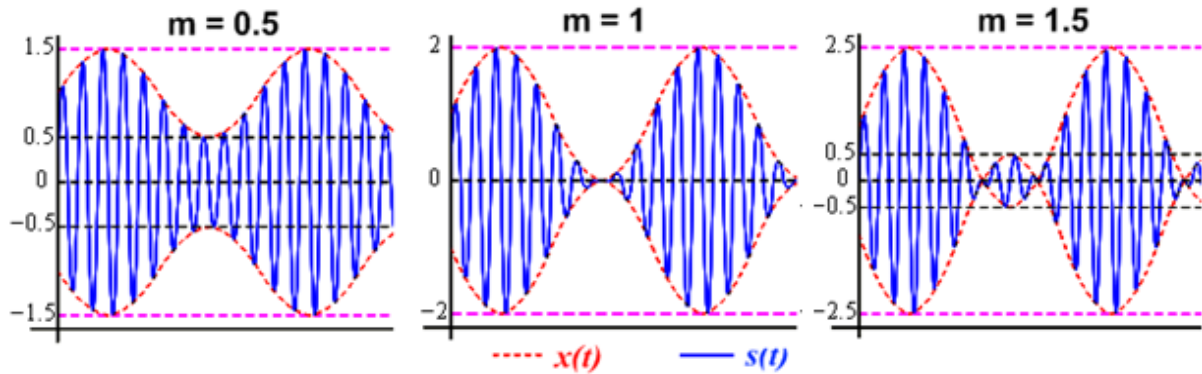
Dans cette technique qui est communément désignée AM sans plus de précisions, la raie correspondant à la porteuse est transmise aussi. Le signal de sortie du multiplieur est ajouté à la porteuse  $p(t)$  au moyen d'un circuit additionneur de tension (sommateur). L'avantage de ce type de modulation est la simplicité de la méthode de démodulation, la détection d'enveloppe, qui est inapplicable en modulation AM à porteuse supprimée.



On obtient en sortie de l'additionneur :

$$s(t) = A_0(1 + mx(t))\cos(2\pi f_0 t) \quad (36)$$

Le facteur  $m$  est défini alors comme l'**indice de modulation**. L'enveloppe de  $s(t)$  est unipolaire pour  $m \leq 1$ , elle est bipolaire pour  $m > 1$ , comme le montre la figure suivante.

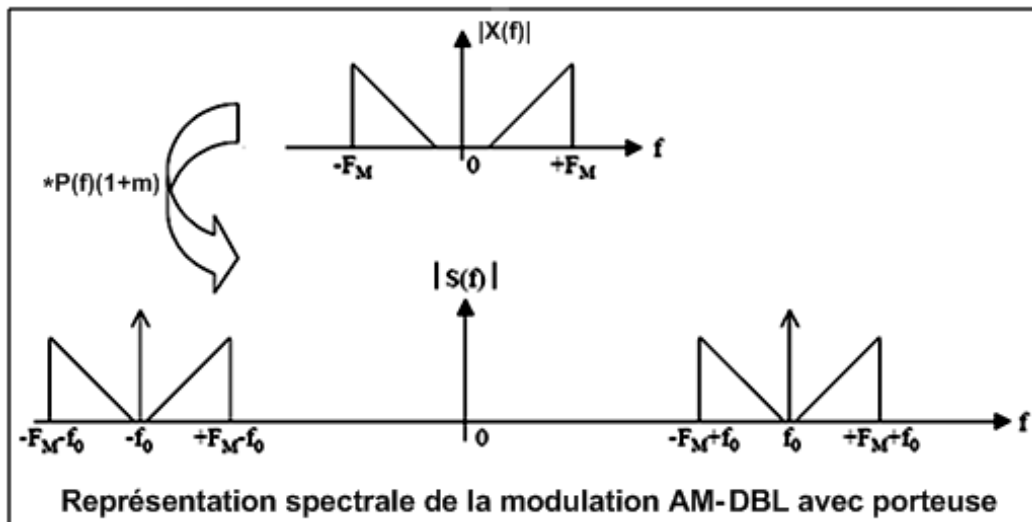


### Spectres des signaux

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

$$S(f) = \frac{1}{2}A_0(\delta(f - f_0) + mX(f - f_0) + \delta(f + f_0) + mX(f + f_0)) \quad (37)$$

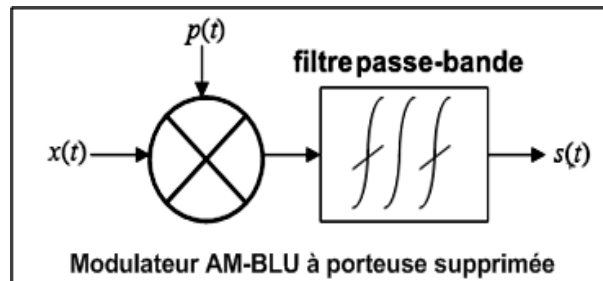
Le spectre du signal modulé dans ce cas est identique à celui de la modulation d'amplitude à porteuse supprimée, avec en plus deux raies correspondant à la porteuse



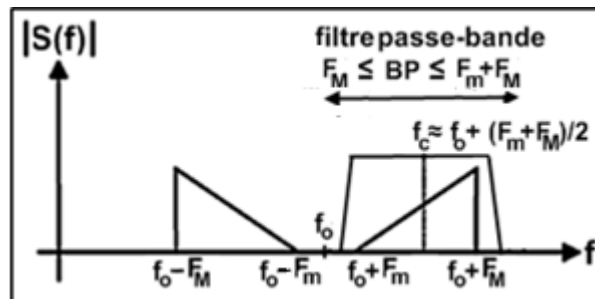
**Rendement :** Une partie de la puissance du signal transmis est consommée par la porteuse qui ne contient pas d'information. Le rendement  $\eta$  est le rapport entre la puissance du signal contenant l'information et la puissance totale transmise. En pratique  $\eta \approx 0.3$

### 3.3.2.c. Modulation AM à bande latérale unique BLU (SSB Single Side Band)

Les deux bandes latérales inférieure et supérieure d'une modulation AM à porteuse supprimée, contiennent exactement la même information, il est possible de n'en transmettre qu'une seule en utilisant un filtre passe-bande.



La bande passante du filtre doit être minutieusement centrée avec  $f_c \approx f_o + (F_m + F_M)/2$  et comprise entre  $F_m$  et  $F_m + F_M$  afin de prendre entièrement la bande latérale supérieure tout en évitant de chevaucher la bande latérale inférieure, comme il est illustré sur la figure suivante. La bande spectrale du signal modulé est alors égale à celle du signal modulant  $x(t)$ , et il n'y a pas de raie à la fréquence porteuse.

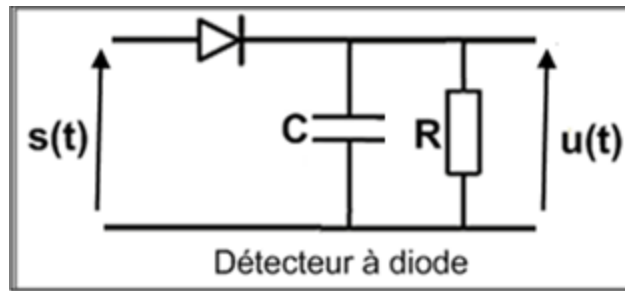


Toute l'information est disponible, mais la bande de fréquence est réduite de moitié. Elle est limitée à  $F_M$ , deux fois plus d'information est transmise sur un même canal. C'est cette méthode qui est utilisée dans le réseau téléphonique analogique pour le partage de ligne entre plusieurs communications simultanées par **multiplexage à division de fréquence FDM**.

### 3.3.2.d. Démodulation

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

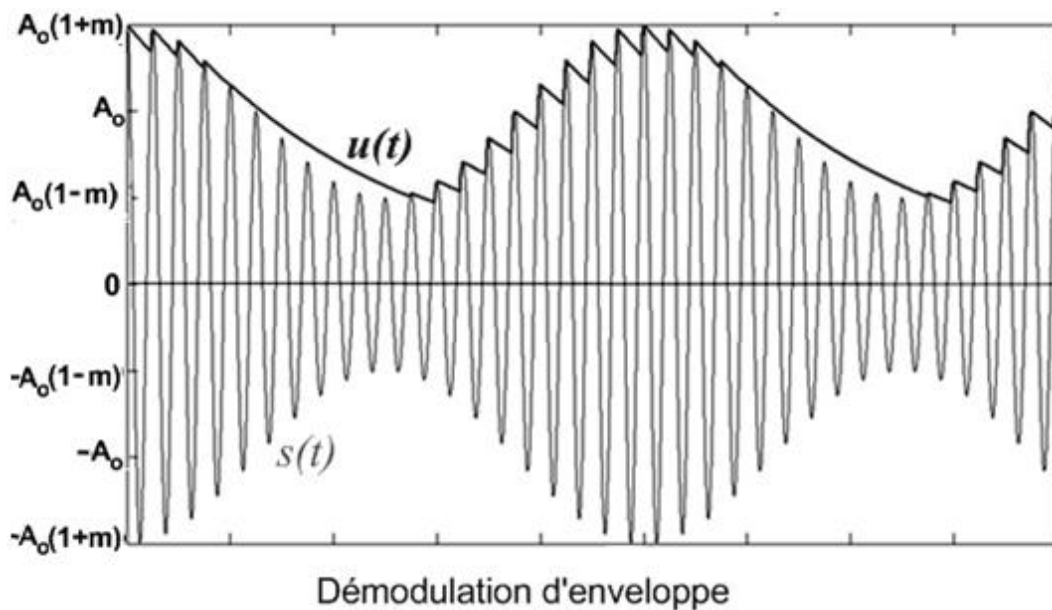
**Détection d'enveloppe :** En modulation d'amplitude, l'information se trouve dans l'enveloppe du signal modulé  $s(t)$ , une première méthode consiste à réaliser un détecteur d'enveloppe. La pratique la plus courante est de réaliser cette fonction au moyen d'un détecteur à diode, montré sur le schéma ci-dessous



Quand  $s(t) > u(t)$  la diode est passante. Le condensateur C se charge, et durant cet intervalle la sortie  $u(t)$  va suivre la valeur de  $s(t)$ .

Quand  $s(t) < u(t)$ , la diode se bloque et  $u(t)$  décroît selon la constante de temps RC de décharge du condensateur.

Donc pour  $s(t) > 0$ , la sortie  $u(t)$  du redresseur retrace approximativement l'enveloppe de  $s(t)$ , c'est-à-dire  $x(t)$  à une composante continue  $A_0$  près, qui sera éliminée par un filtre passe-haut.



La constante de temps doit être optimale dans les limites  $1/f_0 \ll RC \ll 1/F_M$ ,

Si la condition  $RC \ll 1/F_M$  n'est pas vérifiée, c'est-à-dire que le circuit de détection présente une constante de temps relativement élevée, le signal  $u(t)$  aura tendance à ne pas suivre le signal  $s(t)$  lorsque l'enveloppe décroît trop rapidement.

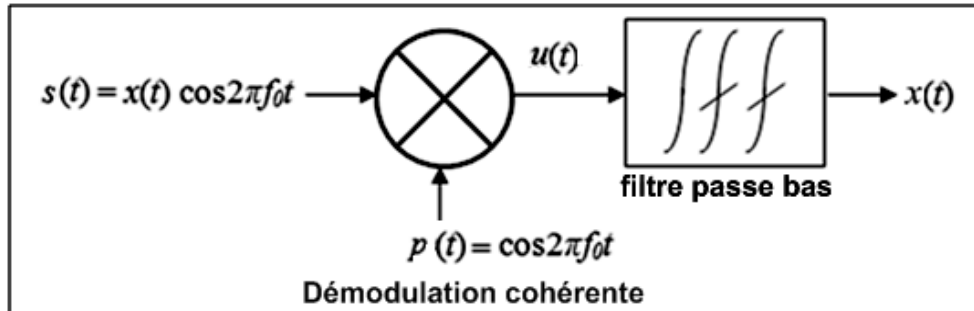
A l'opposée, si la condition  $RC \gg 1/f_0$  n'est pas respectée, le condensateur aura tendance à se décharger trop rapidement donnant un signal détecté  $u(t)$  trop ondulé.

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

## Démodulation cohérente ou synchrone

Cette démodulation est nécessaire pour la modulation d'amplitude sans porteuse, mais elle peut être aussi utilisée pour la modulation d'amplitude avec porteuse.

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

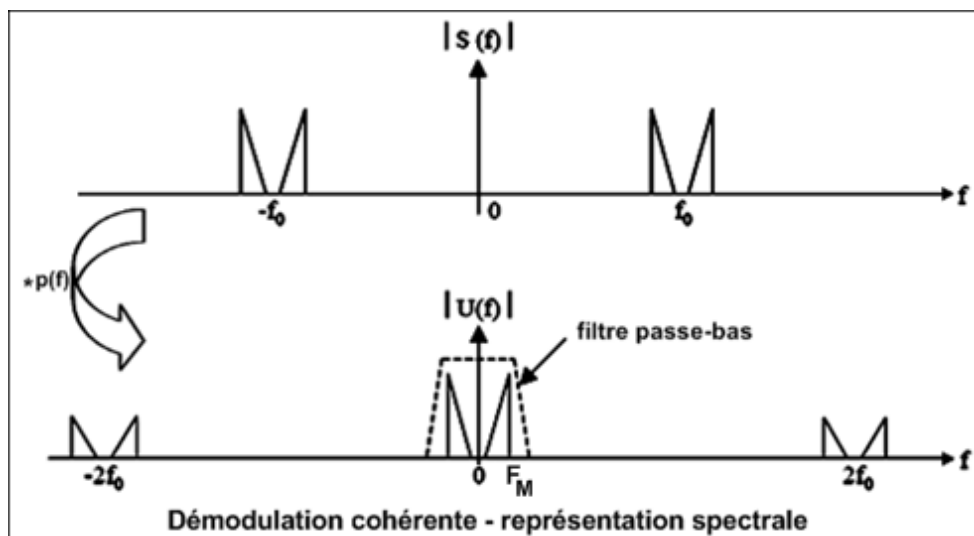


Le signal  $u(t)$  à la sortie du multiplieur s'exprime

$$u(t) = \frac{1}{2}x(t)(1 + \cos(2\pi 2f_0 t)) \quad (38)$$

Cette démodulation est aussi appelée synchrone parce que l'oscillateur qui génère  $p(t)$  a la même phase que le signal modulé  $s(t)$  au niveau du récepteur

Le signal  $u(t)$  a deux composantes spectrales : le spectre du signal  $x(t)$  ramené dans sa bande de base, et ce même spectre centré autour de la fréquence image  $2f_0$ . Il suffit alors de le filtrer par un filtre passe-bas de fréquence de coupure légèrement supérieure à la fréquence  $F_M$  pour récupérer le signal modulant  $x(t)$  à un facteur multiplicatif près. On a bien réalisé une démodulation.



### 3.3.3. Modulation de fréquence FM

#### 3.3.3.a. Représentation temporelle

On considère la même porteuse de fréquence  $f_0$ ,  $p(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t)$

Le modulateur fournit en sortie le signal

$$s(t) = A \cos(\phi(t)) \quad (39)$$

où l'amplitude  $A$  du signal modulé est constante

et l'angle  $\phi(t)$  est une fonction du signal modulant  $x(t)$ . Il serait plus juste d'écrire  $\phi(x(t))$

$\phi(t) = 2\pi f_0 t + \varphi(t)$  s'appelle **phase instantanée** de  $s(t)$ , et  $\varphi(t)$  la **déviaton de phase**,

$f_i(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}$  s'appelle **fréquence instantanée** de  $s(t)$ ,

et  $\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}$  s'appelle la **déviaton** de fréquence.

On dit que l'on a une modulation de fréquence si la déviaton de fréquence varie proportionnellement à  $x(t)$ , c'est-à-dire

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \Delta f \cdot x(t) \quad (40)$$

La fréquence instantanée devient

$$f_i(t) = f_0 + \Delta f x(t) \quad (41)$$

Pour rendre la chose limpide : **en FM la fréquence de la porteuse subit une variation proportionnelle à la valeur du signal modulant.**

Le facteur de proportionnalité  $\Delta f$  s'appelle **excursion en fréquence**

Compte tenu des définitions précédentes, le signal modulé s'écrit formellement

$$s(t) = A \cos\left(2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f \int_0^t x(\tau) d\tau\right) \quad (42)$$

### 3.3.3.b. Cas d'un signal modulant sinusoïdal

Supposons que le signal modulant est sinusoïdal  $x(t) = \cos(2\pi Ft)$  (43)

Le signal modulé s'écrit

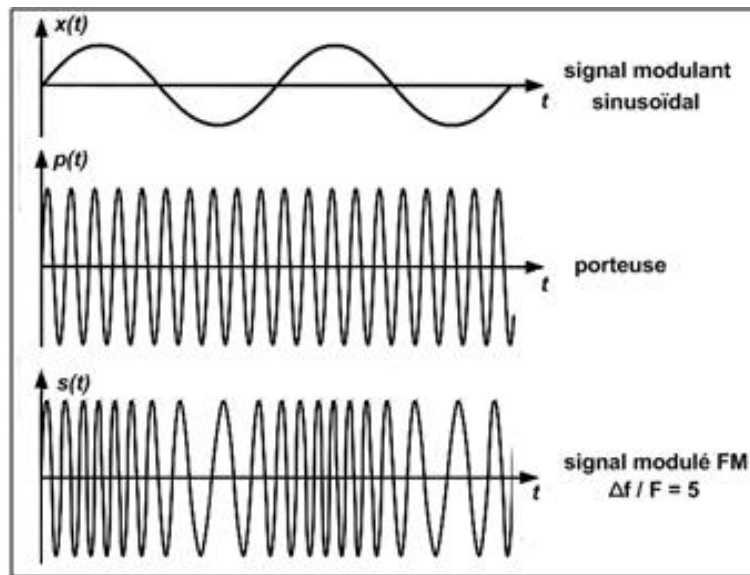
$$s(t) = A \cos\left(2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f \int_0^t \cos(2\pi F\tau) d\tau\right) \quad (44)$$

et l'expression devient après intégration selon  $t$

$$s(t) = A \cos\left(2\pi f_0 t + \frac{\Delta f}{F} \sin(2\pi Ft)\right) \quad (45)$$

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

La figure ci-dessous montre l'allure du signal modulé FM  $s(t)$  dans le cas de  $x(t)$  sinusoïdal



### 3.3.3.c. Spectre du signal FM

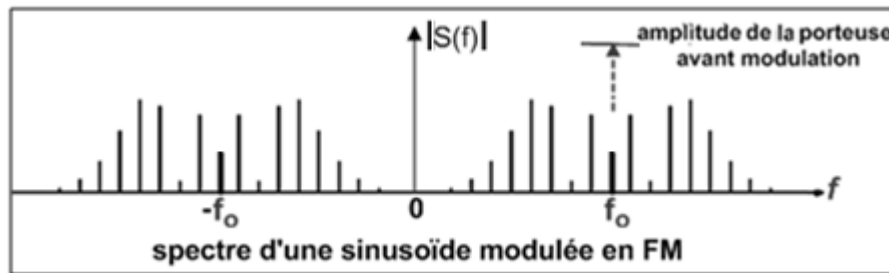
La modulation de fréquence produit un nombre infini de bandes latérales au dessus et en dessous de la fréquence de la porteuse.

Dans le cas où le signal modulant est une tonalité de fréquence  $F$ , le spectre du signal modulé a pour expression

$$S(f) = \frac{A}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\frac{\Delta f}{F}\right) [\delta(f - f_0 - nF) + \delta(f + f_0 + nF)] \quad (46)$$

où  $J_n(x)$  est la fonction de Bessel de première espèce

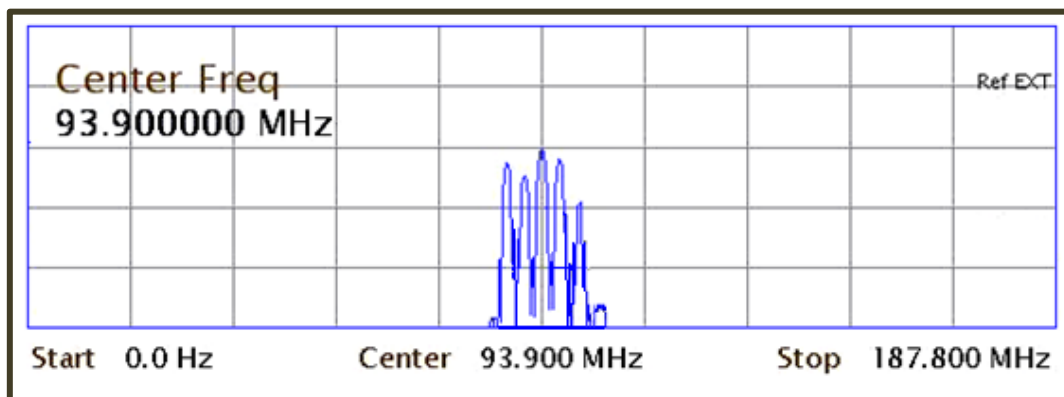
La figure suivante représente ce spectre pour  $\Delta f/F$  égal à 5



Noter que l'amplitude de la porteuse dans le spectre du signal modulé diffère de celle de la porteuse avant modulation

### 3.3.3.d. Signaux FM réels

Dans le cas où le signal modulant est quelconque comme dans les signaux réels, il est très difficile de formuler analytiquement le spectre du signal en modulation de fréquence. En pratique, il présente l'allure montrée sur la figure suivante



Spectre du signal RF de la station Radio Cirta FM 93.9 MHz, prélevé par analyseur de spectre à la plateforme technologique Châabat Ersas par les étudiants **Boulmahli Abdeldjalil** et **Bouزيد Borhane Eddine**, Master 2 Systèmes de Télécommunications

Théoriquement, la bande passante d'un signal FM est égale à

$$BW = 2F_M N \quad (47)$$

$F_M$  étant la fréquence la plus élevée présente dans le signal modulant,

$N$  est le nombre de bandes latérales importantes, une bande latérale est considérée importante si sa puissance est au moins de 1% celle de la porteuse.

### 3.3.3.e. Règle de Carson

Mathématiquement, il est démontré que la majeure partie de l'énergie du signal est concentrée dans un nombre limité de bandes latérales autour de la porteuse.

John Renshaw Carson a établi en 1922 une règle empirique qui détermine la largeur de bande nécessaire à la transmission du signal FM, basée sur une amplitude de bande latérale importante de 2% ou plus.

#### ***La règle de Carson s'énonce :***

La bande de fréquence nécessaire pour transmettre un signal en modulation FM est

$$BW = 2 (\Delta f + F_M) \quad (48)$$

$\Delta f$  est l'excursion en fréquence du modulateur

$F_M$  la fréquence la plus élevée présente dans le signal modulant

## John Renshaw Carson



بقدر ما نتذكر الابتكارات فغالبا ما لا نعرف أولئك الذين وضعوها. ولد جون رينشو كارسون في بيتسبرغ في 28 يونيو 1886. التحق بجامعة برينستون وتخرج في عام 1907 بدرجة باشلور في العلوم. ذهب جون إلى معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا في عامي 1907 و 1908 لكنه عاد إلى برينستون حيث حصل على شهادة في الهندسة الكهربائية في عام 1909 ودرجة ماستر في عام 1912. درس الهندسة الكهربائية في جامعة برينستون لفترة وترك الجامعة عام 1914 للانضمام إلى AT&T.

بدأت مهنة كارسون الحقيقية في AT&T حيث عمل كمهندس كهربائي وعالم في الرياضيات. اخترع تحويل SSB في وقت مبكر جدا و تقدم للحصول على براءة بعنوان "أسلوب و وسائل للإشارة بموجات عالية التردد" في 1 ديسمبر 1915. وبعد تقاضي كبير، تم منحه البراءة رقم 1449382 يوم 27 مارس 1923. كان لSSB تأثير كبير على الاتصالات الهاتفية و الاتصالات اللاسلكية معا.

أجرى المهندس الشاب قدرا كبيرا من التحليل الرياضي لقواعد الاتصالات. حل تحويل التردد FM وناقش مخترعه إدوين أرمسترونج فيما يخص فوائد الضوضاء في FM. في رسالته "ملاحظات حول نظرية التحويل"، التي نشرت في فبراير 1922 في دورية لمعهد مهندسي الراديو (الآن IEEE)، طرح القاعدة المعروفة الآن بقاعدة كارسون حول عرض نطاق التحويل الترددي.

انتقل كارسون إلى مختبرات بيل تلفون عام 1925 وعمل هناك حتى وفاته عام 1940. وفي عام 1926 نشر ماكجرو-هيل كتابه "نظرية الدارة الكهربائية" الذي ما زال يباع إلى اليوم عند أمازون.

لم يتمكن كارسون من رؤية كل فوائد عمله. بينما شهد استخدام SSB في شبكات الهاتف، لم يشاهد كيف استفادت منها الإذاعة بعد الحرب العالمية الثانية.

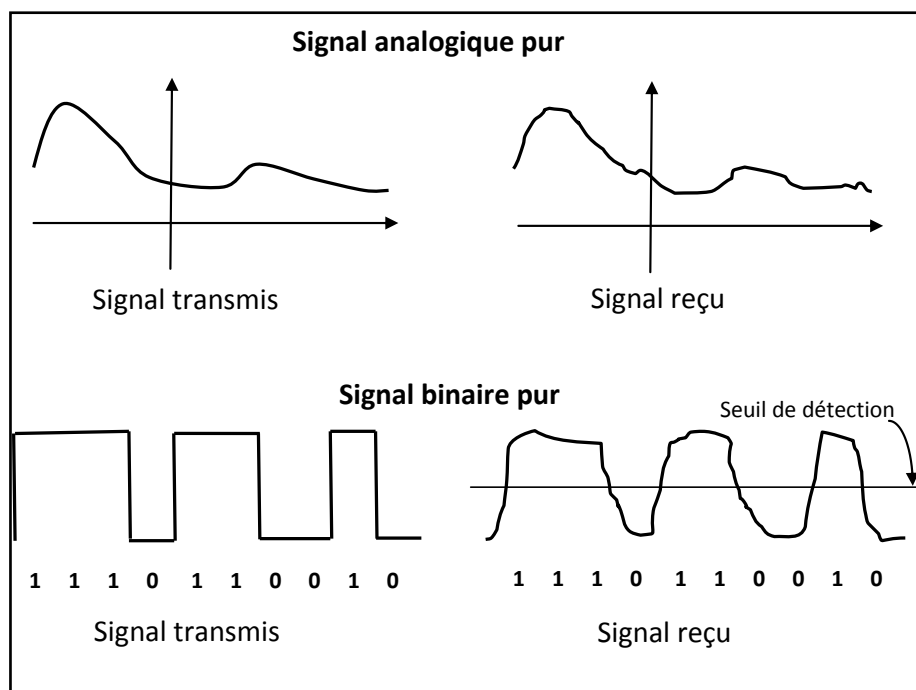
# **Chapitre 4**

## **TECHNIQUES DE TRANSMISSION NUMÉRIQUE**

#### 4.1. Principe de la transmission numérique

Les télécommunications numériques, ou digitales, désignent en principe la transmission et le traitement de signaux à valeurs binaires, comme en électronique digitale par opposition aux signaux analogiques qui ont une plage continue de valeurs. Le signal binaire peut être transmis à son état pur, technique appelée **transmission en bande de base**, ou préalablement modulé par une porteuse analogique. De même le signal peut être binaire à la source, comme un fichier lu sur un disque, ou bien analogique à la source et digitalisé par une technique comme la **modulation par impulsions codées** que nous étudierons plus loin.

La transmission numérique de l'information offre un avantage majeur par rapport à la transmission analogique : Autant une distorsion minime due aux bruits introduits par le canal de transmission dans l'amplitude du signal analogique, se traduit par une perte de l'information, le signal binaire tolère des variations sur l'amplitude des niveaux logiques, et un simple **seuillage** permet de restituer l'information exacte. La figure suivante compare l'effet de la distorsion sur un signal analogique pur et un signal binaire pur



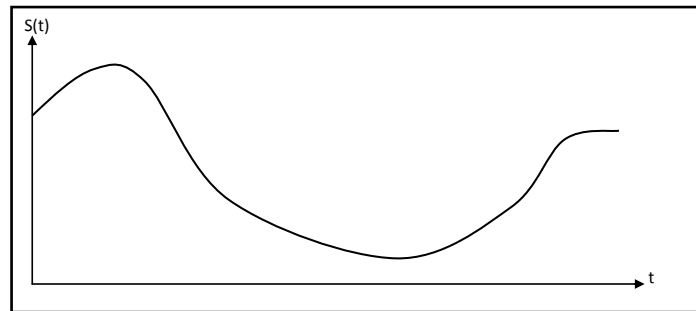
Remarquer que dans le signal binaire reçu, malgré la perte de la pureté de la forme du signal transmis, on peut aisément reconnaître les 1 et les 0 logiques. Un seuillage judicieusement fixé permet de restituer l'information binaire avec exactitude.

Techniquement, le seuillage consiste à choisir un niveau de tension donné, et considérer toute valeur du signal reçu supérieure à ce niveau comme un **1**, et toute valeur inférieure à ce niveau comme un **0**. Là on dit que le signal binaire est **régénéré**.

## 4.2. Modulation par impulsions codées

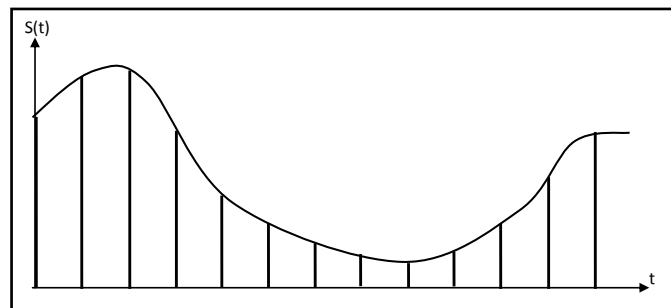
La transmission numérique concerne des données qui sont digitales à l'origine aussi bien que des signaux sources analogiques qui sont digitalisés selon la procédure décrite dans ce paragraphe.

Prenons un signal analogique basse fréquence  $s(t)$

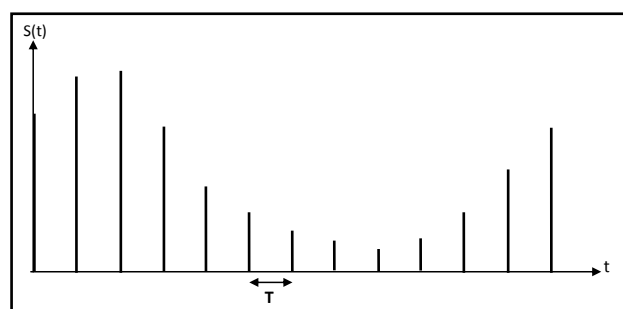


### 4.2.1. Echantillonnage

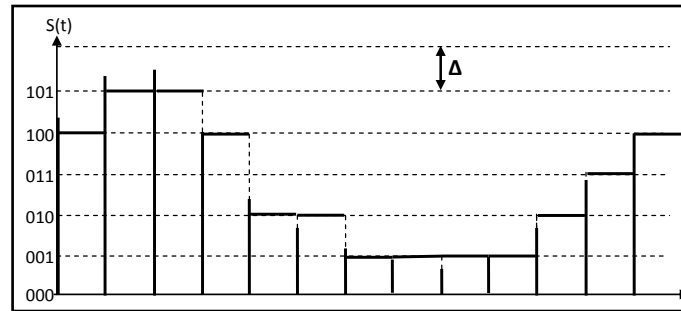
Les amplitudes sont prélevées selon une séquence d'instants tels que la fréquence soit au moins double de la fréquence la plus élevée présente dans le signal source. Cette précaution liée au théorème d'échantillonnage de Shannon est indispensable pour pouvoir reconstruire le signal source à partir de sa conversion binaire



Le résultat est une séquence d'impulsions espacées dans le temps par un intervalle constant  $T$



### 4.2.2. Quantification



L'axe des amplitudes est discrétisé en ensemble de valeurs multiples d'un pas de quantification  $\Delta$ . La valeur discrète la plus proche est assignée à l'amplitude de l'impulsion.

Cette opération introduit une erreur appelée **bruit de quantification**, noté  $q$ . en termes mathématiques,  $q$  est une variable aléatoire uniformément distribuée sur l'intervalle  $-\frac{\Delta}{2} \leq q \leq +\frac{\Delta}{2}$

Remarquer que le bruit de quantification pénalise particulièrement les amplitudes de faible valeur

### 4.2.3. Codage de l'amplitude quantifiée des impulsions

Un système de représentation binaire est choisi pour la valeur de l'amplitude quantifiée, par exemple en complément à 2 signé. Les codes individuels de chaque impulsion sont sérialisés en un flot binaire qui forme le message à transmettre.

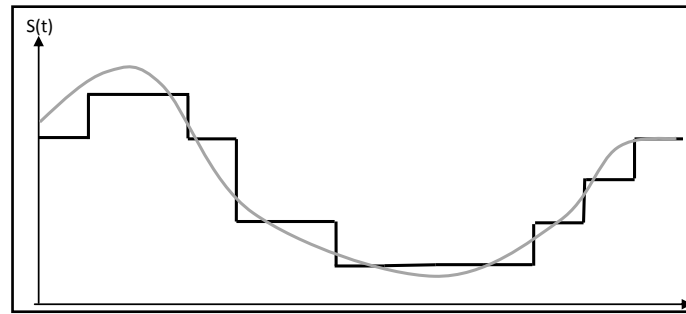
100 101 101 100 010 010 001 001 001 001 010 011 100

La « fréquence » ou vitesse de transmission des bits ne s'exprime pas en Hz mais en bits par seconde **bps**, et s'appelle le **débit binaire**

### 4.2.4. Reconstitution du signal d'origine

A la réception de la séquence binaire on procède aux opérations inverses pour reconstituer le signal source.

- La séquence reçue est divisée en blocs de bits de taille égale au mot de quantification
- Une conversion numérique analogique est appliquée à chaque bloc de bits
- La valeur analogique est maintenue une durée T



### 4.3. Codage dans le canal de transmission.

Pour répondre aux impératifs physiques du canal de transmission, tels que la bande de fréquence ou les contraintes liées à l'électromagnétisme et à l'optique, les niveaux logiques de la séquence binaire subissent une transformation dans la forme, ceci donne lieu à des **codes en ligne**, aussi appelés **signaux en bande de base**, dont les plus connus sont les codes NRZ et NRZI, le code biphase, et le code bipolaire haute densité HDB.

Les circuits électroniques digitaux ont adopté à l'origine l'absence de tension pour représenter le **0** et la tension d'alimentation pour représenter le **1**, selon la logique du tout ou rien. Autant ces signaux que nous désignons ici par **unipolaires** ou « **TTL** » sont naturellement appropriés aux circuits localisés, ils présentent des inconvénients pour la transmission filaire sur longue distance :

- Présence d'une valeur moyenne non nulle qui produit une dissipation de puissance
- Présence d'une composante continue qui empêche l'isolation galvanique de protection de la ligne de transmission (transfo ou optocoupleur)
- Une longue suite de 1 ou de 0 fait perdre la synchronisation à la réception, et risque parfois d'être interprétée comme une coupure de ligne

**Code NRZ Non-Return to Zero** : le 0 est codé  $-V$  et le 1 est codé  $+V$  pendant toute la durée  $T_b$  du bit

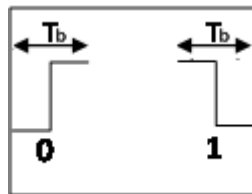
La valeur moyenne est nulle, mais la composante continue et le problème lié aux longues suites de bits de même valeur existent toujours.

Remarquer que dans ce code, l'inversion de la connexion des fils au niveau du récepteur inverse la valeur des bits

**Code NRZI Non-Return to Zero Inverted** : le 1 est codé par l'inversion de la polarité du bit précédent de +V à -V, ou de -V à +V, le 0 est codé par la conservation de la polarité du bit précédent.

Ce code possède les mêmes propriétés que le code NRZ, mais l'inversion de connexion des fils n'altère pas l'information

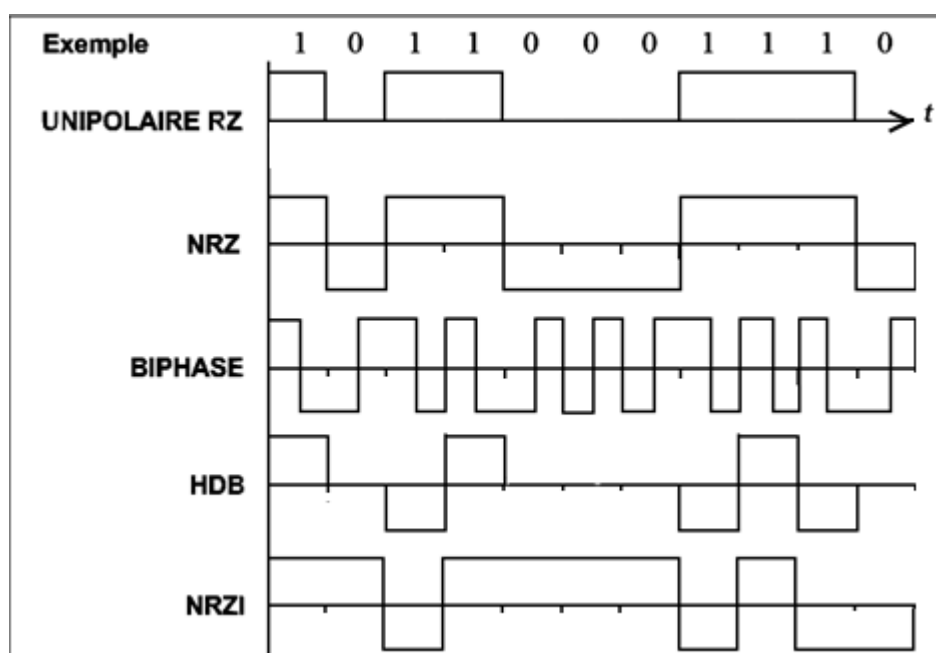
**Code Biphasé** : Le 0 est codé par une transition de -V à +V en milieu de période (à  $T/2$ ), et le 1 est codé par une transition de +V à -V



La composante continue est définitivement éliminée, au détriment d'un élargissement de la bande passante du signal du simple au double

**Code HDB Biplolaire Haute Densité** : C'est un code ternaire (à 3 niveaux de tension). Le 0 est codé 0V, les 1 sont codés +V et -V en alternance.

Il persiste juste un problème concernant les longues suites de 0. Pour cela on a introduit le code **HDBn** : un nombre  $n$  de 0 successifs est codé par une tension nulle, le  $(n+1)^{\text{ème}}$  0 est codé comme un 1 (+V ou -V) avec violation de la règle d'alternance.



## Densité spectrale de puissance

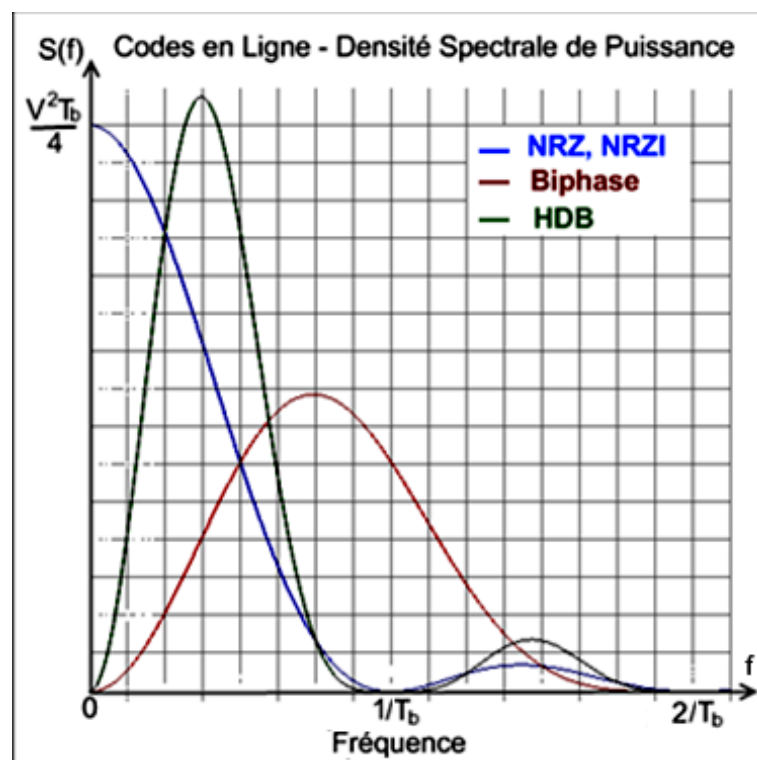
Les densités spectrales de puissance des signaux en bande de base peuvent être calculées. Sous l'hypothèse que les 0 et les 1 sont équiprobables dans le message source, elles sont égales aux expressions suivantes,

$$\text{Unipolaire} \quad S(f) = \frac{V^2 T_b}{4} \cdot \left[ \left( \frac{\sin(\pi f T_b)}{\pi f T_b} \right)^2 + \delta(f) \right] \quad (49)$$

$$\text{NRZ , NRZI} \quad S(f) = \frac{V^2 T_b}{4} \left( \frac{\sin(\pi f T_b)}{\pi f T_b} \right)^2 \quad (50)$$

$$\text{Biphase} \quad S(f) = \frac{V^2 T_b}{4} \cdot \frac{\sin^4\left(\pi f \frac{T_b}{2}\right)}{\left(\pi f \frac{T_b}{2}\right)^2} \quad (51)$$

$$\text{HDB} \quad S(f) = \frac{V^2 T_b}{4} \cdot \left( \frac{\sin(\pi f T_b)}{\pi f T_b} \right)^2 [1 - \cos(2\pi f T_b)] \quad (52)$$



La bande passante est délimitée par le premier zéro de  $S(f)$

La largeur de la bande de fréquence minimale requise pour le canal de transmission est égale à  $1/T_b$ ,  $T_b$  étant la durée du bit, pour les codes NRZ, NRZI, et HDB, afin que ces signaux puissent être régénérés à la réception. Pour le code biphase cette largeur de bande est  $2/T_b$ .

# Claude Elwood Shannon



ولد كلود شانون يوم 30 أبريل 1916 في جايلورد، ميشيغان. درس في جامعة ميشيغان حيث تبع درجة مزدوجة في الكهرباء والرياضيات. حصل على بشلور عام 1936 قبل مواصلة دراسته في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. وقدم عام 1940 أطروحة الدكتوراه حول تطبيقات الرياضيات في علم الوراثة وأطروحة ماستر في الكهرباء يصف فيها كيفية استخدام جبر بول لتحليل الإشارات الكهربائية.

في عام 1941 تم تعاقد بينه و بين شركة الهاتف AT&T، وكان يعمل في مشاريع مع المخابرات، والتي تؤدي به إلى معالجة قضايا التشفير.

نشر شانون "نظرية رياضية للاتصالات" في مجلة بيل التقنية (1948). أسست هذه الرسالة موضوع نظرية المعلومات، واقترحت نموذج خطي لنظام الاتصالات. وكانت هذه فكرة جديدة. كان الاعتقاد العام أن الاتصالات تتطلب موجات كهرومغناطيسية ليتم إرسالها في سلك. أن يمكن نقل صور وكلمات وأصوات وما إلى ذلك من خلال إرسال سيل من 1 و 0 في سلك، و الأمر يبدو طبيعي اليوم، كانت الفكرة ثورية تماما.

كتب ديفيد سلابيان : ربما لا يوجد عمل آخر في هذا القرن قد غير بشكل أعمق فهم البشرية للاتصال مثل عمل شانون "نظرية رياضية للاتصالات"، نشرت لأول مرة في عام 1948. والأفكار في رسالة شانون سرعان ما احتضنتها مهندسي الاتصالات وعلماء الرياضيات في جميع أنحاء العالم. ازدهر هذا الموضوع ونما ليصبح فصلا غنيا ومثيرا في تاريخ العلوم.

عمل شانون في مخابر بيل حتى عام 1971. و كان إلى جانب ذلك أستاذا في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا من 1958 حتى 1978.

كما أن لديه مساهمات في مجال الذكاء الاصطناعي. فقام بتصميم عدة آليات من البهلوان الآلي إلى الفأرة في المتاهة.

كان شانون ذا طابع لطيف للغاية، ومعروف بأنه غالبا ما كان يتجول في أروقة معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا على دراجة أحادية العجلة في حين يقوم بحركات بهلوانية.

في نهاية حياته كان يعاني من مرض ألزهايمر، وتوفي في 24 فبراير 2001

# **TRAVAUX DIRIGÉS**

**– ENONCÉS –**

## TD 1 – Rappels Algèbre Trigonométrique

**Exercice 1 :** Réduire à la forme la plus simple les expressions

- a)  $\cos(3\pi - x) + \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) + \sin\left(-\frac{3\pi}{2} - x\right)$
- b)  $(1 - \cos x)(1 + \cos x)$
- c)  $\cos^4(x) - \sin^4(x)$

**Exercice 2 :**

a) Représenter graphiquement les fonctions

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$$

$$\text{sinc}^2(x) = \left(\frac{\sin(\pi x)}{\pi x}\right)^2$$

pour  $-2 \leq x \leq 2$

b) Définir l'ensemble des points où l'égalité  $\text{sinc}(x) = \cos(\pi x)$  est vérifiée

c) Représenter graphiquement la fonction

$$f(x) = \text{sinc}(x) \left(\frac{\cos(\pi x)}{1 - 4x^2}\right)$$

pour  $-2 \leq x \leq 2$

Etudier la continuité de cette fonction pour  $x = \mp 0.5$

**Exercice 3 :**

a) Représenter graphiquement les fonctions

$$f(x) = \sin(x)$$

$$g(x) = \sin(1.5x)$$

$$h(x) = f(x) + g(x)$$

pour  $0 \leq x \leq 4\pi$

b) Est-ce que la fonction  $h(x)$  est périodique ? si oui quelle est sa période

c) Trouvez les racines de  $h(x)$

**Exercice 4 :** Mêmes questions pour les fonctions

$$f(x) = \sin(0.6x)$$

$$g(x) = \sin(1.5x) + \sin(2x)$$

$$h(x) = f(x) + g(x)$$

## TD 2 – Filtres Electriques

**Exercice 1 :** Déterminer le type de filtre, ordre, réponse en amplitude et fréquences de coupures, des quadripôles dont la fonction de transfert est

a) 
$$H(j\omega) = \frac{j\tau_1\omega}{(1-j\tau_1\omega)}$$

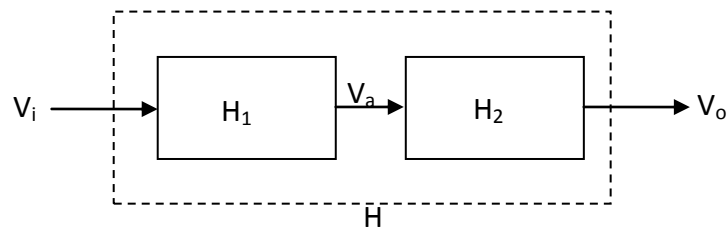
b) 
$$H(j\omega) = \frac{j\tau_2\omega}{(1-j\tau_2\omega)}$$

c) 
$$H(j\omega) = \frac{(1-j\tau_2\omega)}{(1-j\tau_1\omega)}$$

d) 
$$H(j\omega) = \frac{1}{(1-j\tau_1\omega)(1-j\tau_2\omega)}$$

avec  $\tau_1 = 1$        $\tau_2 = 0.1$  [secondes]

**Exercice 2 :** Deux filtres ayant pour fonction de transfert  $H_1(j\omega)$  et  $H_2(j\omega)$  respectivement sont connectés en cascade selon le schéma suivant :

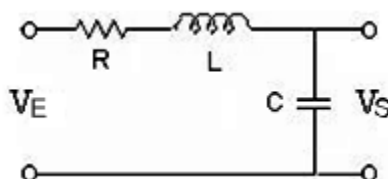


- Quelle est la fonction de transfert  $H(j\omega)$  de l'ensemble formé par la mise en cascade de ces deux filtres ? (indication :  $V_o/V_i = (V_o/V_a) \cdot (V_a/V_i)$ )
- En déduire une règle générale donnant la fonction de transfert  $H$  du filtre équivalent à la mise en cascade de **N** filtres, ayant chacun la fonction de transfert  $H_i(j\omega)$

On suppose  $H_1(j\omega) = \frac{1}{1-j\tau_1\omega}$        $H_2(j\omega) = \frac{j\tau_2\omega}{1-j\tau_2\omega}$        $\tau_1 = 0.1 \text{ sec}$      $\tau_2 = 1 \text{ sec}$

- Quel est l'ordre du filtre équivalent  $H$  ? Tracer sa réponse en amplitude sur un diagramme Doublement Logarithmique, pour  $0.1 \leq \omega \leq 100$ . Mettez en évidence les pulsations de coupure à -3 dB

**Exercice 3 :** Evaluer  $R$ ,  $L$ ,  $C$  représentés sur le circuit suivant pour avoir une fréquence de coupure à -3dB  $f_c = 4 \text{ kHz}$

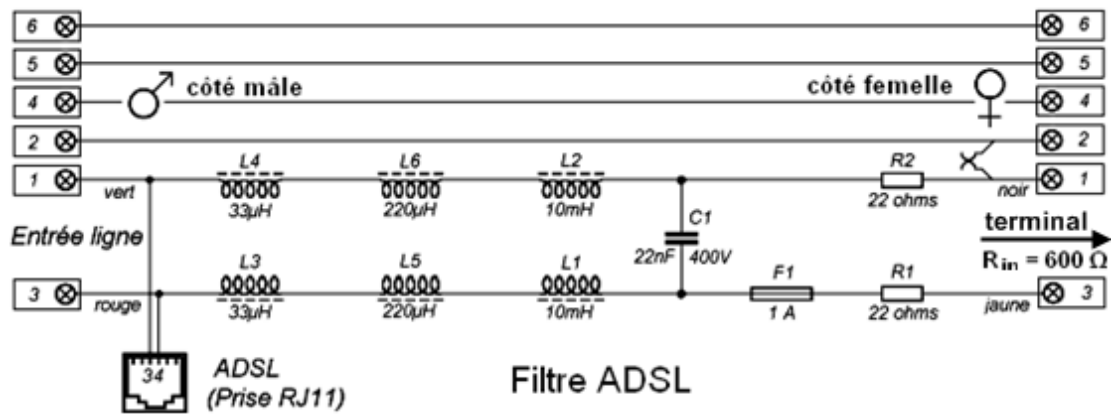


#### Exercice 4 : Devoir

Une liaison ADSL transporte simultanément un signal vocal dont la bande spectrale varie de 0 à 4 kHz, et un signal de données numériques de bande utile allant de 25kHz à 1MHz, comme représenté sur ce graphique :



Un filtre conçu selon le schéma ci-dessous permet de séparer les deux signaux au niveau du domicile de l'abonné tel que le signal vocal soit dirigé vers le terminal téléphone fixe, et le signal numérique soit orienté vers le modem internet.



- Essayez de comprendre et d'analyser ce schéma, quel est le type et l'ordre de ce filtre.
- Etablir la fonction de transfert. Tracer la réponse en amplitude sur un diagramme bi-logarithmique pour  $f$  allant de **100Hz à 100 kHz**, calculer la fréquence  $f_c$  de coupure à -3dB
- Expliquer le choix de la valeur des composants utilisés



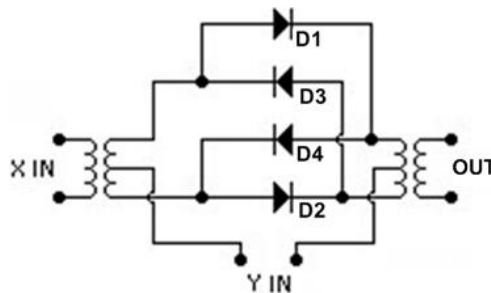
## TD 3 – Modulation Analogique

### Exercice 1 :

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

### Exercice 2 :

On considère le circuit suivant



On suppose que les diodes sont idéales.

Le signal d'entrée  $X_{IN}$  est un signal de forme quelconque

Le signal d'entrée  $Y_{IN}$  est un signal carré dont la fréquence est très grande par rapport à la fréquence la plus élevée présente dans le signal  $X_{IN}$

Expliquer la forme du signal OUT, et en déduire la fonction de ce circuit

### Exercice 3 :

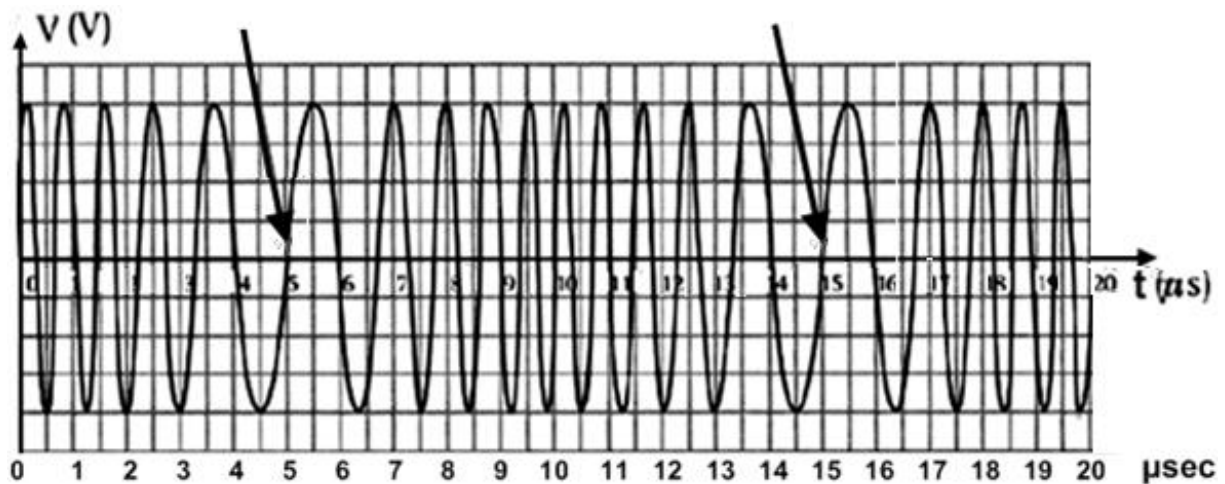
On désire moduler un signal vocal dont la bande passante varie de 100Hz à 3400 Hz par une sinusoïde de fréquence 250 kHz en SSB à porteuse supprimée.

Reprendre le schéma de principe du modulateur vu en cours

En utilisant la bande latérale supérieure, dimensionner le filtre passe-bande du modulateur

#### Exercice 4 :

La figure suivante représente un signal FM modulé par une tonalité (sinusoïde pure)



Essayer de trouver graphiquement la fréquence de la porteuse, ainsi que la fréquence de la sinusoïde modulante

#### Exercice 5 :

Une porteuse 10 MHz est modulée en fréquence par une tonalité de fréquence 8 kHz (sinusoïde pure). La déviation de fréquence  $\Delta f$  du modulateur est de 32 kHz. Calculer la bande passante du signal FM résultant

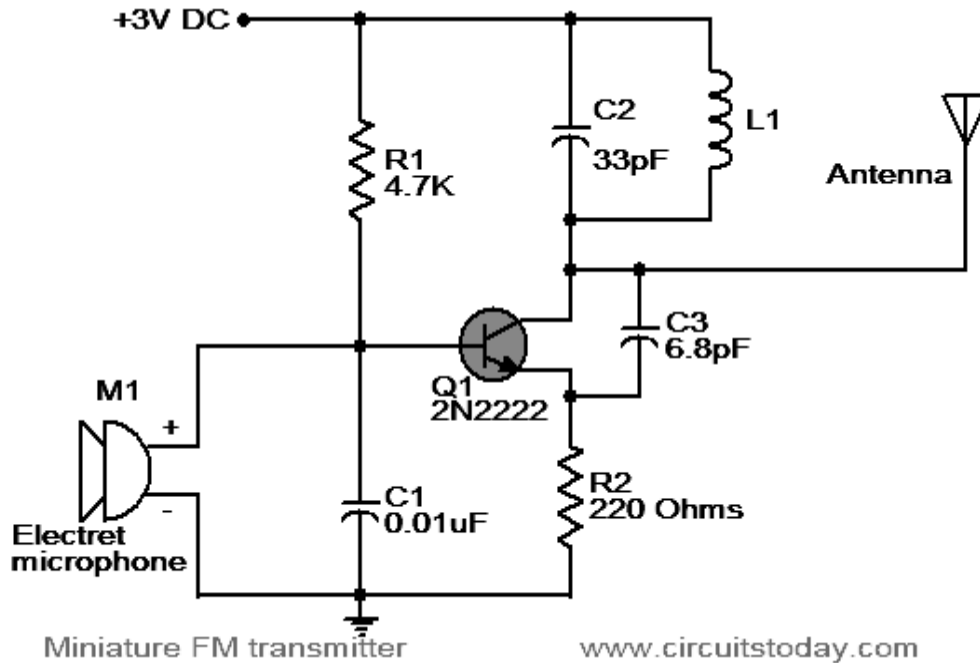
#### Exercice 6 :

Un signal audio de bande de base allant de 200 Hz à 4 kHz, module en fréquence une porteuse de fréquence 50 MHz. La pente fréquence-tension du modulateur FM est de 10 kHz/V, et la tension maximale du signal audio est limitée à 3V.

- Calculer la déviation de fréquence  $\Delta f$
- En appliquant la règle de Carson donner la bande de fréquence nécessaire pour transmettre le signal modulé sans perte d'information

### Exercice 7 :

Le circuit électronique ci-dessous est un émetteur FM qui peut émettre des signaux jusqu'à 50 mètres.



Le transistor  $Q_1$  sert en même temps de modulateur et d'oscillateur.

Le condensateur C2 et l'inductance L1 constituent le circuit oscillant qui n'est pas très performant mais qui a le mérite de la simplicité.

Le signal vocal à transmettre est produit par un microphone couplé à la base du transistor  $Q_1$ .

Le signal FM est disponible sur le collecteur de  $Q_1$  et il est rayonné à l'aide d'une antenne, constituée d'un simple fil de cuivre de 20 cm de longueur

Analyser ce circuit, et essayer de le comprendre

Comment l'oscillation est-elle entretenue

Quelle est la fréquence de la porteuse si  $L1 = 78 \text{ nH}$ .

## TD 4 – Télécommunications Numériques

### Exercice 1 :

Un signal source analogique dont la bande de fréquence varie de 200Hz à 4kHz est codé en PCM. Quelle est la fréquence d'échantillonnage minimale (fréquence de Nyquist) pour pouvoir reconstruire ce signal à la réception ?

En déduire la période  $T$  séparant deux impulsions successives pour cette fréquence

Le signal source varie entre les deux valeurs de crête  $-1V$  et  $+1V$ , et les impulsions échantillonnées sont codées sur 8 bits en complément à deux.

- Calculer le pas de quantification  $\Delta$
- Quelle est la durée de chaque bit à la fréquence de Nyquist? En déduire le débit binaire du signal numérique transmis

### Exercice 2 :

- Concevoir le schéma synoptique d'un codeur PCM, utiliser les données numériques calculées dans l'exercice précédent
- Même question pour un récepteur PCM

### Exercice 3 :

Soit la séquence binaire 011001111011. Représenter graphiquement son code en ligne pour les signaux suivants

- Code unipolaire (TTL)
- Code NRZ
- Code biphasé
- HDB3

Quels sont parmi ces signaux ceux qui inversent l'information au niveau du récepteur si les deux fils de la ligne de transmission sont inversés ?

**TRAVAUX DIRIGÉS**  
**– SOLUTIONS –**

## Solution des exercices TD 1

### Exercice 1 :

a)  $\cos(3\pi - x) = \cos(2\pi + \pi - x) = \cos(\pi - x) = -\cos(x)$

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = -\sin(x)$$

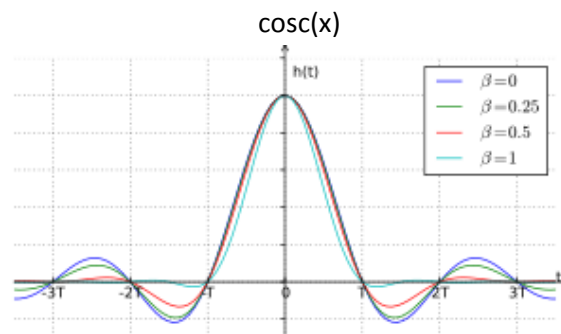
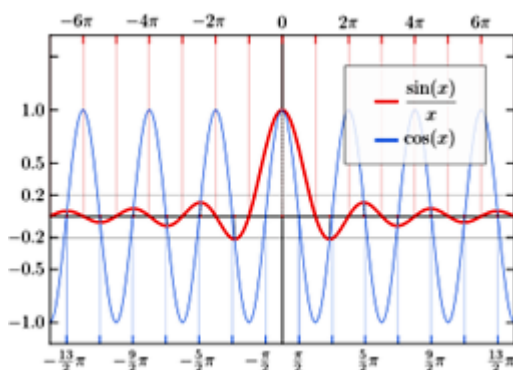
$$\sin\left(-\frac{3\pi}{2} - x\right) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \left(-\frac{3\pi}{2} - x\right)\right) = \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3\pi}{2} + x\right) = \cos(2\pi + x) = \cos(x)$$

Additionnons ces 3 termes  $\cos(3\pi - x) + \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) + \sin\left(-\frac{3\pi}{2} - x\right) = -\sin(x)$

b)  $(1 - \cos x)(1 + \cos x) = 1 - \cos^2(x) = \sin^2(x)$

c)  $\cos^4(x) - \sin^4(x) = (\cos^2(x))^2 - (\sin^2(x))^2$   
 $= (\cos^2(x) + \sin^2(x))(\cos^2(x) - \sin^2(x)) = \cos^2(x) - \sin^2(x)$   
 $= \cos(x)\cos(x) - \sin(x)\sin(x) = \cos(x+x) = \cos(2x)$

### Exercice 2 :



b) ce sont les maxima de  $\text{sinc}(x)$ , c.à.d. les points où  $\text{sinc}'(x) = \frac{(\pi \cos(\pi x))\pi x - \pi \sin(\pi x)}{(\pi x)^2} = 0$

$$(\pi \cos(\pi x))\pi x - \pi \sin(\pi x) = 0 \rightarrow \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} = \cos(\pi x)$$

c) pour  $x = \mp 0.5$  on a  $\cos\left(\mp \frac{\pi}{2}\right) = 0$  et  $1 - 4x^2 = 0$ , c'est une indétermination  $\frac{0}{0}$

dont la valeur limite s'obtient par la règle de l'Hôpital :

la dérivée du numérateur  $\cos(\pi x)$  est égale à  $-\pi \sin(\pi x) = -\pi \sin\left(\mp \frac{\pi}{2}\right) = \mp \pi$

la dérivée du dénominateur est égale à  $-8x = \mp 4$

la fonction  $f(x)$ , qui est très utilisée en télécommunication, appelée parfois **cosinus cardinal**, est continue aux points  $|x| = 0.5$ , et elle a pour valeur  $f(x) = 0.5$

### Exercice 3

On peut tracer la courbe de  $h(x)$  point par point, mais il est important pour la suite du module de ramener  $h(x)$  à un produit de sinusôides :

$$\begin{aligned}h(x) &= \sin(x) + \sin(1.5x) = \sin(x) + \sin\left(x + \frac{x}{2}\right) \\&= \sin(x) + \sin(x) \cos\left(\frac{x}{2}\right) + \cos(x) \sin\left(\frac{x}{2}\right) = \sin(x) + 2\sin\left(\frac{x}{2}\right) \cos^2\left(\frac{x}{2}\right) + \cos(x) \sin\left(\frac{x}{2}\right) \\&= \sin(x) + \sin\left(\frac{x}{2}\right) (\cos(x) + 1) + \cos(x) \sin\left(\frac{x}{2}\right) = \sin(x) + \sin\left(\frac{x}{2}\right) (2\cos(x) + 1) \\&= 2\sin\left(\frac{x}{2}\right) \cos\left(\frac{x}{2}\right) + \sin\left(\frac{x}{2}\right) (2\cos(x) + 1) = \sin\left(\frac{x}{2}\right) \left(2\cos\left(\frac{x}{2}\right) + 2\cos(x) + 1\right)\end{aligned}$$

La fonction  $h(x)$  est **impaire** (antisymétrique), **périodique** de période  $x = 4\pi$  qui correspond à la plus petite fréquence apparaissant dans l'expression de  $h(x)$

Valeurs extrêmes :  $h(x) = \pm 1.90595$

Racines :  $x = 2k\pi; 4k\pi - \frac{8\pi}{5}; 4k\pi - \frac{4\pi}{5}; 4k\pi + \frac{4\pi}{5}; k \in \mathbb{Z}$

### Exercice 4

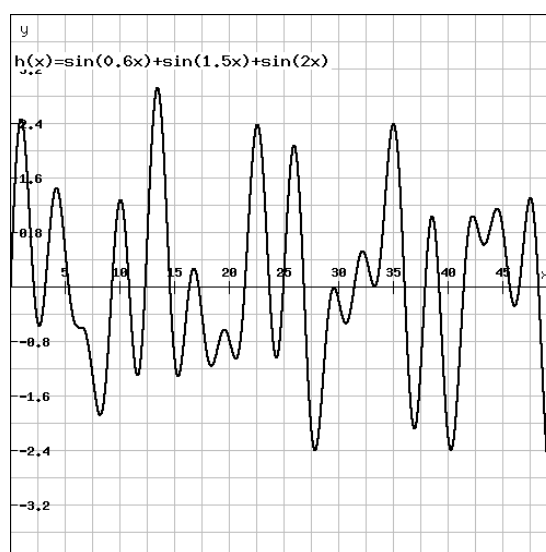
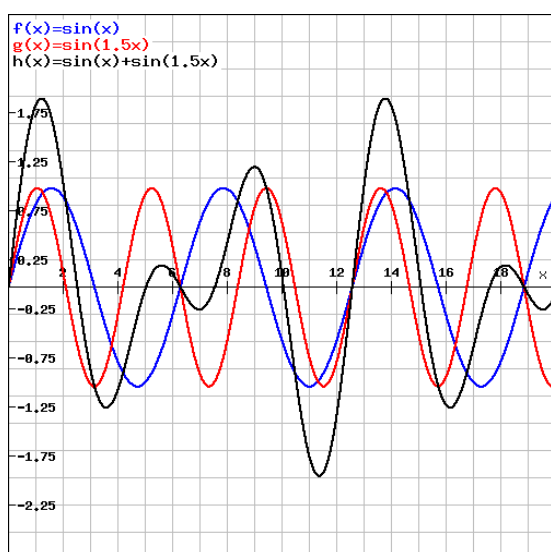
sans faire les détails, la forme produit de sinusôides de  $h(x)$  est

$$\begin{aligned}h(x) &= 2\sin\left(\frac{x}{10}\right) \left(2\cos\left(\frac{x}{10}\right) + \cos\left(\frac{x}{5}\right) + 2\cos\left(\frac{3x}{10}\right) + \cos\left(\frac{2x}{5}\right) + 2\cos\left(\frac{x}{2}\right) + \cos\left(\frac{3x}{5}\right)\right. \\&\quad \left.+ \cos\left(\frac{7x}{10}\right) + \cos\left(\frac{4x}{5}\right) + \cos\left(\frac{9x}{10}\right) + \cos(x) + \cos\left(\frac{11x}{10}\right) + \cos\left(\frac{6x}{5}\right)\right. \\&\quad \left.+ \cos\left(\frac{13x}{10}\right) + \cos\left(\frac{7x}{5}\right) + \cos\left(\frac{3x}{2}\right) + \cos\left(\frac{17x}{10}\right) + \cos\left(\frac{19x}{10}\right) + \frac{1}{2}\right)\end{aligned}$$

La fonction  $h(x)$  est **impaire** (antisymétrique), **périodique** de période  $x = 20\pi$

Valeurs extrêmes :  $h(x) = \pm 2.92942$

Racines :  $x = 2k\pi; 4k\pi - \frac{8\pi}{5}; 4k\pi - \frac{4\pi}{5}; 4k\pi + \frac{4\pi}{5}; k \in \mathbb{Z}$



## Solution des exercices TD 2

### Exercice 1 :

a)  $|H(j\omega)| = \frac{\tau_1 \omega}{\sqrt{1+(\tau_1 \omega)^2}}$

Passe haut du premier ordre à constante de temps élevée,  $\omega_c = 1$  rd/s

b)  $|H(j\omega)| = \frac{\tau_2 \omega}{\sqrt{1+(\tau_2 \omega)^2}}$

Passe haut du premier ordre à faible constante de temps  $\omega_c = 10$  rd/s

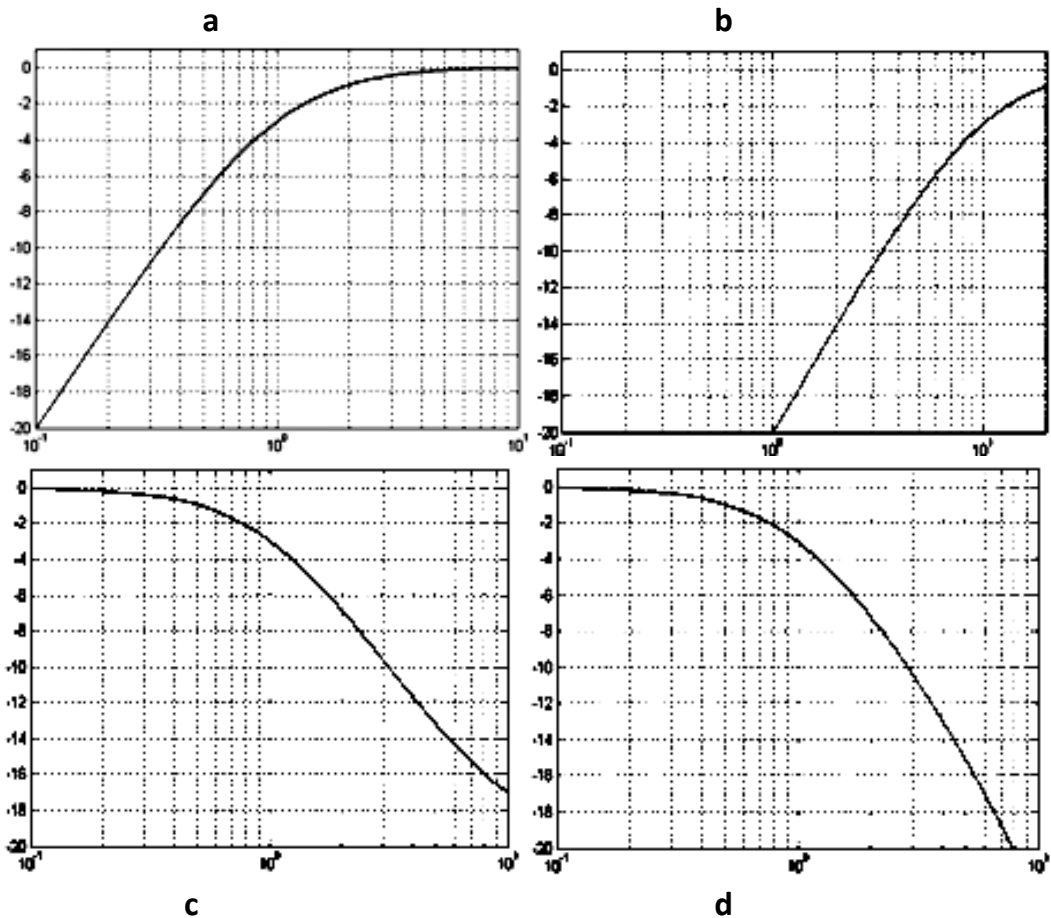
c)  $|H(j\omega)| = \frac{\sqrt{1+(\tau_2 \omega)^2}}{\sqrt{1+(\tau_1 \omega)^2}}$

Passe bas premier ordre  $\omega_c = 1$  rd/s

d)  $|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+(\tau_1^2 + \tau_2^2)\omega^2 + \tau_1^2 \tau_2^2 \omega^4}}$

Butterworth passe bas 2<sup>ème</sup> ordre,  $\omega_c = 0.99$  rd/s

Les réponses en amplitude sont tracées en échelle log  $20\log_{10}|H(\omega)|$



## Exercice 2 :

a)  $H = H_1 * H_2$

b)  $H = H_1 * H_2 * H_3 * \dots * H_N$  produit des fonctions de transferts

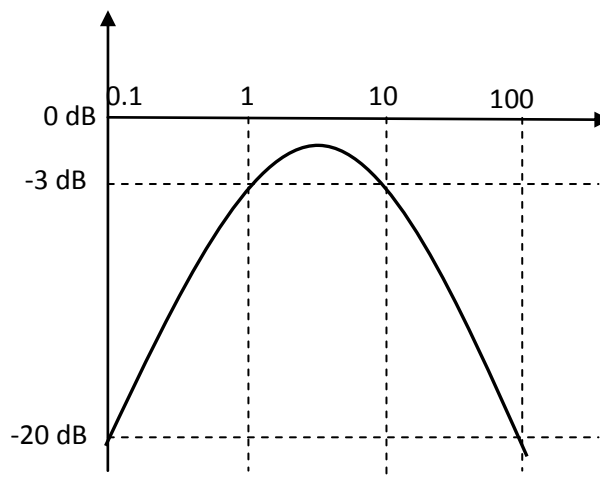
$$H(j\omega) = \frac{j\tau_2\omega}{(1-j\tau_1\omega)(1-j\tau_2\omega)} \quad |H(j\omega)| = \frac{\tau_2\omega}{\sqrt{(1+(\tau_1\omega)^2)(1+(\tau_2\omega)^2)}}$$

c) C'est un filtre d'ordre 2

avec  $\tau_1 = 0.1$  et  $\tau_2 = 1$   $|H(j\omega)| = \frac{\omega}{\sqrt{(1+0.01\omega^2)(1+\omega^2)}}$

pulsations de coupures à -3 dB :  $\omega_L \approx 1/\tau_2 = 1$  rd/s  $\omega_H \approx 1/\tau_1 = 10$  rd/s

pulsation centrale  $\omega_c = \sqrt{\omega_L \omega_H} = 3.1618$  rd/s  $\rightarrow 20\log|H(j\omega)| = -0,827854$



## Exercice 3 :

C'est un filtre passe bas. En appliquant la règle de division de tension

$$H(j\omega) = \frac{V_S(j\omega)}{V_E(j\omega)} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C + j\omega L} = \frac{1}{-\omega^2 CL + j\omega CR + 1}$$

Pour avoir la fréquence de coupure à -3dB, il faut résoudre l'équation du second ordre

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - CL\omega^2)^2 + (CR\omega)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Qui est inutilement compliquée à résoudre.

On va utiliser l'astuce suivante :

Pour un filtre passe bande du deuxième ordre, nous avons vu la relation pour la pulsation centrale  $\omega_c = \sqrt{\omega_H \omega_L}$

Rappelons que  $\omega_c$  est la pulsation où la réponse en amplitude atteint sa valeur maximum.

L'équivalent pour un filtre passe bas de cette relation est  $\omega_c = \omega_0$

où  $\omega_0$  est la pulsation naturelle de résonance du circuit RLC série donnée par

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

qui avec les données de l'exercice correspond à  $2\pi \cdot 4000 \text{ Hz} = 25132.74123 \text{ rd/s}$

L'explication physique de cette égalité est la suivante : à la pulsation de résonance du circuit LC série, l'énergie électrique aux bornes de la capacité est égale à l'énergie aux bornes de l'inductance. Donc l'énergie aux bornes de C est égale à l'énergie aux bornes de la mise en série de C et L divisée par 2.

Etant donné que la tension est proportionnelle à la racine carrée de l'énergie, la tension aux bornes de C est alors égale à la tension aux bornes de la mise en série de C et L divisée par  $\sqrt{2}$ , et c'est la définition même du gain à la fréquence de coupure.

La résistance R dont l'impédance ne dépend pas de la fréquence n'influe pas sur ce phénomène.

Toute paire de valeurs L, C qui peut réaliser cette pulsation de coupure est une solution.

Une solution avec des composants commerciaux est

$$\mathbf{R = 22 \, \Omega}$$

$$\mathbf{C = 330 \mu F}$$

$$\mathbf{L = 4.7 \mu H}$$

Qui correspond à  $\omega_c = 25391.8358 \text{ rd/s}$  soit  $f_c = 4041 \text{ Hz}$

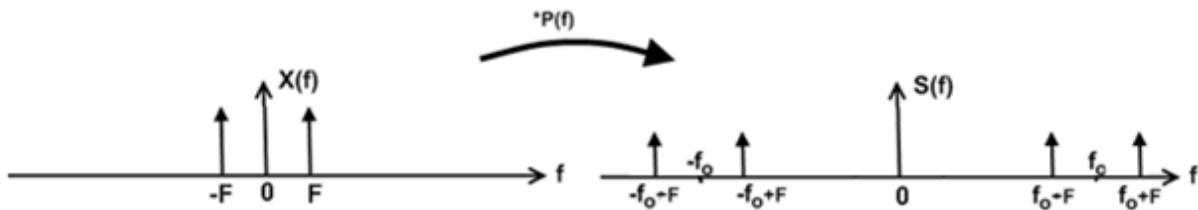
Si vous n'êtes pas convaincu de la démarche, essayer de résoudre l'équation du second ordre  $\sqrt{(1 - CL\omega^2)^2 + (CR\omega)^2} = \sqrt{2}$  en utilisant les valeurs trouvées pour R,L,C, vous trouverez exactement le même résultat pour  $\omega_c$

## Solution des exercices TD 3

### Exercice 1 :

On a  $s(t) = A_0 x(t) \cos(2\pi f_0 t) = A_0 \cos(2\pi F t) \cos(2\pi f_0 t)$

$$= \frac{A_0}{2} [\cos(2\pi(f_0 - F)t) + \cos(2\pi(f_0 + F)t)]$$



### Exercice 2 :

Tout d'abord, faites attention à la ressemblance de ce circuit avec le pont redresseur, ici les diodes ne sont pas face à face mais sont toutes dans le même sens. D'où le nom du dispositif : **modulateur d'amplitude en anneau**

#### **Mode opératoire :**

Durant l'alternance positive de  $Y_{IN}$  : D1 et D2 conduisent, D3 et D4 sont bloquées. La sortie du circuit est égale au signal  $X_{IN}$

Alternance négative de  $Y_{IN}$  : D3 et D4 conduisent, D1 et D2 sont bloquées. La sortie du circuit est égale au signal  $X_{IN}$  inversé ( $-X_{IN}$ )

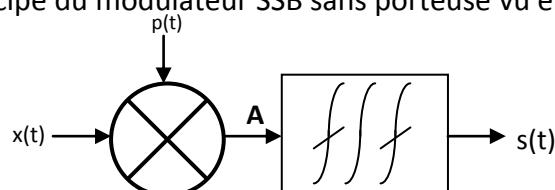
Le signal modulant  $X_{IN}$  est inversé à la fréquence du signal  $Y_{IN}$ , qui peut être assimilé à la porteuse.

Ceci est équivalent à une multiplication de  $X_{IN}$  par  $Y_{IN}$

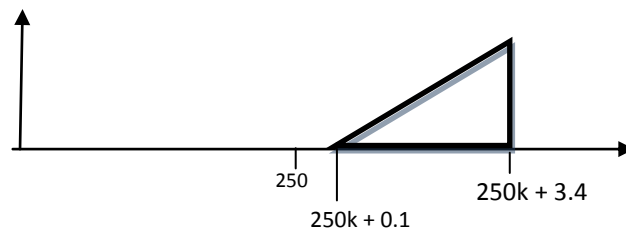
De plus les transformateurs ne font pas passer  $Y_{IN}$  en sortie. Il s'agit d'une modulation d'amplitude à double bande latérale à porteuse supprimée

### Exercice 3 :

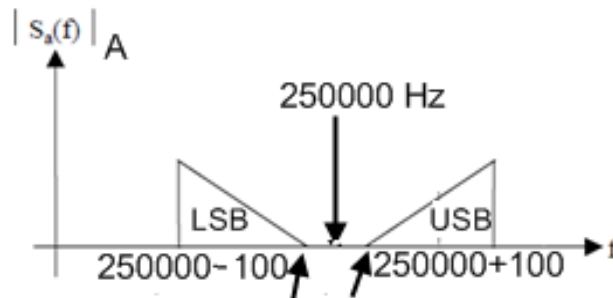
Le schéma de principe du modulateur SSB sans porteuse vu en cours est



Le spectre du signal modulé  $s(t)$  doit être de la forme

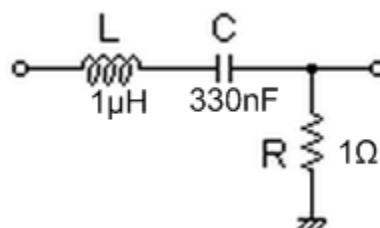


Avec les chiffres de l'énoncé, le spectre au point A est

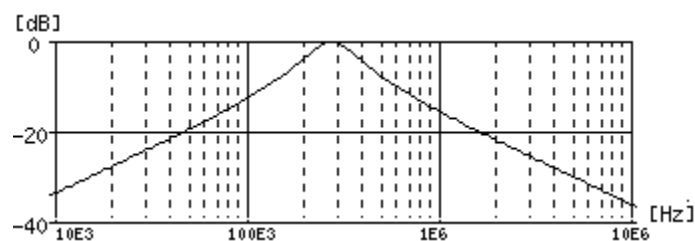


Le filtre doit faire passer uniquement la bande latérale supérieure (USB), c'est-à-dire éviter la bande LSB. Sur le dessin, jusqu'à 200 hertz de séparation entre la limite inférieure de la USB et la limite supérieure de la LSB, on ne prend pas la LSB, mais en pratique le signal existe en dessous de  $-3\text{dB}$ . Le même problème se pose pour une séparation de  $0\text{Hz}$  où il s'agit de tout faire passer pour la USB.

Sachant que  $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  et que  $f_c = \sqrt{f_L f_H}$  on suggère d'utiliser un filtre passe bande avec réalisé au moyen du circuit RLC série suivant



$$f_c = 251800 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad f_{L,H} = 251800 \pm 1750 \text{ Hz}$$



#### Exercice 4 :

Comme nous l'avons constaté à la fin du **TD1**, la période d'une sinusoïde composite est donnée par sa composante de plus petite fréquence, qui est dans le cas présent le signal modulant.

Il est plus facile d'observer la répétition du cycle aux passages par 0 les plus larges, indiqué par les flèches en **t= 5 μs** suivi de **t=15 μs**, correspondant à une période **15-5=10μs**

La fréquence du signal modulant est donc de **100 kHz**

Pour la porteuse il faut compter le nombre de cycles qu'il y a à l'intérieur de ces 10μs, c'est à dire entre les deux points indiqués par les flèches : il y a 10 cycles, la fréquence de la porteuse est donc **f<sub>0</sub> = 10 \* F = 1 MHz**

#### Exercice 5 :

Utiliser la règle de Carson avec **F<sub>M</sub>**= la fréquence de la tonalité

$$BW=2(f+F_M) = 2(32+8) = 80 \text{ kHz}$$

#### Exercice 6 :

$$\Delta f = 10 \text{ kHz/V} * 3V = 30 \text{ kHz}$$

$$BW= 2(30+4)= 68 \text{ kHz}$$

#### Exercice 7 :

L1 et C2 fixent la fréquence de la porteuse, qui est la fréquence d'oscillation naturelle de l'oscillateur à boucle de réaction positive

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_2}} = 99.2 \text{ MHz}$$

Le signal généré par le microphone est couplé par la capacité C3 à la tension du collecteur du transistor, et introduit une perturbation de la fréquence d'oscillation qui est assimilable à une modulation en fréquence

Si vous n'avez toujours pas compris le fonctionnement de ce circuit, tester le avec PSPICE

Si vous êtes tenté de le réaliser, faites attention que vous risquer de faire tomber un avion si vous n'avez pas une maîtrise totale de la valeur des composants

## Solution des exercices TD 4

### Exercice 1 :

Fréquence de Nyquist  $f = 2 \cdot 4 \text{ kHz} = 8 \text{ kHz}$

$$T = 1 / f = 125 \mu\text{s}$$

Entre -1V et +1V l'intervalle est de 2 V, et avec 8 bits en complément à 2 on peut coder  $2^8 = 256$  valeurs discrètes, soit (256-1) intervalles. Le pas de quantification est égal à

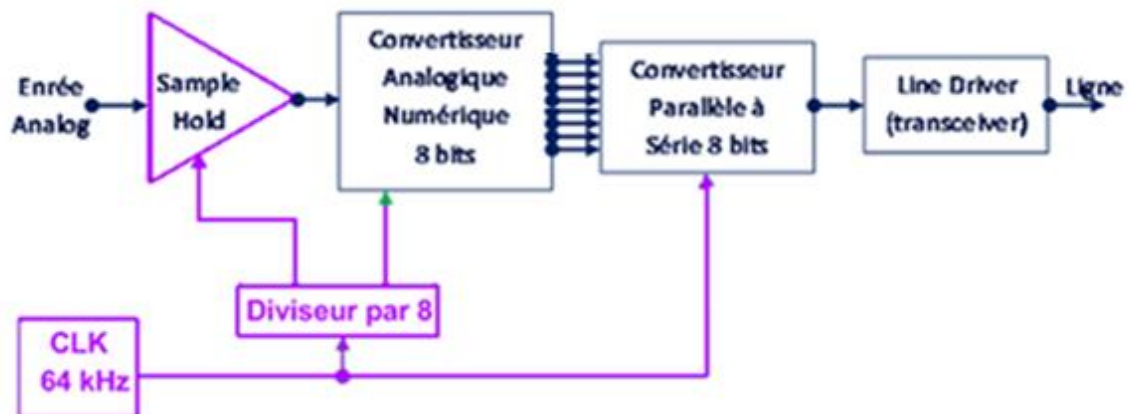
$$\Delta = 2/255 = 7.8431 \text{ mV}$$

$$\text{Durée du bit} = T/8 = 125/8 = 15.625 \mu\text{s}$$

$$\text{Débit binaire} = 64\,000 \text{ bps} = 64 \text{ kbs}$$

### Exercice 2 :

**Emetteur :**



Utiliser par exemple les circuits commerciaux :

CLK : NE555

S/H : LF198

CAN : ADC804

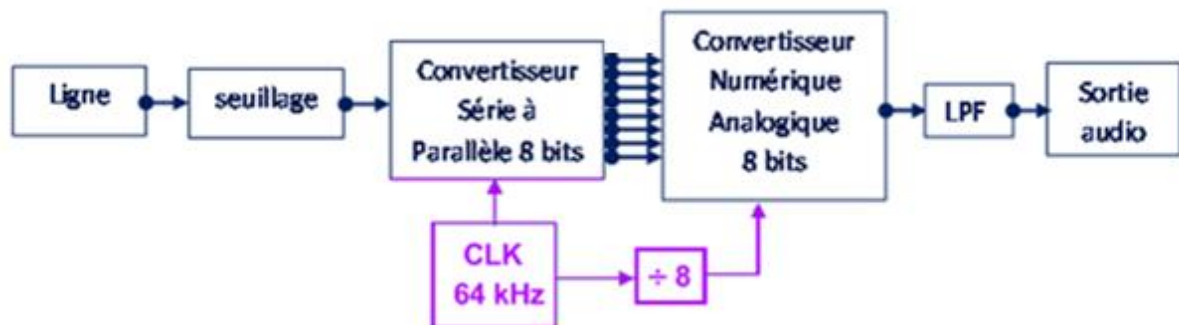
P/S : 74LS165

Div÷8 : 4066

Line Driver : MAX232

Dans ce cas le ADC804 effectue les deux fonctions d'échantillonnage et la conversion analogique digitale

**Récepteur :**



Circuit de seuillage : 74HC7014 trigger de Schmidt

S/P : 74LS322 serial/parallel register

CNA : DAC0800

### **Exercice 3 :**

Parmi ces 4 signaux, seul le code HDB3 est indifférent au sens de branchement des deux fils de la ligne bifilaire à la réception

# Documents de Référence

- Anton A. Huurdeman, *The Worldwide History of Telecommunications*, Wiley 2003
- *Cahiers du Centenaire de l'Algérie*, Publications du Comité National Métropolitain du Centenaire de l'Algérie, Alger, 1930
- Kerry Lacanette, *A Basic Introduction to Filters : Active, Passive, and Switched-Capacitor*, National Semiconductor Application Note 779, April 1991
- Pierre Gérard Fontollet, *Systèmes de Télécommunications*, Traité d'Electricité, Vol. XVIII, Presses Polytechniques Universitaires Romandes, Lausanne, 1999
- Christophe More, *Transmission de signaux: cours et exercices d'électronique*, Tec & Doc Lavoisier, 1995
- Tucker, D.G., "*The early history of amplitude modulation, sidebands and frequency-division-multiplex*," *Radio and Electronic Engineer* , vol.41, no.1, pp.43,47, January 1971
- Carson, John R., "*Notes on the Theory of Modulation*," *Radio Engineers, Proceedings of the Institute of* , vol.10, no.1, pp.57,64, Feb. 1922

## Sources internet des photos utilisées dans ce cours

Page 6 - <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31655956>

Page 8 - <http://www.antiquetelephonehistory.com/centennial.html>

Page 9 - <http://www.leradiofil.com/FortdelEau.htm>

Page 17 - <http://www.networkcablinglosangeles.com/unshielded-twisted-pair-cable/>

Page 18 - [http://www.cnipe.nat.tn/fo/fr/global\\_forum.php?menu1=15&page=51&id=20&rang=2](http://www.cnipe.nat.tn/fo/fr/global_forum.php?menu1=15&page=51&id=20&rang=2)

Page 19 - [http://fr.123rf.com/photo\\_8293968\\_rendu-3d-d-un-cable-de-fibre-optique-sur-un-fond-blanc.html](http://fr.123rf.com/photo_8293968_rendu-3d-d-un-cable-de-fibre-optique-sur-un-fond-blanc.html)

Page 20 - [http://www.millitech.com/images/SitelImages/mmwproducts/POL\\_sm.png](http://www.millitech.com/images/SitelImages/mmwproducts/POL_sm.png)