



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Université Mohamed Seddik BenYahia de Jijel



**Socle commun**  
**Sciences et Technologies**  
**4<sup>ème</sup> semestre**

Filière :  
Télécommunication

**Département d'électronique**  
**Enseignant : Dr Sofiane Haddad**

UEF 2.2.1

TÉLÉCOMMUNICATIONS FONDAMENTALES



Année universitaire 2017/2018

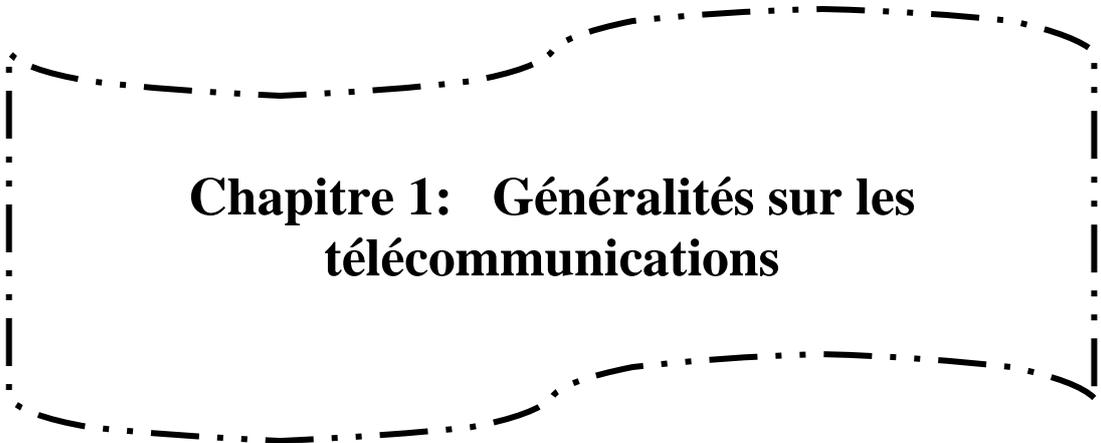
# Sommaire

<b>Chapitre 1: Généralités sur les télécommunications.....</b>	<b>1</b>
1.1 Définitions des télécommunications.....	1
1.2 Concepts élémentaires : signal, message, information.....	1
1.3 Télécommunications analogiques.....	4
1.4 Télécommunications numériques.....	4
1.5 Schéma général d'un système de télécommunication.....	5
1.6 Historique et évolution des télécommunications.....	6
<i>Les Grecs, l'Empire romain et les Gaulois.....</i>	<i>6</i>
<i>La télégraphie.....</i>	<i>7</i>
<i>La radio.....</i>	<i>7</i>
<i>Le Téléx.....</i>	<i>8</i>
<i>Le téléphone classique.....</i>	<i>8</i>
<i>Le téléphone mobile.....</i>	<i>9</i>
<i>La télévision.....</i>	<i>10</i>
<i>L'informatique et Internet.....</i>	<i>10</i>
<i>Chronologie des télécommunications au 20ème siècle.....</i>	<i>11</i>
1.7 Normes et standards de télécommunications.....	12
Institutions de normalisation.....	13
Norme et Protocole (Définitions).....	15
<b>Chapitre 2 : Systèmes de communication.....</b>	<b>16</b>
2.1 Introduction.....	17
2.2 Synoptique général d'un système de télécommunications.....	17
2.3 Signaux de source en télécommunications.....	18
2.3.1 Signal vocal ou musical.....	19
2.3.2 Vidéo.....	19
2.3.3 Signaux numériques.....	19

2.3.4 Texte.....	20
2.4 Supports de transmission.....	20
2.4.1 Paires torsadées.....	20
2.4.2 Câbles coaxiaux.....	21
2.4.3 Fibre optique.....	22
2.4.4 Transmissions sans fil.....	23
Faisceaux hertziens.....	23
Ondes radioélectriques.....	23
<b>Chapitre 3: Techniques de transmission analogiques.....</b>	<b>24</b>
3.1 Classification des signaux.....	25
3.1.1 Selon leurs origines.....	25
3.1.2 Selon leurs dimensions.....	25
3.1.3 Selon leurs morphologies.....	25
3.2 Signaux élémentaires.....	25
Echelon Heaviside (ou échelon unité).....	25
Rampe Unitaire.....	26
Fonction signe.....	26
Fenêtre rectangulaire ou fonction porte.....	26
Fenêtre triangulaire (fonction Bartlett).....	26
La distribution ou impulsion de Dirac.....	27
Peigne de Dirac.....	27
Fonction sinus cardinal.....	28
3.3 Principe de la transmission analogique.....	28
3.3.1 Définitions.....	30
Caractéristique d'un signal sinusoïdal.....	30
Mélangeur.....	30
Principe du récepteur superhétérodyne.....	31
Amplificateur.....	31
Fréquence image.....	31
Filtres sélectifs.....	31
Coût d'un filtre.....	32
Filtre céramique.....	32

3.3.2 Modulation d'amplitude.....	32
Bande occupée.....	33
Occupation spectrale par une modulation d'amplitude.....	33
Puissance émise.....	33
Puissance normalisée.....	34
Formule de Dirichlet Parseval.....	34
3.3.3 Différentes modulations d'amplitudes.....	34
Modulation d'amplitude sans porteuse.....	35
Modulation d'amplitude à bande latérale unique (BLU).....	35
3.3.4 Démodulation d'amplitude.....	35
Démodulation incohérente (ou non cohérente).....	35
Enveloppe d'un signal.....	35
Détection d'enveloppe.....	36
Application.....	36
Détermination du détecteur d'enveloppe.....	36
Démodulation cohérente ou synchrone.....	37
Détection cohérente.....	37
Application.....	37
Démodulation d'amplitude d'un signal modulé à porteuse supprimée.....	37
Démodulation d'amplitude d'un signal modulé BLU.....	38
3.4 Filtres électriques.....	38
Comparaison filtre actif – filtre passif.....	39
<b>Chapitre 4: Techniques de transmission numérique.....</b>	<b>40</b>
4.1 Introduction.....	41
4.2 Définitions et appellations.....	42
4.3 La numérisation.....	44
4.3.1 L'échantillonnage.....	45
4.3.2 La quantification.....	46
4.3.3 Le codage.....	46
4.3.3.1 Le codage NRZ bipolaire.....	47
4.3.3.2 NRZI.....	47
4.3.3.3 Manchester.....	48
4.3.3.4 Manchester Différentiel.....	48

4.3.3.5 Le codage de Miller.....	48
4.4 Canal de transmission.....	49
4.5 Modulation numérique de porteuse.....	49
4.5.1 Modulation en fréquence (FSK : Frequency Shift Keying).....	49
4.5.2 Modulation par tout ou rien (OOK : Frequency Shift Keying).....	52
TRAVAUX DIRIGÉS.....	56
Références.....	64



# **Chapitre 1: Généralités sur les télécommunications**

## 1. Généralités et définitions sur les télécommunications

### 1.1 Définitions des télécommunications

Les télécommunications sont aujourd'hui définies comme la transmission à distance d'informations avec des moyens électroniques. Les télécommunications se distinguent ainsi de la poste qui transmet des informations ou des objets sous forme physique.

Le mot « télécommunication » vient du préfixe grec « tele » signifiant « loin » et du latin « communicare » qui signifie « partager ». Le terme « télécommunication » a été utilisé pour la première fois en 1904 par **Edouard Estaunié**, romancier et ingénieur français, dans son *Traité pratique de télécommunication électrique*. Edouard Estaunié, ingénieur aux Postes et Télégraphes et directeur de 1901 à 1910 de l'école professionnelle des Postes et Télégraphes, qui ne tenait alors compte que de l'électricité dans sa définition, souhaitait rassembler sous une même discipline la télégraphie, la téléphonie et les communications radio, tenant compte de l'évolution technologique par rapport aux moyens ordinaires de communication.

De nos jours, la télécommunication est caractérisée comme suit : « *l'émission, transmission à distance et réception d'informations de toute nature par fil, radioélectricité, système optique ou électromagnétique* ». Autrement dit, la télécommunication est d'abord et avant tout un échange d'information dans n'importe quel espace donné. La spécificité de la télécommunication, contrairement à une communication ordinaire, est que l'information est véhiculée à l'aide d'un support (matériel ou non), lui permettant d'être transmise sur de longues distances.

### 1.2 Concepts élémentaires : signal, message, information

Un **signal** est la grandeur physique variable porteuse d'information. Si l'information portée peut être de type analogique ou numérique, la nature physique du signal est toujours analogique.

Le mot **information** est utilisé dans des contextes très variés, dans des sens totalement différents suivants les disciplines scientifiques : on peut à titre d'exemples citer la thermodynamique avec le concept d'entropie, la physique avec la théorie du signal, la biologie avec la théorie du génome.

Une définition technique du terme **information** que nous allons étudier dans ce cours, est la suivante : « *Une information est un élément de connaissance nouveau annoncé à un destinataire, que ce dernier n'avait pas auparavant* »

Un **message** est une entité logique constituée par une suite cohérente d'informations.

**Claude Shannon** (1916-2001 : ingénieur électricien et un mathématicien américain) 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 C. 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 C. 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**.

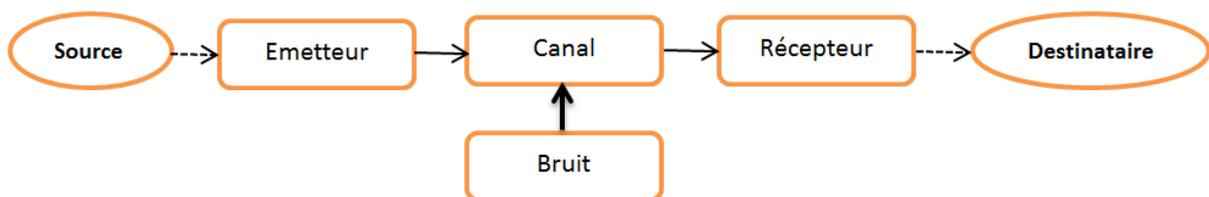
**1.3 Télécommunications analogiques** - On a d'abord cherché à transporter le signal tel qu'il est émis, c'est à dire dans le cas de la téléphonie en analogique. Le téléphone, la radio, la télévision continuent à utiliser majoritairement, dans le monde, des supports de transmission analogiques, qu'il s'agisse de fils de cuivre ou de l'atmosphère pour les transmissions dites hertziennes. Les seules transformations que l'on fait subir au signal sont des transformations analogiques: amplification du signal pour le régénérer car il a tendance à s'affaiblir avec l'augmentation des distances et surtout conversion analogique, comme celle qui transforme dans un microphone les vibrations d'une membrane, au contact des vibrations sonores de l'air, en oscillations d'un signal électrique (ou l'inverse dans une enceinte acoustique). Dans le monde des télécommunications analogiques, on cherche donc surtout à transporter sans altération le signal émis par l'émetteur. Ceci n'est pas simple car les supports de transmission ne laissent pas passer toutes les fréquences provoquant ainsi un appauvrissement du signal (ex: différence entre une voix au téléphone et la même voix en direct). De plus l'électronique analogique est sensible à des bruits parasites et génère elle-même ses bruits de fond.

**1.4 Télécommunications numériques** - Pour supprimer les inconvénients des télécommunications analogiques, on a imaginé d'avoir recours à la transmission numérique. Cela signifie qu'au lieu de transporter une variation (ou modulation) des ondes qui reproduit la forme très complexe du signal émis, on transporte une "représentation" de ce signal sous une forme beaucoup plus simple. La représentation du signal d'origine sera obtenue par une conversion analogique-numérique: ce dispositif électronique, aujourd'hui contenu dans un composant, prélève à intervalles réguliers des échantillons du signal, mesure leur amplitude en la comparant à des étalons et attribue une valeur numérique à chaque échantillon. C'est ce train d'informations, constitué des valeurs des différents échantillons représentant les valeurs successives du signal d'origine, qui sera transporté. Pour peu que l'on ait prélevé suffisamment d'échantillons avec suffisamment de précision, il sera possible à l'autre extrémité, par une opération inverse dans un convertisseur numérique-analogique, de reconstituer le signal d'origine. Les avantages d'une telle solution sont considérables : puisque la transmission est faite de quelques valeurs discontinues, elle se présente beaucoup

plus simplement que le signal qu'elle représente. De ce fait une transmission numérique est beaucoup moins sensible au bruit et aux légères variations dus aux imperfections de la transmission. En conséquence, la transmission numérique pourra se contenter de lignes de moins bonne qualité, ou plutôt à qualité égale on pourra transmettre plus de signaux sur la même ligne.

### 1.5 Schéma général d'un système de télécommunication

Une des contributions de C. Shannon dans son article de 1948 fut un schéma qui modélisait de façon formelle la communication entre deux machines. Ce schéma est désormais très largement utilisé en télécommunications, mais également parfois pour modéliser la communication humaine. Il met en évidence 3 acteurs indispensables à la transmission de l'information: la source (celui qui envoie l'information), le canal (qui transmet l'information) et le destinataire (qui reçoit l'information).



La **source** envoie un message, souvent constitué d'une série de symboles pris dans un alphabet donné. On parle dans ce cas de message numérique.

- Données discrètes : texte, numéros...
- Données analogiques numérisées : image, voix, vidéo...

L'**émetteur** prend ce message numérique et réalise les étapes suivantes :

- Codage source: compression des données pour qu'elles prennent le moins de place possible. Cela revient à remplacer le message à envoyer par un message le plus court possible, souvent représenté sous forme d'une série de 0 et de 1.
- Codage canal: rajout de bits d'information supplémentaires dans le message pour permettre de corriger les éventuelles erreurs de transmission
- Transformer le message numérique en un signal physique (onde électromagnétique, signal électrique, etc...) qui puisse être transmis sur le canal de transmission

Le **canal** achemine le signal physique d'un point à l'autre

- Le canal peut être de différents types : câbles coaxiaux, paires torsadées, réseau hertzien, infrarouge, fibres optiques,....
- Généralement perturbé par un bruit qui dépendra de l'environnement et de la nature du canal: perturbations électriques, réflexion d'ondes, détérioration du câble, etc...
- Ce bruit a pour conséquence une dégradation du signal voire la perte de parties du signal

Le **récepteur** prend le signal physique et réalise les étapes suivantes :

- Transformer le signal physique en un message numérique
- Inverser les étapes de codage canal et de canal source pour reconstituer le message envoyé par la source

Le **destinataire** reçoit le message

« *Le but d'un système de télécommunication est de faire parvenir à un **destinataire** un message issue d'une **source** d'information (parole, musique, vidéo, données, etc.).* »

## 1.6 Historique et évolution des télécommunications

L'histoire des télécommunications modernes remonte à 1792 et l'invention du premier télégraphe optique. Pourtant, les télécommunications résultent d'un besoin beaucoup plus ancien de l'être humain, ainsi que des autres espèces animales, de communiquer, autrement dit « de mettre en commun, de faire connaître des informations ».

**Les Grecs, l'Empire romain et les Gaulois** (اليونانيون، الإمبراطورية الرومانية والاعريق)

- Les Grecs anciens : les signaux de feux, « *Pour annoncer la bonne nouvelle, les messagers allumaient des feux qui, dans l'obscurité, étaient repérés à des kilomètres à la ronde. Ces feux étaient petit à petit relayés par d'autres postes jusqu'au destinataire final qui en allumait un dernier pour annoncer qu'il avait bien reçu le message* ».
- L'Empire romain : des signaux de feux étaient également utilisés. En effet, des « tours à feux » permettaient aux marins de se repérer à l'approche des côtes. Ces tours étaient

alors un moyen de guider les marins. Les Romains créèrent ainsi un réseau de postes télégraphiques reliant 3'000 villes d'Europe et d'Asie. A l'époque d'Auguste (62 av J.-C. - 14 ap J.-C.), une organisation « postale » voit le jour. Celui-ci établit un réseau de voies militaires jalonnées de relais de chevaux et de magasins d'approvisionnement. Ce système appelé cursus publicus (course publique) permettait au cavalier de franchir plus rapidement les distances en changeant de cheval à chaque relais. Cette organisation disparaît avec la chute de l'empire romain au Vème siècle.

- Les Gaulois possédaient leur télégraphe « oral ». Ainsi comme le disait César : « *Quand il arrive chez eux quelque événement d'importance, les premiers qui l'apprennent le proclament à grands cris dans la campagne. Ceux qui entendent ces cris les transmettent à d'autres, et ainsi de suite, de village en village ; si bien que la nouvelle traverse la Gaule avec la vitesse de l'oiseau* ».

### **La télégraphie**

- Le télégraphe optique : Claude Chappe et ses quatre frères en 1794,
- Le télégraphe électrique : Samuel Morse en 1832 (qui invente en parallèle un alphabet propre à son utilisation : le fameux code Morse.),
- La télégraphie sans fil, en 1896 (le physicien Russe Alexandre Popoff pense ainsi à l'utilisation des ondes hertziennes – découvertes quelques années auparavant par Heinrich Hertz).

### **La radio**

La radio doit son invention au physicien italien Guglielmo Marconi. Après plusieurs tests de transmission de signaux par le biais d'ondes électromagnétiques, il effectue, en 1895, la première transmission radio de l'histoire, à Salvan, en Valais. Alors que les scientifiques de l'époque prétendaient qu'une telle transmission entre deux points n'était possible que dans un espace dégagé de tout obstacle, Marconi, aidé de Maurice Gay-Balmaz, installe un émetteur et un récepteur distants de 1'500 mètres l'un de l'autre et séparés par une colline. Le succès est au rendez-vous, mais Marconi finit par s'exiler en Angleterre, son pays n'étant pas convaincu par l'utilité de sa découverte.

C'est là qu'il perfectionne son invention pour finalement créer en juillet 1897 la Wireless Telegraph Trading Signal CO. LTD, puis en novembre sa toute première station émettrice, qui

établit une liaison de 23 kilomètres entre l'île de Wight et Bournemouth, sur la côte Sud. La conquête des distances est lancée : elle atteindra les 300 kilomètres le 23 janvier 1901, entre l'île de Wight et le cap Lizard en Cornouailles, puis deviendra transatlantique le 12 décembre de la même année.

Les premières communications commerciales voient le jour et c'est dans le domaine maritime que l'invention de Marconi va connaître sa plus grande expansion.

Le développement du système de Marconi a suscité l'intérêt d'autres scientifiques et trois autres procédés ont pu être brevetés : Telefunken, Lee de Forest et United Wireless. La concurrence entre ces procédés, ainsi qu'entre les 15 compagnies de radiocommunication existantes à l'époque a pour conséquence que les opérateurs radio ont pour consigne de ne pas intercepter les messages provenant de la concurrence. La radio subit les impacts négatifs dus à son développement et à un manque de coordination universelle que le naufrage du Titanic a dévoilé au grand jour. Marconi reçoit le prix Nobel de physique en 1909 pour « sa contribution au développement de la télégraphie sans fil ».

### **Le Téléx**

Le développement de la télégraphie sans fil et de la radio dans les années 1930 ont permis l'apparition d'un nouveau système de communication : le Téléx - contraction de la locution anglaise telegraph exchange. Le Téléx est un réseau international de communication reliant des téléscripteurs qui transmettent des messages via des signaux électriques. Les informations sont automatiquement décodées et retranscrites par le téléscripteur, qui remplace ainsi les anciens opérateurs Morse. Les avantages de ce système sont son faible coût ainsi que sa fiabilité, puisque chaque message reçu peut être confirmé par le destinataire par un mécanisme de réponse automatique. C'est en Allemagne que se développe le premier grand réseau Téléx, dans les années 1930, qui permet d'assurer les communications au sein du gouvernement. En Suisse, les PTT (Postes, Téléphones et Télégraphes) développent le premier réseau Téléx national en 1934, d'abord entre les villes de Zurich, Bâle et Berne. Par la suite, la plupart des pays font de même, la France inaugurant son propre réseau en 1946.

### **Le téléphone classique**

Parallèlement à la télégraphie, les télécommunications connaissent au XIXème siècle une autre grande voie de développement avec le téléphone. Deux grands chercheurs s'opposent

alors sur cette piste : **Thomas Edison** et **Graham Bell**. Ce dernier finit par l'emporter, mais **Edison** améliorera la qualité sonore de l'invention, grâce au microphone à cartouche de carbone. En juillet 1875, **Bell**, accompagné de son assistant **Thomas Watson**, effectue la première transmission vocale par téléphone. Les deux compères se lancent alors dans une course à la qualité nécessaire à la commercialisation du produit, concurrencés en cela par un autre inventeur, **Elisha Gray**. Après une course effrénée, **Bell** et **Watson** purent déposer leur brevet le 14 février 1876, deux heures seulement avant **Elisha Gray**.

C'est en juin 1876 que Bell lance officiellement son invention, après en avoir amélioré le dispositif initial. Ce dispositif, relativement simple à réaliser, fut publié en septembre de la même année dans le magazine américain **Scientific American**. Aux quatre coins du monde, des amateurs se mettent alors à créer leur propre téléphone. Les communications devaient à l'origine passer par l'intermédiaire d'opératrices, qui mettaient les deux interlocuteurs en relation. En 1891, **Almon Strowger**, entrepreneur de pompes funèbres, invente le commutateur automatique, persuadé que sa faillite provient des opératrices, l'une étant la femme de son principal concurrent. Cet apport, suivi de l'invention de la **triode** par **Lee De Forest**, marque les premiers pas vers l'électronique.

En 1922, à la mort de Graham Bell, il y a alors 13 millions de téléphones en service dans le monde. A fin 2006, le nombre d'abonnés à une ligne fixe s'élevait à 1,27 milliards. Alors que les premiers réseaux se limitaient à une région, puis à un pays, avec la libéralisation du marché, les entreprises nationales de téléphonie dépassent aujourd'hui souvent les frontières de leur pays d'origine. Leur domaine d'activités s'est d'ailleurs depuis longtemps élargi aux nouvelles offres de télécommunications.

### **Le téléphone mobile**

Le téléphone mobile est de nos jours un objet inséparable d'une très grande majorité d'individus, au point même de modifier nos relations sociales et notre organisation du temps. Apparu dans le grand public dès les années 1990, son origine remonte pourtant aux années 1940, avec la découverte de la technologie radio. Cependant, ce n'est qu'en 1973 que l'inventeur du téléphone portable, le docteur Martin Cooper, passe son premier appel par ce biais. Le qualificatif de mobile n'apparaît qu'avec le premier téléphone réellement miniaturisé, créé par la marque Motorola, en 1983.

En 1982, la Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications (CEPT) lance le Groupe spécial mobile (GSM), chargé de développer un standard pour la téléphonie mobile en Europe. En 1987, 13 pays européens adoptent la convention qui lance le standard GSM (qui signifie cette fois Global System for Mobile communication). Cette technologie est utilisée aujourd'hui par plus de 3 milliards d'utilisateurs dans 212 pays et territoires.

### **La télévision**

Le 24 décembre 1883, l'ingénieur allemand **Paul Nipkow**, alors étudiant à Berlin, réalise pour la première fois dans une chambre d'hôtel le balayage d'une image à l'aide d'un disque percé de trous : le principe de la télévision naissait, avant d'être breveté en 1884. Se basant sur ce procédé, ainsi que sur les travaux notamment de Herz, de Marconi et de Braun (tube cathodique), l'inventeur écossais John Baird présente en 1926 son procédé de réception d'images, qu'il nomme « Televisor ». Le public voit apparaître sur l'écran la première émission télévisée : le visage de deux ventriloques. Cette même année, les sociétés Westinghouse, General Electric et RCA s'unissent pour former la National Broadcasting Company, plus connue par ses initiales, NBC. Douze ans plus tard, le même John Baird, appliqué à améliorer son invention, organise la première démonstration expérimentale de la télévision en couleur. La télévision s'exporte mondialement, mais ce n'est qu'en 1951 que les premières émissions de télévision publique en couleur apparaissent, sur la chaîne américaine CBS.

### **L'informatique et Internet**

Pour le Petit Larousse, l'informatique est « la science du traitement automatique et rationnel de l'information en tant que support des connaissances et des communications (...), mettant en œuvre des matériels (ordinateurs) et des logiciels (en anglais, respectivement hardware et software) ». La numérisation de l'information est à la base de l'informatique. Elle consiste en la conversion d'un objet réel en une suite de nombres permettant de le représenter informatiquement ou électroniquement. L'arithmétique binaire sur laquelle se base la numérisation n'est pas récente, puisque le concept apparaît déjà en 3000 av. J.-C. dans le symbole de l'empereur chinois Fou Hi, l'octogone à trigramme, le Yin et Yang.

L'Américain d'origine hongroise John Von Neumann (1903-1957) crée en 1944 la structure qui compose les ordinateurs modernes, l'architecture de Von Neumann : unité de traitement, unité de contrôle, la mémoire et les dispositifs d'entrée-sortie qui permettent de communiquer avec le monde extérieur. L'informatique permet ainsi de garder des informations en mémoire, dont la capacité ne cesse d'augmenter avec la technologie. Ce n'est qu'avec l'avènement d'Internet et de son corollaire, le World Wide Web, que les informations ne sont plus seulement stockées, mais également échangées et distribuées aux quatre coins du monde C'est la Bell Company qui, en 1958, invente le modem, qui permettra de transmettre des informations en données binaires sur une simple ligne téléphonique.

### Chronologie des télécommunications au 20ème siècle

**1907** : **Lee de Forest** invente la triode qui permet l'amplification analogique de signaux => transmission longue distance.

**1921** : **Edwin Armstrong** invente la **FM** (Modulation de Fréquences).

**1928** : 1ère liaison radiotéléphonique commerciale transatlantique.

**1935** : **1ère émission TV** en France (Paris).

**1938** : **Alec Reeves** invente la modulation par impulsions codées (MIC, ou PCM pour Pulse code Modulation) : 1ère représentation numérique d'un signal analogique.

**1948** : Invention du **transistor** => essor de l'électronique

**1948** : **Claude Shannon** développe les bases de **théorie de l'information** : base de la **numérisation**.

**1956** : Premier **câble transatlantique téléphonique** (TAT1) : 60 circuits téléphoniques.

**1956** : **Premier réseau de radiotéléphonie français** (10 000 abonnés).

**1962** : 1er **satellite de communication** ("Telstar-1"), destiné aux communications téléphoniques et télévision. 1ère émission de télévision entre USA et Europe.

**1965** : Premier satellite géostationnaire "Early Bird" (simultanément téléphonie et télévision).

**1965** : **3 millions d'abonnés au téléphone en France**.

**1969** : Transmission en direct des premiers pas sur la Lune.

**1971** : Début du système de repérage par satellite **GPS**. Entièrement opérationnel en 1995 (28 satellites).

**1972** : Naissance de l'InterNetworking, organisme chargé de la gestion d'Internet.

**1973** : Angleterre et Norvège rejoignent Internet (1 ordinateur par pays !).

**1980** : La sonde spatiale Voyager-1 transmet des photos de Jupiter et de Saturne.

1981 : Lancement du Satellite Télécom 1A (France).

1984 : Début des **réseaux cellulaires** de radiocommunications mobiles aux USA.

1986 : Ouverture du service de mobiles "Radiocom2000" (première génération de téléphonie mobile... en voiture !)

1987 : Mise en service en France du premier réseau entièrement numérique à intégration de services (**RNIS**).

1993, lancement commercial de la **2ème génération de téléphonie mobile (GSM)** en France (ITINERIS). Premier succès commercial de téléphonie mobile.

1997 : Arrêt de l'usage du Morse dans les télécommunications Radio-maritimes en France...

1999 : **35 millions d'abonnés filaires, et le téléphone portable dépasse toutes les prévisions.**

2001 : commercialisation de l'**ADSL** en France, jusqu'à 8 Mbit/s en réception et 640 Kbit/s en émission.

2003 : Nouveau record de débit longue distance avec l'**internet nouvelle génération IPv6** : débit à flux unique sur TCP (Transfer Control Protocol) de 983 Gbit/s pendant plus d'une heure entre le CERN et Chicago.

2004 : Lancement de l'**UMTS** en France, 3ème génération de téléphonie mobile. Nouvelles applications (visioconférence, web, mail, streaming...). Développement des Smartphones.

2005 : Lancement officielle de la **TNT (Télévision Numérique Terrestre)** en France (procédure débutée en 1996...).

>2006: **Vers la convergence voix et données.** Donc convergence entre réseaux de télécommunications fixes et sans fil.

## 1.7 Normes et standards de télécommunications

La normalisation est un acte primordial dans le domaine de la communication. En effet, il faut que tout utilisateur connecté au réseau de communication soit apte à recevoir et à transmettre des informations destinées à l'ensemble des participants.

Il faut se mettre d'accord sur l'ensemble des éléments nécessaires à la communication pour que des échanges puissent s'effectuer (voir figure ci-dessous).

La **normalisation** est un ensemble de règles établies qui doivent être suivies par les entités désirant communiquer.



### *Institutions de normalisation*

Les pouvoirs publics et industriels se sont rendus compte que les fournisseurs de produits pour le réseau devaient se mettre d'accord sur des **normes** de communication reconnues et internationales.

La norme est établie par consensus entre les diverses parties impliquées dans chacun des sujets à normaliser et approuvée par un organisme reconnu. Les principaux organismes de normalisation sont :

- **ISO** (International Standardization Organization, créée en 1947) organisme, dépendant de l'Organisation des Nations Unies : ONU), qui s'occupe de tous les domaines techniques en dehors de l'électricité et de l'électronique. Il englobe les organismes nationaux de tous les pays Organisé en TC (Technical Committees) ou en SC (Sous-Comités), à leur tour subdivisés en Groupes de travail (Working Group). Les projets de normes passent par trois stades, **DS** (Draft Proposal) ou document de travail, **DIS** (Draft International Standard) ou proposition de norme, et enfin **IS** (International Standard) après l'adoption définitive.

L'ISO regroupe les organismes nationaux de normalisation :

- o **AFNOR** : France (Association française de normalisation)
- o **ANSI** : Etats-Unis (American National Standards Institute )
- o **DIN** : Allemagne (Deutsches Institut für Normung - Institut allemand de normalisation )
- o **BSI** : Royaume Uni (British Standards Institute - Organisme britannique de normalisation)
- o **JISC** : Japon (Japanese Industrial Standards Committee)
- o **IANOR** : Algérie (Institut Algérien de la Normalisation : En 1976, L'Algérie, représentée par l'IANOR devient membre de l'ISO), Etablissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) ; ([www.ianor.dz](http://www.ianor.dz)) Sous tutelle du Ministère du Développement Industriel et de la Promotion de l'Investissement.

**Missions de l'IANOR**

- Elaborer des Normes Algériennes (NA) ;
- Assurer la veille sur l'évolution des normes ;
- Informer sur les normes ;
- Former et sensibiliser ;
- Certifier les produits aux Normes Algériennes, les systèmes de management et les personnes.

. **UIT** - Union Internationale des Télécommunications (Fondée en 1865) - Organisme international siégeant à Genève et chargé, dans le cadre de l'ONU, des questions de télécommunications. Il contrôle en particulier le CCITT, Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique, chargé du développement et de l'adoption des normes internationales en matière de télécommunications. Organisme appartenant à l'ONU et chargé de coordonner et de promouvoir le développement des télécommunications dans le monde. Ses principaux objectifs sont de stimuler les avancées technologiques et de garantir la compatibilité des réseaux nationaux pour permettre les communications internationales. Pour en savoir plus : <http://www.itu.int>

. **IUT-T** (International Union of Telecommunication - section Télécommunication) (qui a remplacé le CCITT : Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique en 1993) est chargée par l'ONU des normes qui portent le nom de «recommandations », dans le domaine des télécommunications.

**Les missions et les objectifs de l'Union Internationale des Télécommunications**

L'UIT favorise la coopération internationale avec trois objectifs :

- des télécommunications **toujours accessibles** ;
- des télécommunications **partout disponibles** ;
- des télécommunications **à la portée de tous**.

. **IEEE** (Institute of Electrical and Electronic Engineers : industriels) regroupe de nombreux chercheurs et ingénieurs en électronique et informatique jouant un rôle important comme forum d'étude et de discussion sur la normalisation. Elle a notamment joué un rôle

prépondérant dans la normalisation des réseaux locaux avec les normes IEEE 802, 802.3 (Ethernet), 802.4 (bus à jeton), 802.5 (anneau à jeton).

· **IETF / IRTF** (Internet Engineering/ Research Task Force) de la structure **IAB** (Internet Activities Board) qui avait remplacé l'ICCB en 1989. Cet organisme émet des normes de l'internet appelées RFC (Request For Comment).

La dénomination d'une norme doit tenir compte d'un ensemble de critères :

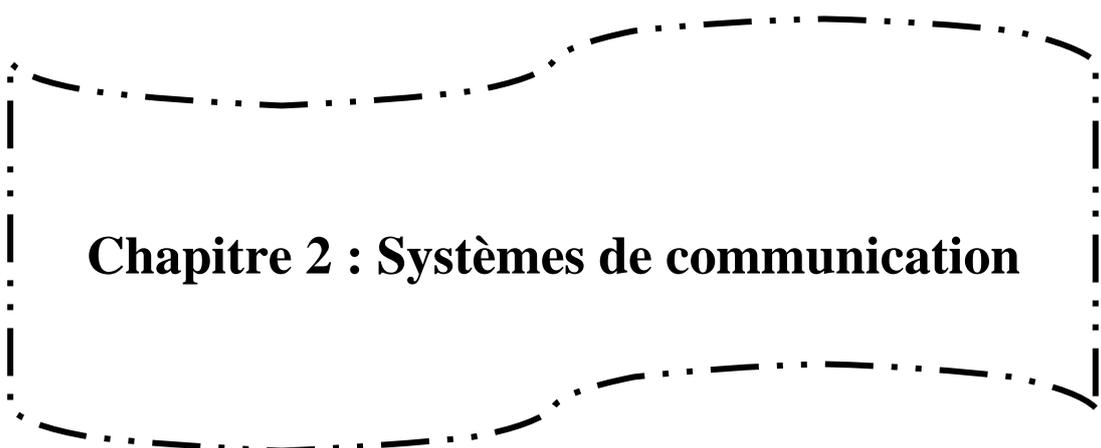
- Son **origine** (ISO, IEEE, etc.).
- Son **domaine d'application** (réseaux publics/privés/locaux/, téléphone, etc.).
- Sa **zone d'application** (européenne, internationale, etc.).

**CEI** - Commission Electrotechnique Internationale - IEC International Electrotechnical Commission - Organisme composé des Comités électrotechniques nationaux de plus de quarante pays. Elle forme avec l'ISO un comité technique commun (joint technical committee) ISO/IEC/JTC 1 pour traiter des problèmes relatifs à l'informatique et aux télécommunications pour l'informatique.

### **Norme et Protocole (Définitions)**

**Norme** - Standard - Document établi par consensus et approuvé par un organisme de normalisation reconnu (ISO, CEI, UIT-T, ETSI ...). Ne pas confondre avec standard.

**Protocole** - Séquence de règles à suivre dans un échange d'informations - Un protocole est une description formelle de règles et de conventions à suivre dans un échange d'informations, que ce soit pour acheminer les données jusqu'au destinataire ou pour que le destinataire comprenne comment il doit utiliser les données qu'il a reçues.

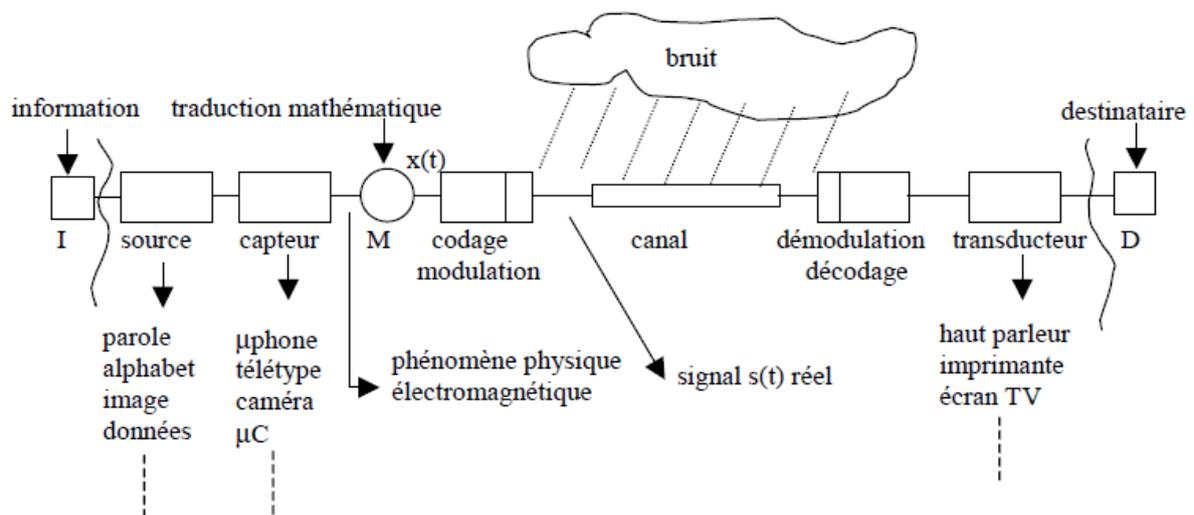


## **Chapitre 2 : Systèmes de communication**

## 2.1 Introduction

La théorie des télécommunications s'intéresse aux moyens de transmettre une information depuis une source jusqu'à un utilisateur. La nature de la source peut-être très variée. Il peut s'agir par exemple d'une voix, d'un signal électromagnétique ou d'une séquence de symboles binaires. L'information peut être transmise par le biais de supports de transmission divers, "bruités", et aux capacités limitées (air, lignes "métalliques", fibre optique) vers différents blocs de réception (haut-parleur, écran d'ordinateur ou de portable). Il faut alors adapter le signal initial au canal envisagé, afin de transmettre l'information le plus fidèlement possible tout en optimisant l'utilisation du canal. Pour un type de transmission donné, on doit alors définir un système global de télécommunications, intégrant et orchestrant le fonctionnement d'ensembles et sous-ensembles a priori hétérogènes, conçus par des spécialistes aux compétences diversifiées.

## 2.2 Synoptique général d'un système de télécommunications



Le **signal** est la grandeur physique variable porteuse d'**information**. Si l'**information** portée peut être de type **analogique** ou **numérique**, la nature physique du signal est toujours analogique.

Le **canal** de transmission est au cœur de cette chaîne. On doit absolument tenir compte de ses capacités et limitations pour dimensionner le reste de la chaîne.

Par **canal** de transmission on entend tout phénomène physique identifié et délimité sur le support physique et capable de véhiculer un signal : fil de cuivre, atmosphère (pour les transmissions hertziennes ou autrement dit ondes radio) ou fibre de verre (fibre optique). Le

signal est transporté sous la forme d'une onde ou d'une oscillation faisant varier une caractéristique physique du support : différence de potentiel électrique le plus souvent, onde radio électrique ou intensité lumineuse dans le cas de la fibre optique.

Généralement, le signal se présente sous la forme d'une ondulation de base régulière, baptisée porteuse, à laquelle on fait subir des déformations qui distingueront les éléments du message. Cette déformation est appelée modulation. On peut jouer sur l'amplitude des oscillations (on parlera alors de modulation d'amplitude), sur leur fréquence (modulation de fréquence) ou encore sur le déphasage de la périodicité d'oscillation (modulation de phase). Un canal de transmission est caractérisé par sa bande passante, c'est à dire la gamme de fréquences que laisse passer sans déformation ce canal, en fonction de ses caractéristiques physiques et de l'environnement susceptible de le perturber, particulièrement en provoquant des modulations parasites ou bruit. Cette BP exprimée en Hertz est la différence entre la plus haute fréquence (dite fréquence de coupure) et la plus basse fréquence que laisse passer le support. Intuitivement on comprend que plus la bande passante est large, plus on pourra transmettre pendant un temps donné un grand nombre de modulations (déformations du signal). Dans la réalité, les choses sont plus compliquées, du fait que le signal se dégrade relativement à la distance (atténuation) et que cette dégradation n'est pas la même pour toutes les fréquences.

Cependant, il existe des lois bien définies, permettant de connaître le nombre de modulations par seconde qu'accepte de transmettre un canal en fonction de sa BP. Ce nombre est exprimé en Bauds. Si le codage est binaire, donc si l'on utilise que deux états du signal transmis (0 et 1 ou haut et bas), cette rapidité de modulation sera égale au débit. On exprime ce débit en bit/sec. parfois en octet/sec. (1 octet = 8 bits).

Dans **la pratique**, les ingénieurs ont développé des types de codage à plus de 2 états qui, permettent d'obtenir des débits plus élevés pour une même BP.

### 2.3 Signaux de source en télécommunications

En général, le message à transmettre est représenté physiquement par une fonction continue du temps,  $x(t)$  par exemple. L'information contenue dans le message réside dans la forme de cette fonction  $x(t)$ . On en déduit que le rôle du récepteur consiste à analyser la forme de  $x(t)$  pour en déduire le signal d'information émis par la source.

### 2.3.1 Signal vocal ou musical

Le son consiste en une onde de pression se propageant dans l'air. Ce phénomène physique peut être étudié de manière quantitative et les propriétés de l'onde acoustique peuvent être exprimées sous la forme de grandeurs objectives. L'une de celles-ci est l'intensité acoustique  $I$  qui est la puissance transportée par unité de surface du front d'onde et s'exprime, par exemple, en  $[W/cm^2]$ . De telles grandeurs sont certes fort utiles, mais lorsqu'il s'agit de déterminer les conditions de bonne transmission de signaux sonores, il apparaît nécessaire de tenir compte des propriétés perceptives très particulières de l'ouïe. On fait alors appel à des grandeurs subjectives qui expriment ce que ressent l'être humain.

Notre oreille perçoit théoriquement des vibrations acoustiques allant de 20  $[Hz]$  (son grave) à 20.000  $[Hz]$  (son aigu). C'est la bande de fréquence qu'il faut restituer convenablement dans les systèmes haute-fidélité, comme la radio FM, le canal son de la télévision ou le CD-audio. En radio AM cependant, on ne reproduit les fréquences que jusqu'à 4500  $[Hz]$  et cela procure une qualité relativement bonne, même pour la musique. En téléphonie, où l'objectif est limité à l'intelligibilité du message, la bande de fréquence normalisée est 300 – 3400  $[Hz]$ . Cette bande de fréquences est garantie de bout en bout du réseau. Un modem devra donc utiliser cette même gamme de fréquences pour permettre l'information numérique sous peine de perte d'information.

### 2.3.2 Vidéo

Le signal vidéo est nettement plus complexe qu'un son. Il comporte des informations visuelles, exprimées pour une image généralement sous la forme de trois couleurs fondamentales pour tout point de l'espace, et une information temporelle née du mouvement des objets. De plus, le signal de télévision est un mélange du signal vidéo et de la partie audio ; il s'agit d'un signal composite. Le signal composite occupe une bande de fréquences d'approximativement 5  $[MHz]$ .

### 2.3.3 Signaux numériques

Le bit est l'information élémentaire en informatique. Il ne peut prendre que deux valeurs, 0 ou 1. En électronique, il est facilement représenté par des tensions différentes.

Un octet, ou byte en anglais, est un ensemble de 8 bits.

Le nombre de symboles transmis pendant une seconde est mesuré en baud.

Les signaux numériques peuvent prendre différentes formes et il faut s'entendre sur la définition du terme de signal numérique. La définition que nous avons choisie est celle d'un signal dont la valeur est constante sur un certain intervalle de temps. Ainsi, pour deux signaux à représenter 0 et 1, on peut transmettre respectivement un cosinus ou un sinus pour l'intervalle de temps correspondant au symbole. Cette forme analogique du signal qui en résulte est l'expression d'un signal fondamentalement numérique. Bien sûr, on peut avoir un signal analogique de valeur constante durant l'intervalle de temps.

### 2.3.4 Texte

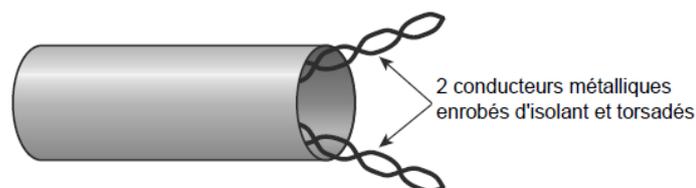
On peut voir le texte comme une série de lettres appartenant à un alphabet spécifique. Dès lors qu'il existe une représentation numérique de ces lettres, on se ramène au cas de signaux numériques, étant entendu que plusieurs symboles binaires sont nécessaires pour désigner une lettre.

## 2.4 Supports de transmission

Les supports de transmission sont nombreux. Parmi ceux-ci, on distingue : les supports métalliques, non métalliques et immatériels. Les supports métalliques, comme les paires torsadées et les câbles coaxiaux, sont les plus anciens et les plus largement utilisés ; ils transportent des courants électriques. Les supports de verre ou de plastique, comme les fibres optiques, transmettent la lumière, tandis que les supports immatériels des *communications sans fil* propagent des ondes électromagnétiques et sont en plein essor.

### 2.4.1 Paires torsadées

Une *paire torsadée non blindée* (UTP, *Unshielded Twisted Pair*) se compose de deux conducteurs en cuivre, isolés l'un de l'autre et enroulés de façon hélicoïdale autour de l'axe de symétrie longitudinal



L'enroulement réduit les conséquences des inductions électromagnétiques parasites dues à l'environnement. L'utilisation courante de la paire torsadée est le raccordement des usagers au central téléphonique (la *boucle locale* ) ou la desserte des usagers de réseaux privés. Son principal inconvénient est l'affaiblissement des courants, d'autant plus important que le diamètre des conducteurs est faible. Les paires torsadées contiennent, à intervalles réguliers, des *répéteurs* qui régènèrent les signaux. Quand plusieurs paires sont rassemblées dans un même câble, les courants transportés interfèrent les uns avec les autres. Ce phénomène est appelé *diaphonie*.

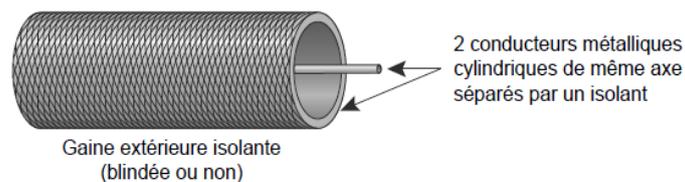
La paire torsadée suffit pour les réseaux locaux d'entreprise où les distances se limitent à quelques kilomètres. Ses avantages sont nombreux : technique maîtrisée, facilité de connexion et d'ajout de nouveaux équipements, faible coût. Certains constructeurs proposent des *paires torsadées blindées* (STP, *Shielded Twisted Pair*) . Enrobées d'un conducteur cylindrique, elles sont mieux protégées des rayonnements électromagnétiques parasites. Une meilleure protection prévoit un blindage par paire.

- *peu coûteux*,

- *pertes élevées, débit limité*.

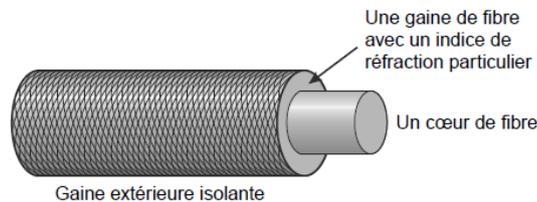
#### 2.4.2 Câbles coaxiaux

Pour éviter les perturbations dues aux bruits externes, on utilise deux conducteurs métalliques cylindriques de même axe séparés par un isolant. Le tout forme un *câble coaxial*. Ce câble présente de meilleures performances que la paire torsadée : affaiblissement moindre, transmission de signaux de fréquences plus élevées, etc. La capacité de transmission d'un câble coaxial dépend de sa longueur et des caractéristiques physiques des conducteurs et de l'isolant. Sur 1 km, un débit de plusieurs centaines de Mbit/s peut être atteint. Sur des distances supérieures à 10 km, l'atténuation des signaux réduit considérablement les débits possibles. C'est la raison pour laquelle on utilise désormais les fibres optiques sur les liaisons grandes distances.



### 2.4.3 Fibre optique

Une *fibre optique* est constituée d'un fil de verre très fin. Elle comprend un cœur, dans lequel se propage la lumière émise par une diode électroluminescente ou une source laser et une gaine optique dont l'indice de réfraction garantit que le signal lumineux reste dans la fibre.



Les avantages de la fibre optique sont nombreux : diamètre extérieur de l'ordre de 0,1 mm, poids de quelques grammes au kilomètre. Cette réduction de taille et de poids la rend facile à utiliser. En outre, sa très grande capacité permet la transmission simultanée de nombreux canaux de télévision, de téléphone... Les points de régénération des signaux sont plus éloignés (jusqu'à 200 km), du fait de l'atténuation moindre de la lumière. Enfin, l'insensibilité des fibres aux parasites électromagnétiques est un avantage très apprécié, puisqu'une fibre supporte sans difficulté la proximité d'émetteurs radioélectriques. On peut l'utiliser dans des environnements perturbés (avec de puissants champs électromagnétiques, par exemple). Par ailleurs, elle résiste bien aux écarts de température. La fibre optique constitue la plupart des artères des réseaux de télécommunications et des réseaux locaux à très haut débit. Les premières fibres optiques employées dans les télécommunications, apparues sur le marché à partir des années 1970, étaient *multimodes* (à saut d'indice ou à gradient d'indice, selon que l'indice de réfraction de la lumière varie de manière brutale ou progressive entre le cœur et la gaine de la fibre). Ces fibres étaient réservées (et le sont encore) aux débits inférieurs au gigabit par seconde, sur des distances de l'ordre du kilomètre. Plusieurs longueurs d'onde bien choisies se propagent simultanément en de multiples trajets dans le cœur de la fibre. Pour des débits plus élevés et des distances plus longues, la fibre *monomode*, de fabrication plus récente, plus fine, assure la propagation d'une seule longueur d'onde dans son cœur (quelques micromètres de diamètre) et offre donc de meilleures performances.

- pertes faibles à très faibles,
- immunité aux bruits,
- bande passante (débit) élevée à très élevée,
- mise en œuvre délicate.

#### **2.4.4 Transmissions sans fil**

Les ondes électromagnétiques se propagent dans l'atmosphère ou dans le vide (le terme d'*éther* désigne parfois ce type de support). L'absence de support matériel apporte une certaine souplesse et convient aux applications comme la téléphonie ou les télécommunications mobiles, sans nécessiter la pose coûteuse de câbles.

#### **Faisceaux hertziens**

Les *faisceaux hertziens* reposent sur l'utilisation de fréquences très élevées (de 2 GHz à 15 GHz et jusqu'à 40 GHz) et de faisceaux directifs produits par des antennes directionnelles émettant dans une direction donnée. La propagation des ondes est limitée à l'horizon optique ; la transmission se fait entre des stations placées en hauteur, par exemple au sommet d'une colline, pour éviter les obstacles dus aux constructions. Les faisceaux hertziens s'utilisent pour la transmission par satellite, pour celle des chaînes de télévision ou pour constituer des artères de transmission longues distances dans les réseaux téléphoniques.

- *spectre disponible limité,*
- *bande passante limitée,*
- *propagation linéaire (à vue) en H.F.*

#### **Ondes radioélectriques**

Les *ondes radioélectriques* correspondent à des fréquences comprises entre 10 kHz et 2 GHz. Un émetteur diffuse ces ondes captées par des récepteurs dispersés géographiquement. Contrairement aux faisceaux hertziens, il n'est pas nécessaire d'avoir une visibilité directe entre émetteur et récepteur, car celui-ci utilise l'ensemble des ondes réfléchies et diffractées. En revanche, la qualité de la transmission est moindre car les interférences sont nombreuses et la puissance d'émission est beaucoup plus faible.



## **Chapitre 3 : Techniques de transmission analogique**

### 3.1 Classification des signaux

#### 3.1.1 Selon leurs origines :

**Télécommunications** : son, images, données... etc.

**Géophysique** : évolution d'une température, de pression ...etc.

**Biologie** : électrocardiogramme, électro-encéphalogramme...etc.

#### 3.1.2 Selon leurs dimensions :

Monodimensionnel (1D)

Bidimensionnel (2D)

#### 3.1.3 Selon leurs morphologies : On distingue les signaux

À **évolution temporelle** continue ou discrète

À **amplitude** continue ou discrète

**En télécommunications, on distingue aussi :**

- **Les signaux déterministes**

Il s'agit d'un signal dont on peut représenter l'évolution grâce à une fonction mathématique. On peut citer le signal sinusoïdal, rampe, échelon, impulsion ou Dirac, ... Un signal déterministe peut être périodique ou non périodique.

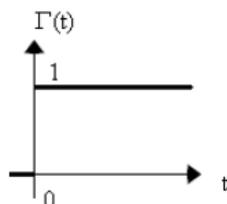
- **Les signaux aléatoires**

Un signal aléatoire est un signal dont on ne peut deviner l'évolution. Néanmoins, tout signal aléatoire peut être caractérisé mathématiquement, mais aucune fonction mathématique ne permet de prédire l'évolution du signal à l'instant donné. Un signal aléatoire peut être stationnaire ou non stationnaire.

### 3.2 Signaux élémentaires

**Echelon Heaviside (ou échelon unité)** : La fonction échelon unité, ou simplement échelon ou fonction de Heaviside, notée  $\Gamma$ , est une fonction réelle de la variable réelle définie par :

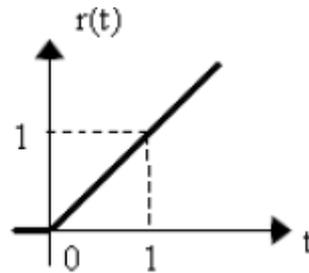
$$\Gamma(t) = \begin{cases} +1, & \text{si } t > 0, \\ 0, & \text{si } t < 0. \end{cases}$$



Par convention  $\Gamma(0) = \frac{1}{2}$

**Rampe Unitaire** : La fonction rampe, notée  $r$ , est une fonction réelle de la variable réelle

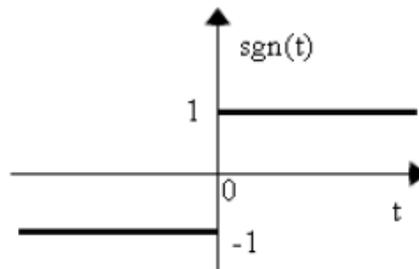
définie par :  $r(t) = \int_{-\infty}^t \Gamma(u) du$



**Fonction signe** : La fonction signe, notée  $\text{sgn}$  est une fonction réelle de la variable réelle

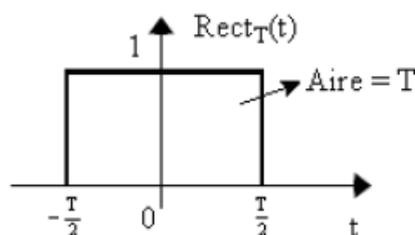
définie par :  $\text{sgn}(t) = \begin{cases} +1, & \text{si } t > 0, \\ -1, & \text{si } t < 0. \end{cases}$

Par convention, on définit :  $\text{sgn}(0) = c_0$ , avec  $-1 \leq c_0 \leq +1$



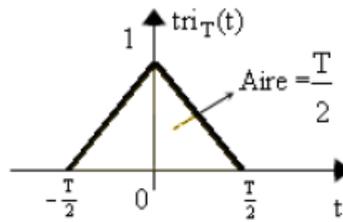
**Fenêtre rectangulaire ou fonction porte**: La fonction rectangle, ou fonction porte, de largeur  $T$ , notée  $\text{rect}_T$ , est une fonction réelle de la variable réelle définie par:

$$\text{rect}_T(t) = \Gamma(t + T/2) - \Gamma(t - T/2)$$



**Fenêtre triangulaire (fonction Bartlett)** : La fonction triangle unité, notée  $\text{tri}$ , est une fonction réelle de la variable réelle définie par :

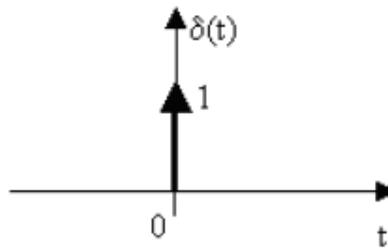
$$\text{tri}(t) = \begin{cases} 1 - |t| & \text{si } |t| \leq 1, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$



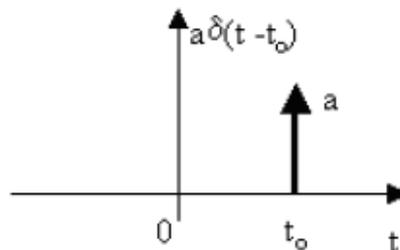
**La distribution ou impulsion de Dirac**, notée  $\delta(t)$ , vérifie :

$$\begin{cases} \delta(t) = 0, \text{ si } t \neq 0, \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(u) du = 1. \end{cases}$$

Impulsion de Dirac à l'instant initial d'aire unité :

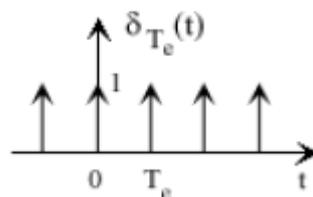


Impulsion de Dirac à l'instant  $t_0$  d'aire a :

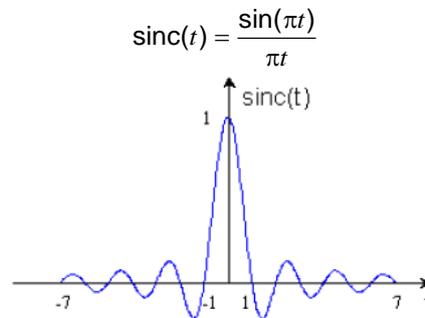


**Peigne de Dirac** : Pour échantillonner un signal avec une période d'échantillonnage régulière  $T_e$ , il est pratique de définir une suite d'impulsions de Dirac, périodique et de période  $T_e$ . Cette distribution, appelée *peigne de Dirac* et notée  $\delta_{T_e}(t)$ , est définie par :

$$\delta_{T_e}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(t - kT_e)$$



**Fonction sinus cardinal :** Cette fonction est très courante en traitement du signal où elle intervient comme transformée de Fourier d'une fonction rectangle. Une fonction rectangle permet de représenter par exemple des opérateurs idéaux de filtrage. La fonction *sinus cardinal*, notée  $\text{sinc}(t)$ , est définie :



### 3.3 Principe de la transmission analogique

Les signaux à transmettre sont le plus souvent soit des signaux audiofréquence provenant d'un microphone excité par le son ; soit des signaux vidéofréquence provenant de la caméra de prise de vue de télévision. Ce sont des signaux complexes à composantes toutes de basse fréquence (l'oreille est sensible à des sons de fréquences comprises entre 16 et 104Hz) ou en partie de basse fréquence (les signaux relatifs à une information vidéo ont des fréquences allant de 25Hz à 1MHz environ).

A ces signaux, constituant l'information à transmettre, correspondent des ondes que l'on ne peut pas propager à grande distance par rayonnement dans l'atmosphère, car la puissance rayonnée, faible puisque proportionnelle au carré de la fréquence, serait perdue entre le départ et l'arrivée. En plus, la transmission directe par onde hertzienne d'un signal BF est impossible. Car les dimensions des antennes, étant de l'ordre de  $\frac{1}{4}$  de la longueur d'onde, seraient prohibitives.

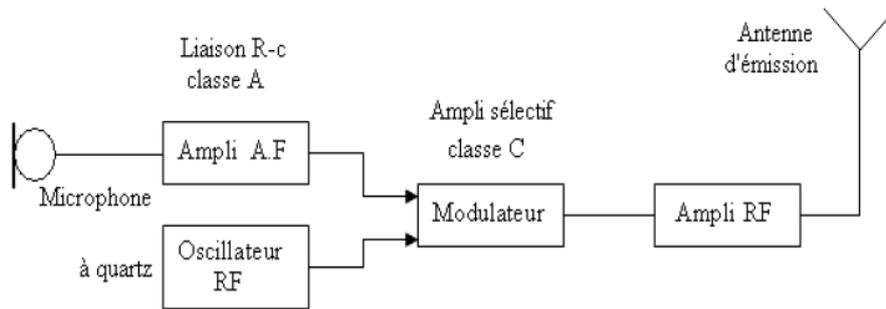
#### **Exemple :**

Il faudrait une antenne de longueur :

- 5km si la fréquence du signal est 15kHz ;
- 750km si la fréquence du signal est 100Hz.

On a donc pensé à faire porter l'information B.F par une onde électromagnétique haute fréquence, modifiée par le signal B.F (figure ci-dessous). Cette onde HF est de la forme

$e_0 = E_m \cos \alpha$  et a 2 caractéristiques : l'amplitude  $E_m$  et la phase. A cette phase on associe la pulsation  $\Omega_0 = d\alpha/dt$  et la fréquence  $F_0 = \Omega/2\pi$ .



● Organisation de l'émission radio

Modifier l'onde H.F. " $e_0$ " par le signal B.F. " $s$ " revient donc à modifier une de ses caractéristiques au rythme du signal B.F et proportionnellement à ce signal : C'est ce qu'on appelle : **moduler l'onde H.F.** L'onde H.F s'appelle **la porteuse** et le signal B.F, **le signal modulant**.

Comme illustré sur la figure ci-dessous, le signal modulant peut influencer :

- Soit l'amplitude de la porteuse : c'est la **modulation d'amplitude**.
- Soit la phase : c'est la **modulation de phase** (elle est peu utilisée ; on s'en sert en téléphonie par exemple car le nombre d'informations à transmettre a été réduit et on opère à "indice de modulation" constant).
- Soit la fréquence : c'est la **modulation de fréquence**.

On peut également combiner modulations d'amplitude et de phase.

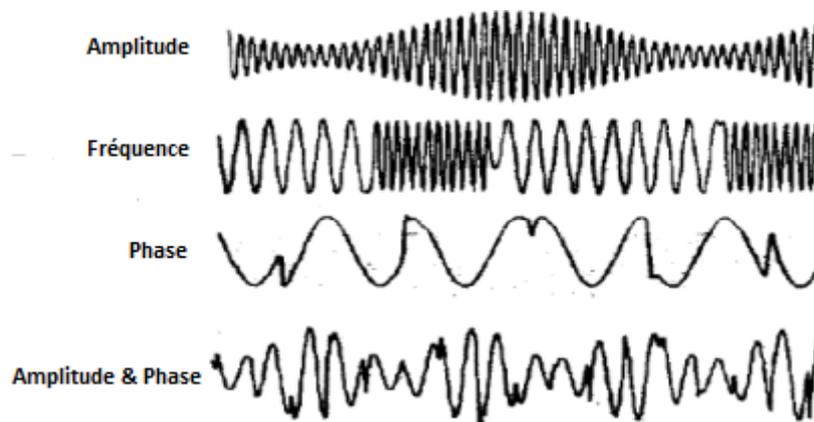
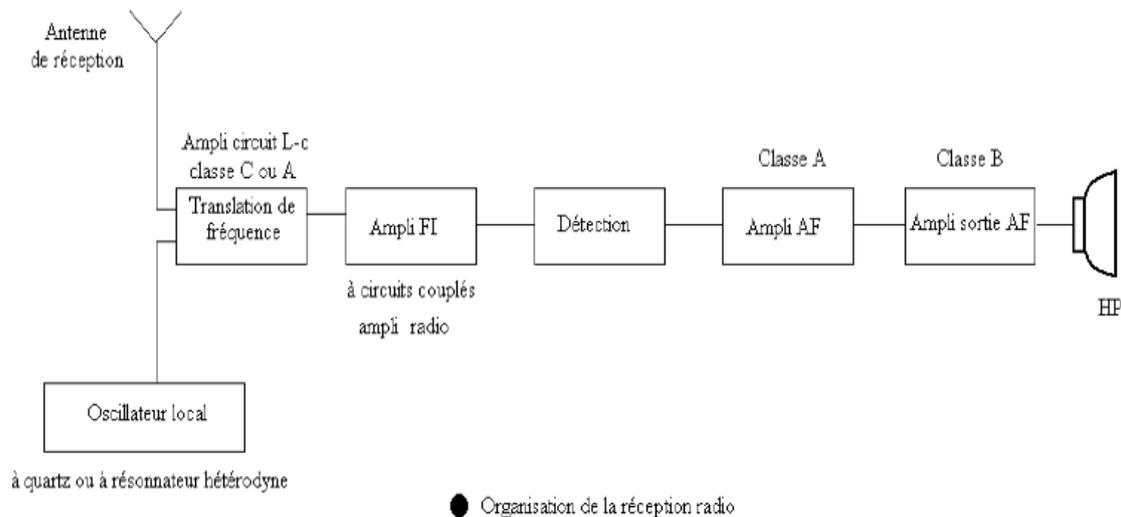


Fig. Allure temporelle de signaux obtenus par différentes techniques de modulation

Lors de la réception de l'information (figure ci-dessous), il s'avère nécessaire d'extraire le signal BF, portant l'information, du signal HF modulé émis par l'antenne émettrice et capté par l'antenne réceptrice : C'est la **démodulation**. Il existe différents moyens à mettre en œuvre selon le procédé de modulation utilisé. *Dans ce chapitre on va s'intéresser au principe de la modulation/démodulation d'amplitude, les différents types de la modulation seront étudiés en détail dans le module « communication analogique » unité d'enseignement 3.1.1 du semestre 5.*



### 3.3.1 Définitions :

#### Caractéristique d'un signal sinusoïdal

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

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

Le signal sinusoïdal s'écrit de la manière suivante :

$$\text{En temporel : } x(t) = A \sin(2\pi ft + \theta)$$

$$\text{En fréquentiel : } X(f) = A / 2e^{j\theta}, X(kf) = 0, \forall k \in \mathbb{N}, k \geq 2$$

**Mélangeur** : un mélangeur est un circuit électronique qui effectue la multiplication entre deux signaux. Couramment utilisé dans les émetteurs/récepteurs HF, un mélangeur effectue une multiplication entre un oscillateur local (porteuse à  $f_p$ ) et un signal modulé ou modulant. Au niveau du spectre, cela revient à une simple translation de  $\pm f_p$  du signal. On observe ainsi deux bandes, dont une est nécessairement filtrée.

**Principe du récepteur superhétérodyne :** Au niveau de la réception, en amont de l'amplificateur on peut placer un mélangeur, de fréquence variable selon la station à écouter. Ainsi, le signal en sortie du mélangeur est défini à une fréquence fixe, appelée Fréquence Intermédiaire  $f_I$ . On peut ainsi utiliser un amplificateur qui fonctionne sur une bande de fréquence réduite et connue. En règle général, un récepteur superhétérodyne consiste à augmenter ou diminuer la fréquence du signal modulé vers une ou plusieurs fréquences intermédiaires  $f_I$ .

**Amplificateur :** l'amplificateur est un composant électronique qui permet d'amplifier le signal par un gain  $G$ . Idéalement, il amplifie sans déformer le signal. Idéalement, cela revient à multiplier chaque amplitude du spectre par le facteur  $G$ . Cependant, l'amplificateur ne peut réaliser une telle opération, l'ensemble du spectre n'est pas multiplié par le même gain et donc le signal est déformé. On appelle plage d'amplification, la bande de fréquence sur laquelle l'amplificateur peut multiplier les raies du spectre par le gain  $G$ . Plus cette bande est élevée et plus l'amplificateur est cher. Pour réduire le coût du récepteur, on préfère choisir un mélangeur et un amplificateur faible bande.

**Fréquence image :** la fréquence image est résultante des structures superhétérodynes car nous savons que le mélangeur permet de translater le signal vers  $\pm f_p$ . Si l'information est un signal sinusoïdal de fréquence  $f_1$ , le signal en sortie du mélangeur est constitué d'une fréquence  $f_1 + f_p$  et  $f_1 - f_p$ . Grâce à un filtre, on ne conserve que la fréquence  $f_I = f_1 - f_p$ .

Si on applique en entrée du mélangeur un signal de fréquence  $f_2$ . En sortie du mélangeur on récupère deux fréquences  $f_2 + f_p$  et  $f_2 - f_p$ . La fréquence image est la fréquence  $f_2$  telle que  $f_2 + f_p = f_1 - f_p$

**Filtres sélectifs :** un filtre est défini par son gabarit. Cela représente les fréquences que le filtre va laisser passer et les fréquences qu'il va filtrer. On représente de plus l'atténuation apportée par bande de fréquence. Plus cette atténuation est forte, plus le filtre est sélectif.

*On peut rappeler que la sélectivité d'un filtre est déterminée par son ordre. Ainsi un filtre d'ordre 1 atténue autour de la fréquence de coupure de 20 dB par décade. Si la fréquence de coupure est à 100 kHz, le filtre passe bande atténue de 20 dB à 10 kHz et à 1000 kHz. Donc la bande de 990 kHz (entre 10kHz et 1000 kHz) est atténuée de moins de 20 dB. Si la fréquence de coupure est à 1000 kHz, alors il atténue de 20 dB les fréquences situées à 100 kHz et 10*

MHz, ce qui fait une bande de 9990 kHz ou l'atténuation est inférieure à 20 dB. On remarque donc que plus on augmente la fréquence de coupure, plus la bande ou l'atténuation inférieure à 20 dB est grande. Un filtre d'ordre 2 atténue autour de la fréquence de coupure de 40 dB par décade. Un filtre d'ordre  $n$  atténue autour de la fréquence de coupure de  $20n$  dB par décade.

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

**Filtre céramique :** De nombreuses applications utilisent un filtre céramique très sélectif à 455 kHz. Ce filtre est bon marché car vendu en masse et très sélectif (bande passante de quelques kHz, facilement accordable).

### 3.3.2 Modulation d'amplitude

La modulation d'amplitude est la première modulation employée en Télécommunication de par sa simplicité de mise en œuvre. La modulation d'amplitude consiste à modifier l'amplitude de la porteuse par une fonction linéaire ( $y=Ax+b$ ) du signal à transmettre.

Ainsi, soient

- La porteuse  $x_p(t) = S_p \sin(2\pi f_p t + \varphi_p)$

- Le modulant (signal d'information) :  $S_i(t)$

- Le signal modulé  $x_t(t) = [S_p + kS_i(t)] \sin(2\pi f_p t + \varphi_p)$

Où  $k$  est un facteur de proportionnalité, souvent appelé sensibilité du modulateur.

#### Taux de modulation : $m$

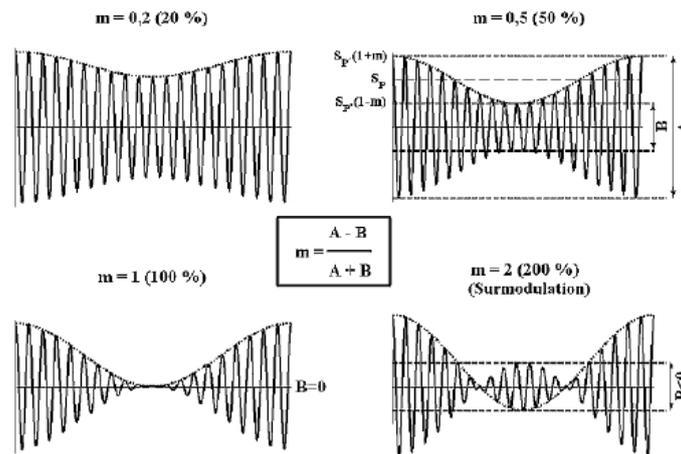
Dans le cas où le signal modulant est un signal sinusoïdal, on obtient :

$$x_t(t) = [S_p + kS_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i)] \sin(2\pi f_p t + \varphi_p)$$

On préfère l'écriture suivante :

$$x_t(t) = S_p [1 + m \sin(2\pi f_i t + \varphi_i)] \sin(2\pi f_p t + \varphi_p)$$

Le taux de modulation, notée  $m$  est caractéristique du modulateur. Il représente l'amplitude du signal modulé par rapport à l'amplitude de la porteuse. Sur la figure ci-dessous, on représente différentes valeurs de  $m$ .



### Bande occupée

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

En réalité, on cherche à transmettre le signal d'information par un circuit le plus simple possible, tant à l'émission qu'à la réception (coût du modulateur/démodulateur). D'un autre côté, on souhaite réduire au maximum la bande occupée pour pouvoir transmettre le plus d'information dans une même largeur de bande autorisée.

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

### Occupation spectrale par une modulation d'amplitude

Pour une transmission d'amplitude basique, la bande occupée est double de la bande de base du signal d'information.

### Puissance émise

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

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

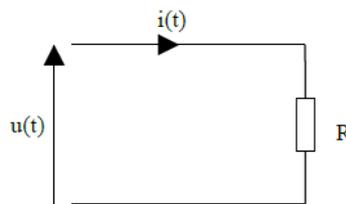
La puissance s'exprime en Watt, avec la tension  $u$  en Volt et l'intensité  $i$  en Ampère. On préfère couramment exprimée cette notion en dB par la relation suivante :

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

On exprime couramment la puissance en dB, car l'avantage de cette écriture permet de soustraire les pertes et atténuations au lieu de les diviser. En effet, si le signal est atténué de moitié par 100 mètres, dans le cas où l'on transmet un signal de 1W, au bout de 100 mètres la puissance sera de 0,5 W. Quelle est la puissance du signal au bout de 1.7 km ? Sachant que diviser par 2 correspond à une atténuation de -3dB, et qu'en appliquant la formule ci-dessus, 1Watt = 0 dB, au bout de 1.7 km (17\*100 m), le signal sera atténué de -3dB\*17 soit 51 dB. La puissance du signal reçu est donc de 0dB-51dB=-51dB.

### Puissance normalisée

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



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

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

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

### Formule de Dirichlet Parseval

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

$$P_W = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = \sum_{-\infty}^{+\infty} S^2(kf), \quad f = \frac{1}{T}$$

### 3.3.3 Différentes modulations d'amplitudes

Pour économiser la puissance transmise, on peut supprimer la raie à la fréquence porteuse et/ou supprimer une des deux bandes (BLU). La première technique s'appelle : **Modulation d'amplitude sans porteuse**, la seconde est la **modulation d'amplitude à Bande Latérale Unique**.

L'avantage de la deuxième méthode est de réduire en plus l'occupation de la bande occupée.

*Remarque 1 : Dans le cas de dispositif portable, la puissance émise est délivrée par la batterie. Plus la puissance transmise est élevée et plus l'autonomie sera de courte durée.*

*Remarque 2 : La quantité d'information à transmettre est fonction de la largeur de bande utile occupée. Dans le cas de la BLU, on supprime une bande sur 2 (la deuxième bande contenait la même information que la première donc une seule bande est utile), ce qui libère une bande de fréquence. La bande de fréquence libérée peut ainsi être réutilisée pour envoyer une autre information.*

### **Modulation d'amplitude sans porteuse**

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

Cela revient donc à émettre le signal suivant :

$$x_i(t) = [S_p + \alpha S_i(t)] \sin(2\pi f_p t + \varphi_p) \quad \text{ou} \quad S_p = 0$$

### **Modulation d'amplitude à bande latérale unique (BLU)**

Nous savons que moduler un signal autour d'une porteuse  $f_p$  par le biais d'une modulation d'amplitude consistait à translater le spectre en bande de base vers la fréquence porteuse. De ce fait, au regard de la, l'information transmise autour de la porteuse est identique (USB, LSB).

On peut par conséquent réduire l'occupation spectrale en ne transmettant qu'une seule bande sur les deux.

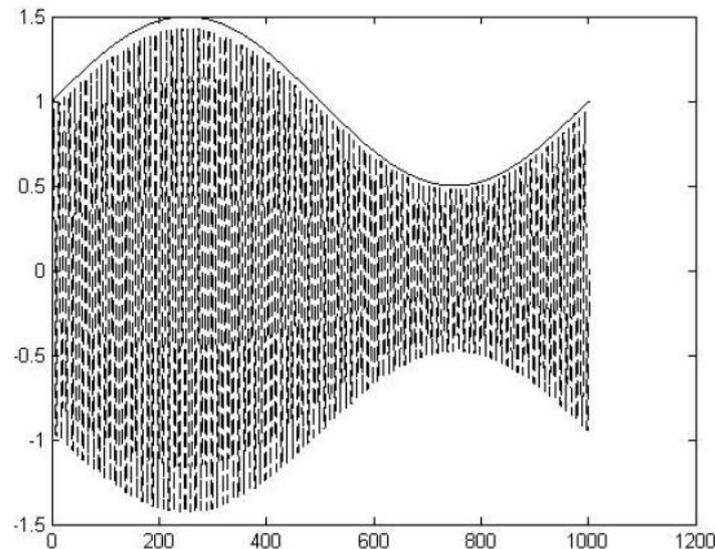
## **3.3.4 Démodulation d'amplitude**

### **Démodulation incohérente (ou non cohérente)**

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

### **Enveloppe d'un signal**

L'enveloppe d'un signal est la forme Basse Fréquence du signal. Sur la figure ci-dessous, l'enveloppe du signal est représentée en trait plein et le signal modulé en pointillé.

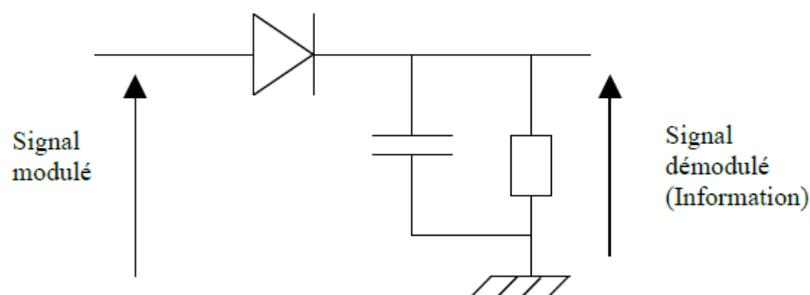


### Détection d'enveloppe

La détection d'enveloppe permet de récupérer l'enveloppe d'un signal. Un tel procédé est mis en œuvre pour démoduler des signaux modulés classiquement en amplitude. La détection d'enveloppe récupère le signal modulé partir de son amplitude seule et ne nécessite pas la connaissance de la fréquence porteuse. Il s'agit donc bien d'une **démodulation non cohérente**.

### Application

Par un simple circuit électronique composé d'une diode, d'une capacité et d'une résistance, il est possible de récupérer l'information transmise en supprimant l'enveloppe. Il s'agit du **détecteur d'enveloppe**.



### Détermination du détecteur d'enveloppe

Le détecteur d'enveloppe est utilisé pour démoduler des signaux modulés en amplitude (avec porteuse et double bande). La porteuse est définie avec une fréquence  $f_p$ . Le signal modulant (information) est défini sur une gamme de fréquence dont la fréquence max est  $f_{max}$ . Pour que la démodulation d'amplitude donne des résultats corrects, il faut choisir la résistance  $R$  et

la capacité  $C$  du démodulateur d'enveloppe tel que la constante de temps de charge/décharge du condensateur soit lente par rapport à la porteuse mais sensiblement égale à la fréquence maximale du signal modulant.

Ainsi, on choisira :  $1/RC \ll f_p$  et  $1/RC > f_m$ .

### Démodulation cohérente ou synchrone

La démodulation cohérente, appelée aussi démodulation synchrone nécessite de récupérer ou de reconstruire la porteuse.

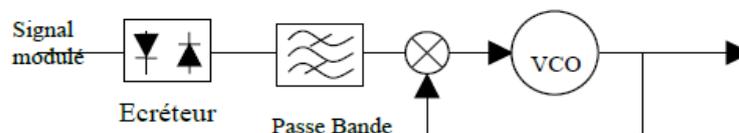
### Détection cohérente

Une fois la porteuse reconstruite, on multiplie le signal reçu (signal modulé) avec la porteuse reconstruite et on filtre le signal par un filtre passe-bas car le signal multiplié se retrouve en bande de base.

### Application

Dans le cas de la modulation d'amplitude avec porteuse, la porteuse à l'émission est définie autour de  $f_p$ . Mais, il est impossible de générer une porteuse à fréquence fixe. Il existe toujours une variation de la fréquence autour de  $f_p$ . Pour la démodulation, il est préférable de **récupérer** la porteuse.

Le circuit de restitution de porteuse est défini autour d'une PLL, élément fondamental pour « suivre les dérives de » la porteuse. Le circuit de restitution de porteuse est représenté sur la figure ci-dessous.



### Démodulation d'amplitude d'un signal modulé à porteuse supprimée

Dans le cas de la porteuse supprimée, il n'est pas possible de restituer la porteuse. Il faut la reconstruire. Pour cela, on utilise un **doubleur de fréquence**. Cela consiste à élever le signal reçu au carré, de filtrer le signal autour de  $2f_p$ , puis de diviser la fréquence par 2 pour restituer la fréquence porteuse  $f_p$ .

### Démodulation d'amplitude d'un signal modulé BLU

On crée localement, au niveau du récepteur une fréquence proche de la fréquence porteuse de l'émetteur. On multiplie le signal modulé reçu par la source reconstruite en réception. Lorsque la fréquence est différente, il existe un décalage de quelques Hz, qui ne s'entend pas à l'oreille.

### 3.4 Filtres électriques

Le **filtrage** est une forme de traitement de signal, obtenu en envoyant le signal à travers un ensemble de circuits électroniques, qui modifient son spectre de fréquence et/ou sa phase et donc sa forme temporelle.

Il peut s'agir soit :

- d'éliminer ou d'affaiblir des fréquences parasites indésirables
- d'isoler dans un signal complexe la ou les bandes de fréquences utiles.

Un **filtre** est un dispositif dont la fonction de transfert complexe  $T$  permet d'isoler certaines composantes en éliminant les composantes de fréquences indésirables.

#### Applications :

- Systèmes de télécommunication (téléphone, télévision, radio, transmission de données ... etc.)
- Systèmes d'acquisition et de traitement de signaux physiques (surveillance médicale, ensemble de mesure, radars ... etc.)
- Alimentation électrique ... etc.

Type	Composants	Spécifités
Filtres numériques	Circuits logiques intégrés	Signaux numérisés F<100MHz Convient en grand série Entièrement programmable
Filtres passifs	Circuit discret L et C, Composants piézoélectriques (Quartz)	F élevée Pas d'alimentation Non intégrable

Type	Composants	Spécificités
Filtres actifs	AIL, L et C	F < 1MHz Besoin d'alimentation Tension filtrée faible < 12V
Filtres à capacité commutée	AIL, interrupteur commandé MOS, R et C intégré	F < qqMHz Besoin d'alimentation Intégrable Fréquence programmable

**Tableau 3.1. DIFFERENTS TYPES DE FILTRES**

### Comparaison filtre actif – filtre passif

#### Filtre passif :

- Fonctionne sans alimentation et à des fréquences élevées
- L'utilisation de bobines et de capacités permet d'obtenir tous types de réponse
- Nécessite des bobines : cher (bobine à faible tolérance), encombrant, non-idéal (résistance => facteur de qualité faible en basses fréquences), risque de couplage parasite entre bobines
- Difficulté de mise en œuvre pour les filtres d'ordres élevés (étages dépendants)
- La fonction de transfert dépend de la charge qui doit donc être déterminée très précisément
- Performants jusque 500 MHz.

#### Filtre actif :

- Moins cher en grandes quantités
- Petite taille => parasites moindres
- Intégration possible
- Nécessité d'alimentation de tension, consommation d'énergie
- Excursion du signal limité par la saturation des AO et par le bruit des AO
- Les imperfections des AO à hautes fréquences modifient la fonction de transfert du filtre
- La contre-réaction sur les AO peut conduire à l'instabilité du système
- Utilisation pour des fréquences inférieures à quelques 100 kHz.



## **Chapitre 4 : Techniques de transmission numérique**

## 4.1 Introduction

La transmission directe des informations analogiques dans un conducteur ou par onde hertzienne a des limites, l'une liée à la bande passante du canal de transmission et l'autre liée aux conditions de propagation (parasites, perte, etc.). Ce qui entraîne toujours une dégradation du signal et par conséquent une perte irrémédiable de d'informations. Dans le cas des transmissions numériques, l'information se présente sous forme d'une suite d'éléments binaires. Les effets liés aux conditions de propagation peuvent alors être considérablement réduits par une remise en forme du signal. Néanmoins, d'autres perturbations affectent les transmissions numériques et en particulier celles liées aux opérations d'échantillonnage (limitation de la bande passante) et de quantification (limitation de la résolution). Cependant, ces limites peuvent être prises en compte à la construction alors qu'elles restent de nature aléatoire en analogique.

Aujourd'hui, tous les nouveaux systèmes de transmission sont numériques. Les temps ont beaucoup changé depuis l'invention du téléphone en 1889, puis du télégraphe sans fil par Guglielmo Marconi en 1901 (premières expériences réalisées au bord de La Brague, sur l'actuel par de Sophia-Antipolis), ce qui lui valut le prix Nobel en 1909.

Les communications numériques nécessitent aujourd'hui des compétences multiples : antennes (physique et propagation), modulation et égalisation (traitement du signal), réseau (informatique et systèmes distribués), micro-électronique (architectures logicielle et matérielle).

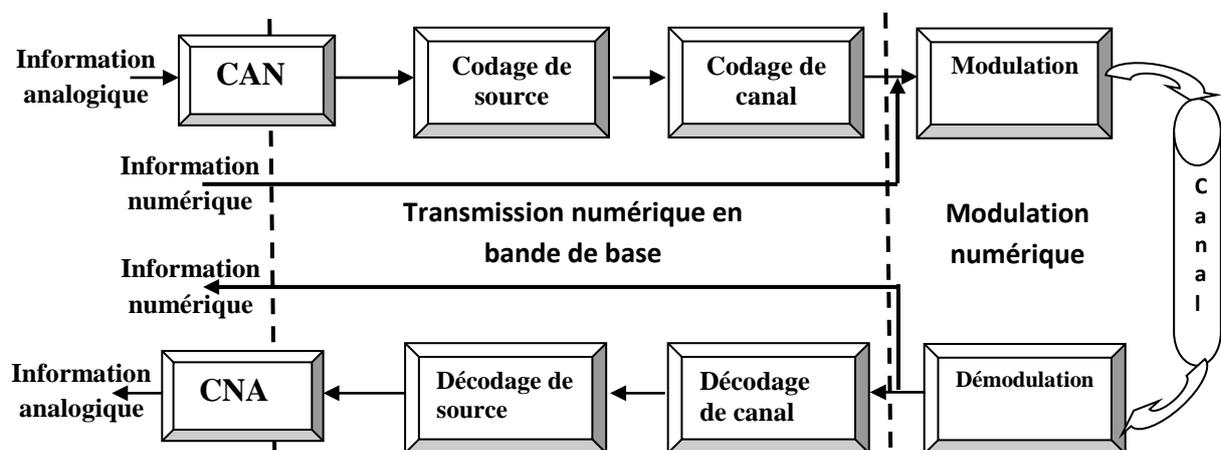
Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...), mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible.

La figure ci-dessous donne le schéma synoptique d'un système de transmission numérique. Chaque élément de base d'une transmission numérique a une fonction bien précise :

- CAN : Représentation numérique du message analogique :
  - Echantillonnage.

- Quantification.
- Codage.
- Codage de source : Compression du message numérique.
- Adaptation de l'alphabet du message au canal.
- Suppression de la redondance du message ou suppression d'informations peu significatives.
- Codage de canal :
  - Ajout d'information pour immuniser le message aux erreurs du canal.
- Modulation :
  - Conversion du message numérique en un message analogique transportable sans distorsion par le canal.

A la réception, les opérations inverses sont effectuées afin de retrouver le message analogique initial.



**Fig. Synoptique d'un système de transmission numérique**

Les trois caractéristiques principales permettant de comparer entre elles les différentes techniques de transmission sont les suivantes:

- **La probabilité d'erreur  $P_e$  par bit transmis** : Il permet d'évaluer la qualité d'un système de transmission. Elle est fonction de la technique de transmission utilisée, mais aussi du canal sur lequel le signal est transmis. Il est à noter que  $P_e$  est une valeur théorique dont une estimation non biaisée au sens statistique est le **Taux d'Erreur par Bit** TEB.
- **L'occupation spectrale du signal émis** : Elle doit être connue pour utiliser efficacement la bande passante du canal de transmission. On est contraint d'utiliser de plus en plus des modulations à grande efficacité spectrale.
- **La complexité du récepteur** : Sa fonction est de restituer le signal émis.

## 4.2 Définitions et appellations

**Le symbole** : C'est un élément d'un alphabet. Si  $M$  est la taille de l'alphabet, le symbole est alors dit  $M$ -aire. Lorsque  $M=2$ , le symbole est dit binaire. En groupant, sous forme d'un bloc,  $n$  symboles binaires indépendants, on obtient un alphabet de  $M=2^n$  symboles  $M$ -aires. Ainsi un symbole  $M$ -aire véhicule l'équivalent de  $n=\log_2 M$  bits.

**La vitesse de transmission  $R$**  : C'est le nombre de symboles transmis par second, elle correspond à la fréquence de l'horloge bit et s'exprime en *baud* :  $R = 1/T_B$

**Le débit binaire  $D$**  : Il se définit comme étant le nombre d'éléments binaires transmis par seconde et s'exprime en bits par second (bps). Pour une transmission synchrone bit par bit, le débit binaire correspond à la fréquence de l'horloge bit :  $D = R$ . Mais certains codes utilisent un alphabet à 4 symboles représentatifs de couples d'éléments binaire ou *dibit* (00, 01, 10, 11). Dans ce cas, la vitesse de transmission est le double du débit binaire : 1baud=2bps. D'une façon générale, si on utilise un alphabet à  $M=2^n$  symboles formés de mots binaires à  $n$  bits,  $D$  est lié à  $R$  par la relation :  $D = R \log_2 M$  ou  $D = nR$

Enfin, le débit binaire maximal est limité par les capacités du canal et en particulier par sa bande passante et son rapport signal sur bruit.

$$SNR(dB) = 10 \log \frac{S}{N} \Rightarrow D_{\max} = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \approx \frac{1}{3} (SNR)_{dB}$$

$S$  : puissance associée au signal transmis en terme de moyenne quadratique (elle correspond à la puissance du signal dans une résistance de  $1\Omega$ ).

$N$  : puissance associée aux composants du bruit.

**L'efficacité spectrale** : Elle définit les performances d'une transmission en termes de débit binaire maximal par rapport à un canal de largeur  $B$  donné. Il est exprimé en bps/Hz ( $0 < \eta \leq 8$ ).

$$\eta = \frac{D}{B}$$

L'efficacité spectrale doit être la plus grande possible pour une transmission numérique performante.

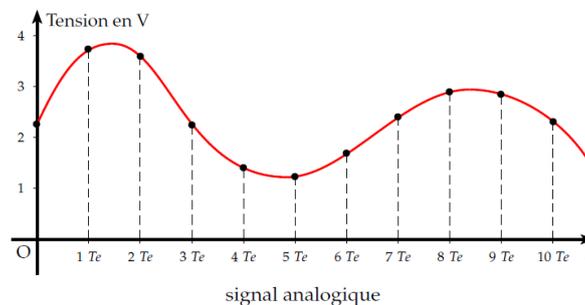
### 4.3 La numérisation

Un signal est la représentation physique d'une information qui est transportée avec ou sans transformation, de la source jusqu'au destinataire. Il en existe deux catégories :

- *les signaux analogiques*, qui varient de façon continue dans le temps (intensité sonore, intensité lumineuse, pression, tension), c'est-à-dire qu'ils peuvent prendre une infinité de valeurs différentes.
- *les signaux numériques* qui transportent une information sous la forme de nombres.

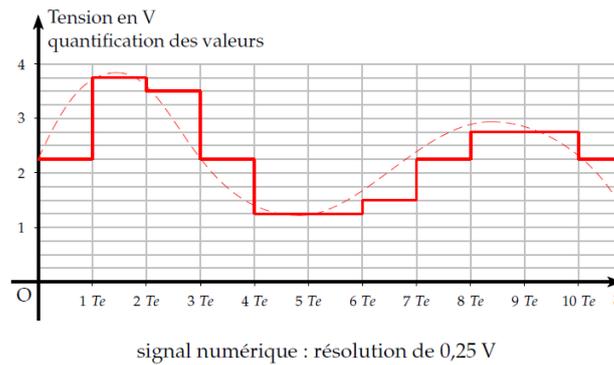
Le signal analogique à convertir est une tension électrique variable issue d'un capteur (microphone par exemple) ou d'un circuit électrique.

On obtient alors la courbe suivante représentant le signal analogique :



**Définition** : Numériser un signal analogique consiste à transformer les grandeurs continues dans le temps en des grandeurs discontinues qui varient par palier en prenant des valeurs à intervalle de temps régulier : période d'échantillonnage  $T_e$ .

La numérisation est faite à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique (CAN)



*Remarque* : La numérisation est d'autant meilleure que le signal numérique se rapproche du signal analogique initial.

La numérisation d'un signal nécessite trois étapes :

- L'échantillonnage
- La quantification
- Le codage

#### 4.3.1 L'échantillonnage

**Définition** : On appelle période d'échantillonnage  $T_e$  (en s), le temps entre deux mesures successives. La fréquence d'échantillonnage  $f_e$ , correspond au nombre de mesures effectuées par seconde. On a :  $f_e = 1/T_e$

**Remarque** : Le choix de la fréquence d'échantillonnage est crucial afin de reproduire fidèlement le signal étudié. En effet si le signal analogique varie trop vite par rapport à la fréquence d'échantillonnage, la numérisation donnera un rendu incorrect.

#### **Théorème de Shannon :**

Pour un signal périodique (comme un son) la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  doit être au moins le double de la fréquence maximale  $f_{max}$  du signal :  $f_e > 2f_{max}$ .

**Exemple** : Les fichiers audio sont couramment échantillonnés à 44,1 kHz, car cela permet de restituer des sons dont la fréquence peut aller jusqu'à 22,05 kHz, c'est-à-dire un peu au-delà de la fréquence maximale audible par l'Homme (20 kHz).

#### 4.3.2 La quantification

Un signal numérique ne peut prendre que certaines valeurs : c'est la quantification. Elle s'exprime en bits. Cette quantification est assurée par un convertisseur (CAN). Chaque valeur est arrondie à la valeur permise la plus proche par défaut. On appelle alors **résolution ou pas** l'écart (constant) entre deux valeurs permises successives.

*D'une autre manière, la quantification consiste, pour chaque échantillon, à lui associer **une** valeur d'amplitude. Cette valeur de l'amplitude s'exprime en « bit » et l'action de transformer la valeur numérique de l'amplitude en valeur binaire s'appelle le **codage**.*

*Remarque : Un **bit** (de l'anglais *binary digit*) est un chiffre binaire (0 ou 1). C'est la plus petite unité de numérisation.*

On définit alors un multiple du bit : l'**octet**. Un octet est un ensemble de 8 bits. On peut donc quantifier  $2^8 = 256$  valeurs avec un octet. Par exemple 01001001.

*En résumé, L'échantillonnage consiste à prélever périodiquement des échantillons d'un signal analogique. La quantification consiste à affecter une valeur numérique à chaque échantillon prélevé. Plus la fréquence d'échantillonnage et la quantification sont grandes, meilleure sera la numérisation.*

### 4.3.3 Le codage

Définition: On appelle codage la transformation des différentes valeurs quantifiées en langage binaire.

Le codage en bande de base, ou codage par mode consiste à faire correspondre une forme de signal électrique ou optique à un ou plusieurs éléments binaires de la source. Le codeur transforme une suite de bits  $\{a_i\}$  en une suite de symboles  $\{d_k\}$  pris dans un alphabet de  $q$  symboles. Les  $d_k$  ont, en principe, toutes les mêmes durées.

Les raisons de coder l'information par modes sont :

- De produire un signal sans composante continue qui puisse être transmis sur les lignes.
- D'enrichir le signal en transitions pour faciliter la récupération d'horloge dans les régénérateurs. Les longues suites de 0 ou de 1 doivent donc être codées pour éviter des états durables sans transition.
- De concentrer ou de déplacer la puissance dans une plage spectrale adaptée au milieu de transmission. Même sans composante continue, un signal numérique synchrone non codé a une densité spectrale concentrée sur la fréquence nulle, plage qui n'est pas transmise convenablement dans certains canaux (forte distorsion).

Le codage par mode est aussi appelé *codage de ligne* puisqu'il consiste à adapter la forme du signal à la ligne, ou plus généralement au milieu de propagation.

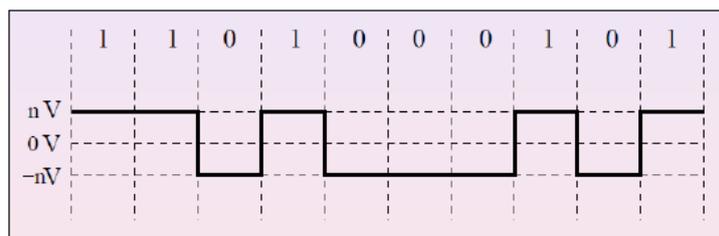
#### 4.3.3.1 Le codage NRZ bipolaire

On code le bit 1 par un signal de  $n$  volts et le bit 0 par un signal opposé. Utilisation port série RS – 232.

*Inconvénients :*

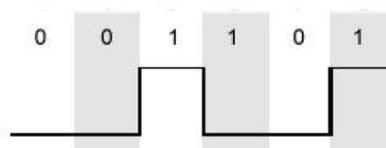
- Sensible aux inversions de polarité
- Possibilité de longue séquence identique :
- Synchronisation difficile : ce format ne présente aucune raie spectrale à la fréquence rythme ou fréquence de bit

La densité spectrale se situe dans les basses fréquences



#### 4.3.3.2 NRZI (NRZ, invert on ones)

Le voltage est constant pendant la durée du bit. Pas de transition = 0. Transition de haut à bas ou de bas à haut = 1. On peut inverser les fils



#### Désavantages des codes NRZ

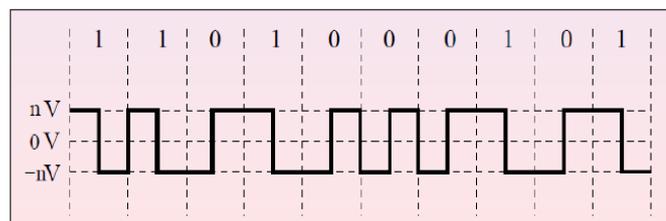
- Difficile de dire où commence et finit un bit
- Avec des longues séries de 1 ou de 0 le récepteur peut se désynchroniser

#### Codage bi-phasé (Bi-Phase Encoding)

- Force au moins une transition à chaque bit
- Cela permet de toujours synchroniser le récepteur
- L'absence de transition pendant un bit indique une erreur

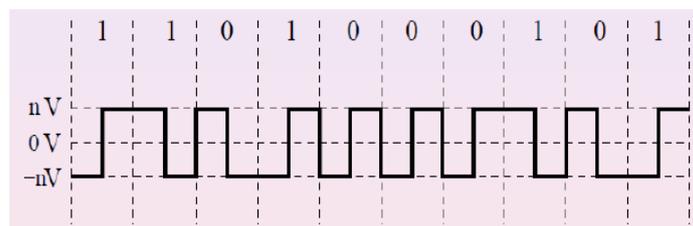
### 4.3.3.3 Manchester

- Code biphase. 1 est codé par un passage de la tension  $n$  (V) à  $-n$  (V) et 0 par le passage en sens inverse. Utilisation Ethernet 10Base5, 10Base2, 10Base-T, 10Base-FL.
- Pas de composante continue car la moyenne est nulle : possibilité de transmettre une tension d'alimentation.
- Pas de perte de synchronisation car il n'y a pas de grande suite de symbole identiques : la composante du spectre autour de la fréquence de bit est non nulle.
- *Problème* : sensible aux inversions de polarité.



### 4.3.3.4 Manchester Différentiel

- Code biphase différentiel. Le bit 0 est codé par un changement d'état en début d'horloge. Le bit 1 est codé par une conservation de l'état précédent en début d'horloge.
- Il est insensible aux inversions de fils dans le câblage
- Pas de composante continue car la valeur moyenne est nulle : possibilité de transporter une tension d'alimentation.
- Le spectre occupe une large bande.



### 4.3.3.5 Le codage de Miller

Un 1 est codé en utilisant une impulsion de Manchester (impulsion de durée  $T_b$  avec inversion de polarité au milieu de l'impulsion) et un 0 est codé sous forme d'impulsion rectangulaire de durée  $T_b$  sans changement de polarité. Les longues suites de 0 posant toujours le problème de

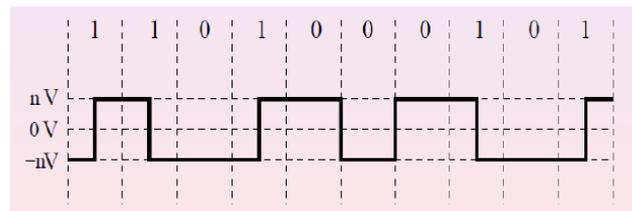
la synchronisation, si un bit 0 est suivi d'un autre 0, une transition est ajoutée à la fin du temps d'horloge.

*Avantage :*

- Bande passante réduite
- Pas de perte de synchronisation

*Inconvénient :*

- Apparition d'une composante continue



#### 4.4 Canal de transmission

Par canal de transmission on entend tout phénomène physique identifié et délimité sur le support physique et capable de véhiculer un signal : fil de cuivre, atmosphère (pour les transmissions hertziennes ou autrement dit ondes radio) ou fibre de verre (fibre optique). Le signal est transporté sous la forme d'une onde ou d'une oscillation faisant varier une caractéristique physique du support : différence de potentiel électrique le plus souvent, onde radio électrique ou intensité lumineuse dans le cas de la fibre optique.

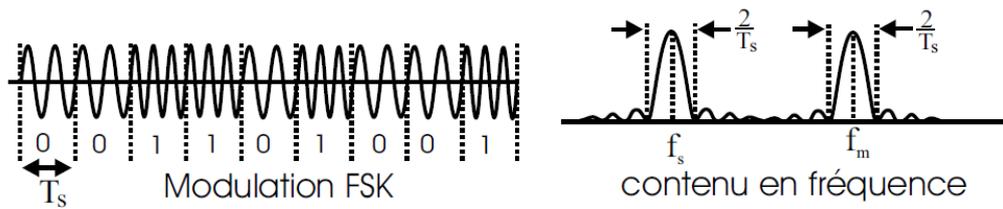
#### 4.5 Modulation numérique de porteuse

**Dans ce chapitre on va s'intéresser au principe de la modulation/démodulation FSK et OOK, les différents types de la modulation seront étudiés en détail dans le module « communications numériques » unité d'enseignement 3.2.1 du semestre 6.**

##### 4.5.1 Modulation en fréquence (FSK : Frequency Shift Keying)

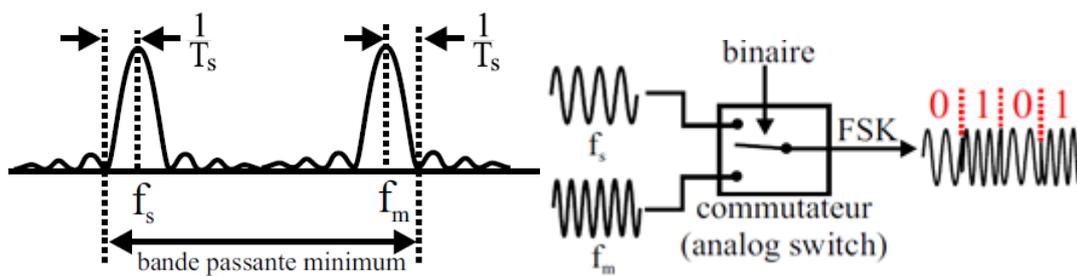
Lorsque la valeur binaire est 0, on envoie une fréquence  $f_s$  (*Space frequency*) et lorsque la valeur binaire est 1, on envoie une autre fréquence  $f_m$  (*Mark Frequency*).

$T_s$  est la durée d'un symbole. Il n'y a que 2 symboles possibles, soit une fréquence  $f_s$ , soit une fréquence  $f_m$ .



Le spectre ou le contenu en fréquence d'un signal FSK est constitué de 2 raies, une à la fréquence  $f_s$  et l'autre à la fréquence  $f_m$ . La largeur des raies dépend de la durée des symboles.

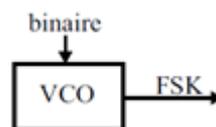
La bande passante minimum théorique de la ligne de transmission pour passer correctement un signal FSK est  $f_m - f_s + 2/T_s$ . Pour une application réelle, il faut garder une bande passante un peu plus grande pour tenir compte du fait que les filtres ne sont pas parfaits.



### Modulateurs FSK

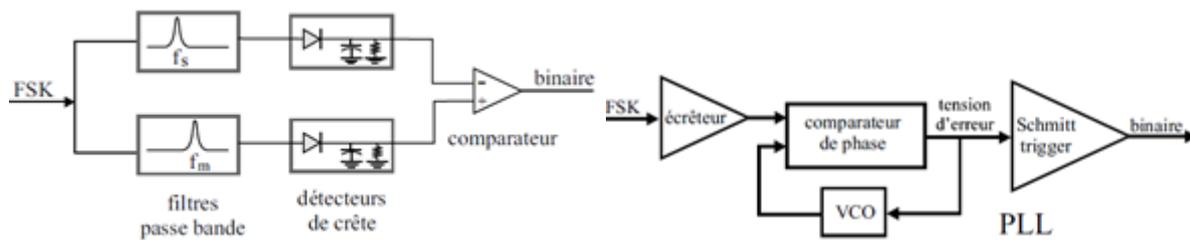
On peut utiliser deux (02) porteuses et un commutateur pour sélectionner la fréquence de la porteuse selon la valeur du binaire. Cette méthode est simple mais il y a des discontinuités de la porteuse au moment du changement de fréquence. Le modulateur MSK (Minimum Shift Keying) élimine cette discontinuité en choisissant des fréquences de porteuse qui sont des multiples impairs de la demi fréquence binaire ( $f_s$  et  $f_m = n(f_p/2)$  où  $n$  est un entier impair et  $f_p$  est la fréquence du binaire en bit par second)

Une autre façon de moduler en FSK est d'utiliser la tension du signal binaire pour changer la fréquence d'un oscillateur VCO (Voltage Controlled Oscillator). La transition est progressive et se fait en douceur.



### Démodulateurs FSK

On peut utiliser deux (02°) filtres comme sur la figure ci-contre. La tension crête de la sortie des deux filtres est entrée dans le comparateur qui décide laquelle des deux fréquences est la plus importante. Si l'amplitude de la fréquence « mark » est la plus grande, alors c'est un 1.



Une autre façon de démoduler un signal FSK est d'utiliser un PLL (Phase Lock Loop). Un  cr teur élimine les trop hautes tensions qui pourraient endommager le circuit. Le comparateur de phase génère une tension d'erreur qui est proportionnelle à la différence de fréquences entre ses deux entrées. Cette tension d'erreur contrôle la fréquence d'un VCO. Si la fréquence du VCO est inférieure à celle du FSK, alors le comparateur de phase génère une tension qui fait augmenter la fréquence du VCO. Si la fréquence du VCO est supérieur à celle du FSK, alors le comparateur de phase génère une tension qui fait diminuer la fréquence du VCO. Il s'ensuit que la tension d'erreur s'ajuste pour que la fréquence du VCO devienne égale à celle du FSK. Lorsque la fréquence du FSK change (en fonction du binaire), la tension d'erreur change aussi (il y a une tension qui permet de reproduire la fréquence *space* et une autre tension qui permet au VCO de générer la fréquence *mark*) reproduisant ainsi le binaire. Enfin un Schmitt trigger change les niveaux de tension pour les rendre conformes.

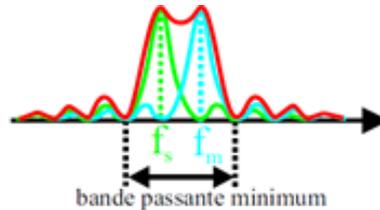
La modulation FSK est simple et résiste très bien au bruit mais demande une grande bande passante car il faut au moins passer les deux fréquences. Dans le but d'augmenter l'efficacité spectrale, on utilise d'autres types de modulations qui n'utilisent qu'une seule fréquence.

### ***Efficacité spectrale***

L'efficacité spectrale est définie comme étant le nombre de bits par secondes qu'on peut passer par Hertz de bande passante. Ainsi, par exemple, avec une efficacité spectrale de deux (02) et une bande passante de 50 kHz, on peut transmettre du binaire à la vitesse de 100 kbps. Comme autre exemple, pour passer du binaire à 300 kbps avec une efficacité de 3, on a besoin d'une bande passante de 100 kHz.

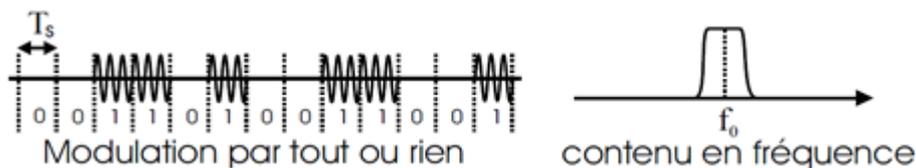
Pour augmenter l'efficacité spectrale du FSK, il faut rapprocher les deux fréquences *space* et *mark*. Cependant si on rapproche trop les deux fréquences, la modulation devient difficile. On choisit habituellement un écart, entre les deux fréquences, égale au débit binaire. Avec cet écart, le maximum d'une fréquence correspond au passage à zéro de l'autre fréquence, ce qui rend la démodulation facile et très résistante au bruit. La bande passante minimum est alors 03

fois le débit binaire pour une efficacité spectrale de 0.33. La figure ci-contre nous montre en vert le spectre émis lorsque le niveau binaire est 0 et en bleu le spectre binaire émis lorsque le niveau binaire est 1. En rouge nous avons la somme des deux telle que vue avec un analyseur spectral.



#### 4.5.2 Modulation par tout ou rien (OOK : Frequency Shift Keying)

C'est la modulation la plus simple, elle consiste à moduler directement la porteuse par le signal binaire 0 ou 1 (0 est l'absence de porteuse et 1 la présence de la porteuse).



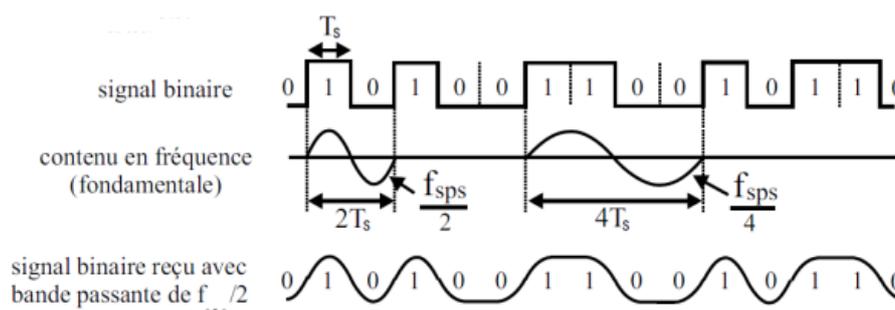
Le spectre (ou le contenu en fréquence) donne une seule raie à la fréquence de la porteuse ( $f_0$ ). La largeur de la raie dépend de la durée des symboles. Comme il n'y a qu'une seule raie à passer, la bande passante minimum requise est plus petite.

#### Théorème de Nyquist sur la bande passante minimum

Nyquist a énoncé un théorème sur la vitesse maximum théorique qu'on peut atteindre en modulant une porteuse à fréquence unique. La modulation peut se faire en amplitude, en phase ou une combinaison des deux. Voici le théorème :

*La vitesse théorique maximum qu'on peut atteindre avec des filtres adéquats parfaits est de 1 symbole par seconde par Hertz de bande passante.*

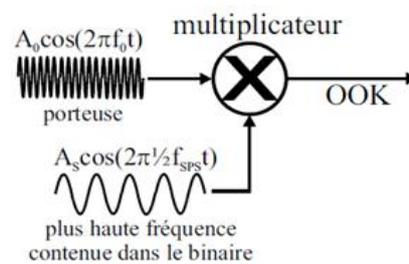
#### Démonstration:



Le signal binaire peut être décomposé en une somme de sinus (théorème de Fourier). Pour être capable de démoduler correctement le signal, on n'a pas besoin de toutes les harmoniques et seule la fréquence fondamentale est nécessaire. La plus haute fréquence est lorsque le signal binaire alterne sans arrêt. Si on passe cette fréquence (et les plus basses), alors on pourra reconstruire correctement le signal binaire. Concentrons-nous sur cette plus haute fréquence. Sa période correspond à la durée de deux (2) symboles. Sa fréquence donc la moitié de la fréquence en symbole par second ( $1/2 f_{sps}$ ).

Pour générer le signal OOK, on multiplie la porteuse par le signal binaire 0 ou 1 (la multiplication par 0 donne l'absence de porteuse et la multiplication par 1 donne la porteuse). Pour déterminer la bande passante minimum, nous allons calculer le spectre OOK obtenu en multipliant la porteuse par l'onde fondamentale de la plus haute fréquence contenue dans le binaire. L'équation de la porteuse est  $A_0 \cos(2\pi f_0 t)$  ou  $A_0$  est l'amplitude et  $f_0$  la fréquence de la porteuse. L'équation de la fondamentale de la plus haute fréquence contenue dans le signal binaire est  $A_s \cos(2\pi \frac{1}{2} f_{sps} t)$  ou  $A_s$  est l'amplitude et  $1/2 f_{sps}$  la fréquence de l'onde. Le signal modulé est la multiplication des deux ondes :

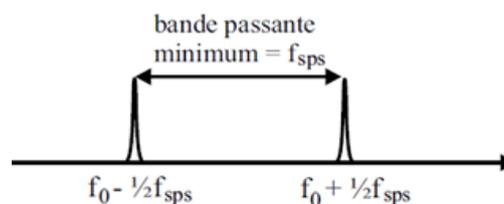
$$A_0 \cos(2\pi f_0 t) \times A_s \cos(2\pi \frac{1}{2} f_{sps} t)$$



En appliquant les formules trigonométriques, nous obtenons :

$$\frac{1}{2} A_0 A_s \left\{ \cos\left(2\pi\left(f_0 - \frac{1}{2} f_{sps}\right)t\right) + \cos\left(2\pi\left(f_0 + \frac{1}{2} f_{sps}\right)t\right) \right\}$$

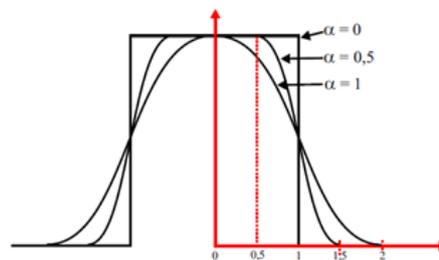
Le spectre ne contient que deux (2) fréquences, une à  $f_0 - 1/2 f_{sps}$  et autre à  $f_0 + 1/2 f_{sps}$ .



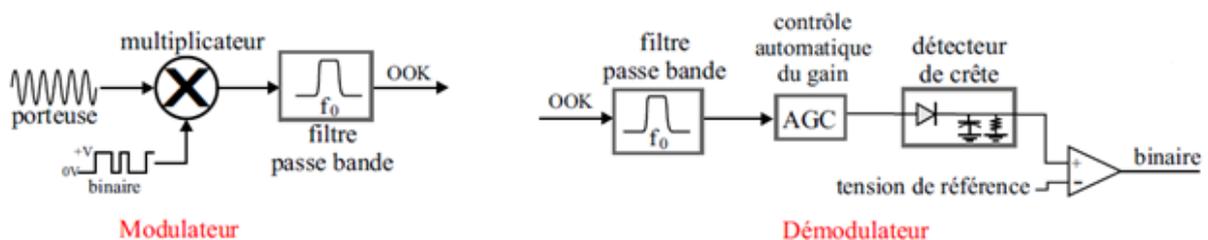
Ceci est le spectre avec seulement la fréquence la plus haute. Si on ajoute les autres fréquences fondamentales (plus basses) que contient le signal binaire, cela remplit l'espace entre ces deux raies. La bande passante minimum pour passer correctement un signal OOK est donc de fsp. Cela veut dire que le nombre de symboles par seconde est égale au nombre de Hz de bande passante. C'est le théorème de **Nyquist**. Ceci est une valeur théorique et pour une application réelle, la bande passante nécessaire est un peu plus grande, ce qui réduit l'efficacité spectrale. La démodulation a été faite avec une modulation OOK, mais le théorème s'applique à toute modulation à fréquence unique.

Le théorème de **Nyquist** nous permet de calculer la bande passante minimum si on utilise un filtre parfait quelquefois appelé « filtre en mur de brique » pour montrer que sa coupure est verticale. Pour un filtre passe bande réel, la coupure n'est pas parfaitement verticale.

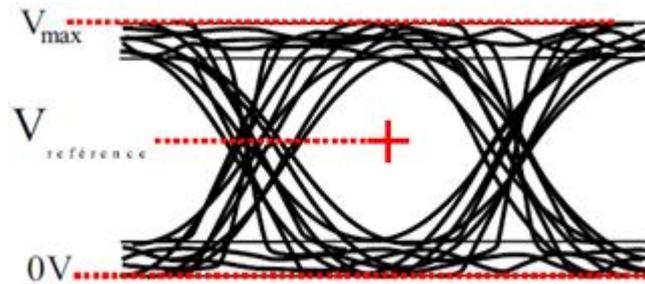
Les filtres sont classés selon la façon dont la coupure est faite. La figure ci-contre nous montre certains filtres passe bande de Nyquist. La façon dont la coupure est arrondie est classée selon l'indice  $\alpha$  appelée « roll-off factor ». Pour un filtre parfait ( $\alpha=0$ ), le théorème de Nyquist stipule que la bande passante minimum est de fsp. Pour un filtre réel, la bande passante requise augmente et vaut environs  $f_{sp}(1+\alpha)$  ou fsp est le nombre de symboles par seconde et  $\alpha$  le facteur de « roll-off » du filtre.



## Modulateur et démodulateur OOK



Pour le récepteur, une tension supérieure à la tension de référence indique un niveau logique 1 et une tension inférieure à la référence indique un niveau logique 0. Il nous faut déterminer précisément la tension de référence qui correspond au centre de l'œil. Cette tension est environs la moitié de la tension maximum. Pour éviter les erreurs dues à l'atténuation du signal, il faut ajouter au récepteur un contrôle de gain automatique qui maintient l'amplitude toujours au même niveau.



Pour diminuer les erreurs dues à l'atténuation, on utilise une modulation BPSK pour laquelle la tension de sortie est soit positive pour un niveau logique 1, soit négative pour un niveau logique 0. Le niveau de comparaison est toujours  $0V$  et n'a pas besoin d'être ajusté. Cette modulation résiste donc mieux au bruit et à l'atténuation.



**TRAVAUX DIRIGÉS**

## TD - 00

## Rappel : TRIGONOMETRIE

## Exercice 1

1. Pour tout réel  $x$ , simplifier l'expression :  $A(x) = \cos(3\pi - x) + \cos\left(\frac{\pi}{2} + x\right) + \cos\left(-\frac{3\pi}{2} - x\right)$
2. Simplifier au maximum, pour tout réel  $x$ , l'expression :  $(1 - \cos(x))(1 + \cos(x))$
3. Démontrer que pour tout réel  $x$ ,  $\cos(2x) = 2\cos^2(x) - 1$
4. Déterminer une valeur exacte de  $x$  sachant que :  $\sin(x) = \frac{\sqrt{3}}{2}$  et  $\cos(x) = -\frac{1}{2}$
5. Résoudre dans  $\mathfrak{R}$  les deux équations suivantes :  $\cos\left(3x + \frac{\pi}{4}\right) = \cos\left(x + \frac{\pi}{4}\right)$  et  $\cos(2x) = \cos(3x)$

## Exercice 2

1. Représenter graphiquement les fonctions :

$$f(x) = \sin(x), g(x) = \sin(1.5x), h(x) = f(x) + g(x) \text{ pour } 0 \leq x \leq 4\pi$$

2. Est-ce que la fonction  $h(x)$  est périodique ? si oui quelle est sa période ?
3. Trouvez les racines de  $h(x)$

## Exercice 3

Soit  $f$  la fonction définie sur  $\mathfrak{R}$  par  $f(x) = \sin(2x)$ . On note  $(C)$  la représentation graphique de  $f$  dans un repère orthonormal  $(O; \vec{i}; \vec{j})$

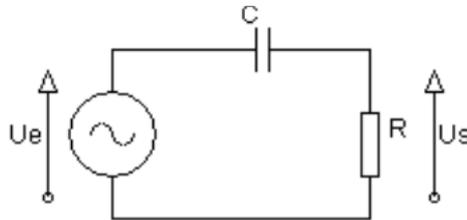
1. Calculer :  $f(0), f\left(\frac{\pi}{6}\right), f\left(\frac{\pi}{12}\right), f\left(\frac{\pi}{2}\right), f\left(\frac{\pi}{8}\right), f(\pi)$
2. Montrer que  $f$  est impaire. Que peut-on en déduire pour la courbe représentative  $(C)$  ?
3. Soit  $x$  un nombre réel. Comparer  $f(x + \pi)$  et  $f(x)$ . Que peut-on en déduire pour  $f$  ?
4. Démontrez que la fonction  $f$  est strictement croissante sur  $\left[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right]$  puis strictement décroissante sur  $\left[\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}\right]$ .
5. Représenter graphiquement la fonction  $f$  sur l'intervalle  $\left[-\frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}\right]$ .

## TD - 01

## Filtres électriques

## Exercice 1

Soit le filtre RC suivant :



1. Exprimer la fonction de transfert ( $H = U_s / U_e$ ) en fonction de  $R$  et  $C$ .
2. Quel est le type de ce filtre et quel son ordre ?
3. Exprimer la fréquence de coupure  $f_c$  en fonction de  $R$  et  $C$ .
4. Calculer la valeur du condensateur ainsi que la valeur de la tension de sortie du filtre pour  $f_c = 627$  kHz,  $R = 6,8$  k $\Omega$  et  $U_e = 2$  V

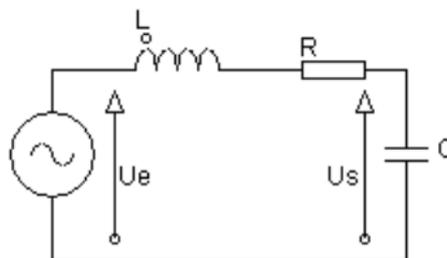
## Exercice 2

1. Donner le schéma d'un filtre RL passe-haut 1er ordre.
2. Exprimer sa fonction de transfert  $H =$  tension d'entrée / tension de sortie.

La résistance  $R$  est de 10 k $\Omega$  et la fréquence de coupure  $f_c$  est de 3,5 KHz. Une tension de 1,6 V est mesurée à la sortie du filtre lorsqu'un signal de  $K$  MHz est appliqué à l'entrée.

3. Calculer la valeur de la bobine ainsi que la valeur de la tension à l'entrée du filtre

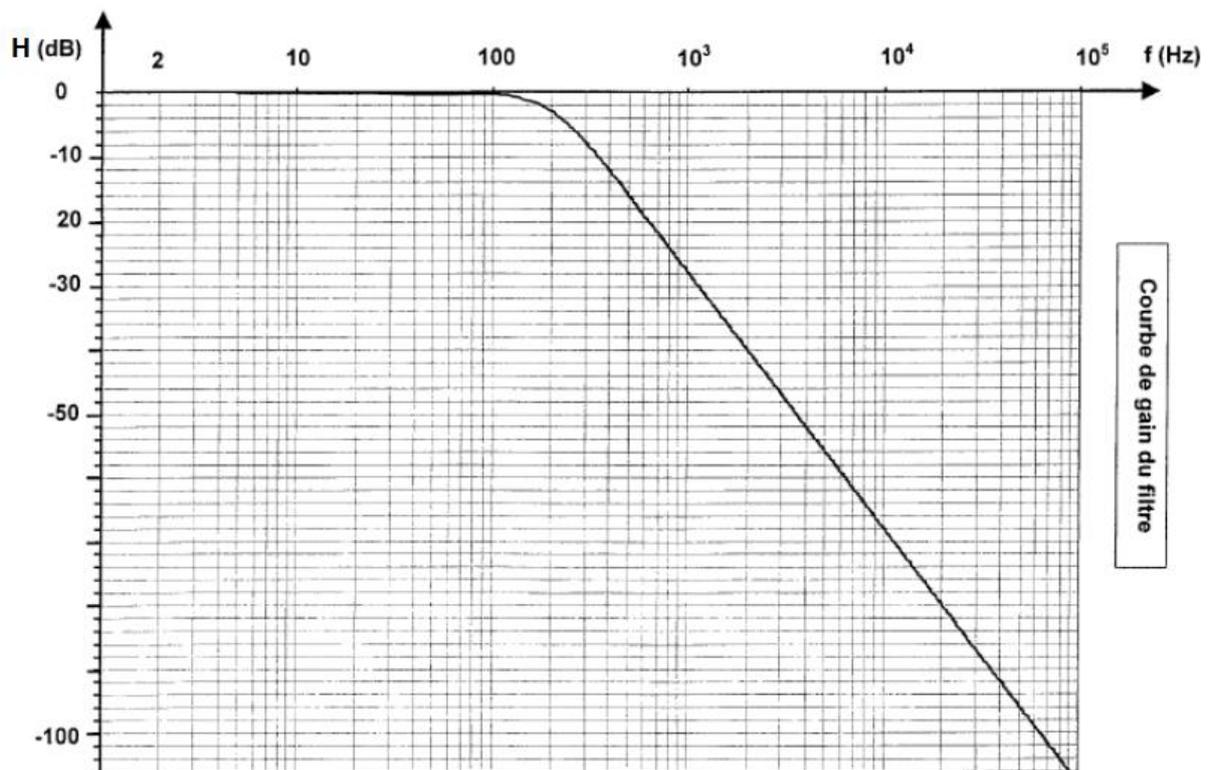
## Exercice 3



La courbe de gain  $H_{dB} = 20 \log H$ , ( $H = U_s / U_e$ ) en fonction de la fréquence est donnée ci-dessous.

1. Déterminer graphiquement la fréquence de coupure à -3dB du filtre.

- Déterminer les valeurs du gain dans le cas où  $f < 10\text{Hz}$  et dans le cas où  $f = 20\text{kHz}$ . En déduire les valeurs de  $G$  correspondantes.
- Calculer l'amplitude de la tension de sortie si la tension d'entrée a pour amplitude  $24,8\text{V}$  et pour fréquence  $f = 20\text{kHz}$ .
- Si la tension d'entrée est une tension continue  $v$ , quelle est alors la tension de sortie.

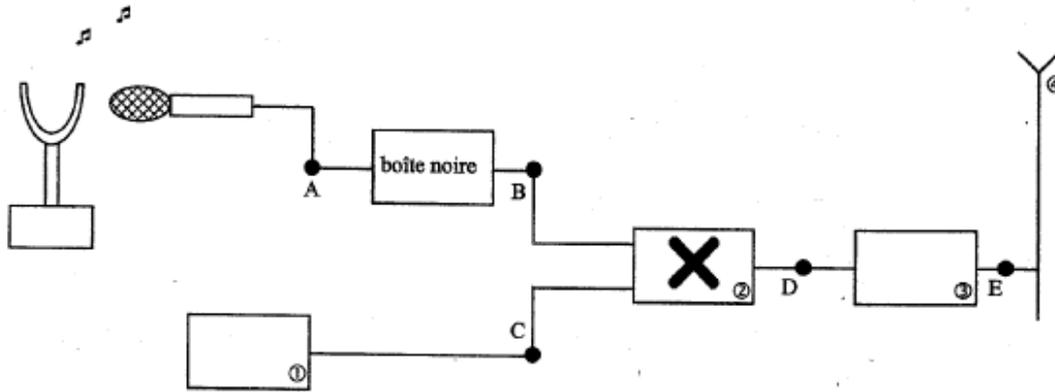


## TD- 02

## Modulation analogique

## Exercice 1

Le schéma 1 suivant représente la chaîne simplifiée de transmission d'un son par modulation



d'amplitude. Elle est constituée de plusieurs dispositifs électroniques.

1. Parmi les cinq propositions ci-dessous, retrouver le nom des quatre dispositifs électroniques numérotés.

Dispositifs électroniques : Antenne, amplificateur HF (Haute Fréquence), générateur HF (Haute Fréquence), multiplieur, voltmètre.

2. Quels sont les signaux obtenus en B, C et D parmi ceux cités ci-dessous ?

- *Porteuse notée*  $u_P(t) = U_{P(\max)} \cos(2\pi Ft)$
- *Signal modulant BF noté*  $u_S(t) + U_0$
- *Signal modulé noté*  $u_m(t)$

3. Le signal électrique recueilli en A à la sortie du microphone correspond à la tension  $u_S(t)$ . Une boîte noire est intercalée entre les points A et B. Quel est son rôle ?

4. Le dispositif électronique ② effectue une opération mathématique simple qui peut être :

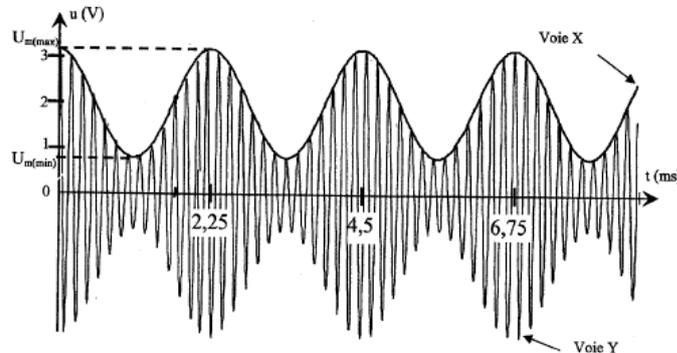
- $(u_S(t) + U_0) + u_P(t)$
- $(u_S(t) + U_0) \times u_P(t)$

Choisir la bonne réponse sachant que l'expression mathématique du signal obtenu est :

$$u_m(t) = k (U_0 + u_S(t)) U_{P(\max)} \cos(2\pi Ft)$$

## Exercice 2

La voie X d'un oscilloscope bi-courbe est reliée en B et la voie Y est reliée en D. L'oscillogramme obtenu est le suivant :



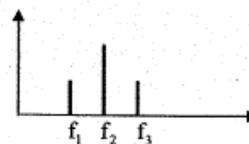
1. Estimer les valeurs des périodes  $T_s$  et  $T_p$  du signal modulant et de la porteuse.
2. Rappeler l'expression théorique de la fréquence  $f$  en fonction de la période  $T$  avec les unités, puis calculer les fréquences  $f$  du signal modulant et  $F$  de la porteuse.
3. L'amplitude de la tension du signal modulé  $u_m(t)$  varie entre deux valeurs extrêmes, notées respectivement  $U_{m(max)}$  et  $U_{m(min)}$ . Le taux de modulation  $m$  s'exprime par :

$$m = \frac{U_{m(max)} - U_{m(min)}}{U_{m(max)} + U_{m(min)}}$$

- 3.1. Calculer les valeurs des tensions maximale  $U_{m(max)}$  et minimale  $U_{m(min)}$  du signal modulé. En déduire la valeur de  $m$ .
- 3.2. À quoi correspondrait un taux de modulation  $m$  supérieur à 1 ?
4. Le taux de modulation s'exprime aussi en fonction de la tension maximale du signal

modulant  $U_s(max)$  et la tension  $U_0$  selon l'expression suivante :  $m = \frac{U_{s(max)}}{U_0}$

- 4.1. Quelle condition doit-on satisfaire pour obtenir un taux de modulation  $m < 1$  ?
- 4.2. Quelle autre condition est nécessaire pour obtenir une bonne modulation ?
- 4.3. L'analyse en fréquence du signal montre que celui-ci est composé de trois fréquences  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ . En fonction de la fréquence du signal modulant  $f$  et de la fréquence de la porteuse  $F$ , exprimer les fréquences apparaissant sur le spectre ci-dessous.



**TD- 03****Transmission Numérique****Exercice 1**

1. Rappeler les 3 étapes de la numérisation d'un signal analogique (ex : parole) et décrivez les brièvement ?

2. Conclure sur le débit de base du signal de parole numérisé ?

*Indications : pour la parole,  $F_e = 8000$  Hz soit 8000 éch/sec le codage se fait sur 8 bit.*

3. Quels sont les avantages de la numérisation ?

4. Un microphone relié à un système d'acquisition reçoit un son. Le signal électrique sera numérisé. L'amplitude du signal après amplification est au maximum de 3,5V. La numérisation se fait sur la base d'une amplitude de 3,5V soit 7V crête à crête.

Supposons que la place réservée en mémoire pour la numérisation est de 4 octets : 2 octets pour le temps, 2 octets pour la tension.

- Combien de valeurs différentes peuvent être codées avec 2 octets ?
- Calculer l'écart maximal entre une valeur analogique de la tension et sa valeur numérisée.
- Comparer l'écart précédent à la précision du système d'acquisition si elle est de l'ordre de 1mV. Conclure.

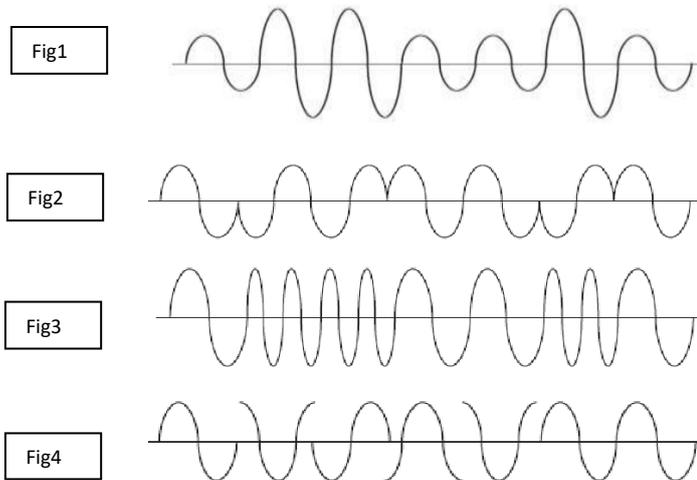
*L'opérateur décide de réaliser l'acquisition de 201 points sur une durée de 50ms.*

- Avec quelle période le système d'acquisition réalise-t-il les mesures ? Quelle est la fréquence associée, appelée **fréquence d'échantillonnage**.

*Le théorème de Nyquist-Shannon énonce que la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale au double de la fréquence maximale du signal analogique.*

**Exercice 2**

1. Donner le type de modulation et la suite binaire associé à chaque signal représenté dans les figures 1, 2, 3 et 4.



Soit un système de modulation numérique d'amplitude (ASK). On a  $s(t) = x(t) \cdot \cos(\omega t)$

2. Rappeler le principe de démodulation cohérente (qui permet de récupérer à la réception  $x(t)$  à partir de  $s(t)$ ).

**Exercice 3**

1. Pour un modulateur FSK avec fréquence « space » de 80 MHz, fréquence « Mark » de 100 MHz et un débit binaire de 5Mbps, déterminer :
  - a. Le nombre de bits par symbole,
  - b. La bande passante minimum requise pour la ligne de transmission, et
  - c. L'efficacité spectrale.
2. Pour un modulateur OOK avec fréquence de porteuse à 1GHz et un débit binaire de 10Mbps, calculer :
  - a. Le nombre de bits par symboles,
  - b. La bande passante minimum avec un filtre ayant un  $\alpha = 0.35$ , et
  - c. L'efficacité spectrale.

---

## Références

1. Arnaud Bournel, « Systèmes de Télécommunications Partie I : Introduction et circuits "télécom" » cours Systèmes de Télécommunications, DESS Réseaux et Télécom, Université Paris XI, 2002-2003.
2. M.T. Benhabiles « télécommunications fondamentales » cours Télécommunication, Socle commun, Sciences et Technologies, 4ème semestre, Université des Frères Mentouri Constantine 1, 2016.
3. Claude Servin, Télécoms 1 : De la transmission à l'architecture des réseaux, 2<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris, 2000, ISBN 2 10 005173 3
4. Pierre-Gérard Fontolliet, Systèmes de télécommunications, Traité d'électricité, 1999, ISBN 2-88074-313-3, Presses polytechniques et universitaires romandes, CH – 1015 Lausanne.
5. Daniel Battu, Télécommunications : Principes, infrastructures et services, 2<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris, 2001, ISBN 2 10 005530 5
6. Lexique de termes et acronymes reseaux & telecommunications, Hervé Frenot - Edition 09/2015, <http://lexique.reseaux.free.fr>
7. Frédéric Payan, « UE3 - T1 : Signaux & Systèmes » cours, IUT Nice Côte d'Azur - Département R&T, Université de Nice Sophia Antipolis, 2012
8. Frédéric Launay, « cours traitement du signal » Cours 1ere Année : Télécommunication TEL1, Département R&T – IUT de Poitiers site de Chatellerault, 2007.
9. Frédéric Launay, « cours modulation analogique » Cours 1ere Année : Télécommunication TEL1, Département R&T – IUT de Poitiers site de Chatellerault, 2007.
10. <http://ressource.electron.free.fr/bts/cours/le-filtrage-actif-passif.pdf>
11. Sylvie Lebrun, « Filtrage analogique » IOGS 1A 2015, institut d'optique, graduate school, Palaiseau, France
12. Marc Van Droogenbroeck, « Principes des télécommunications analogiques et numériques » Institut Montefiore, Service de Télécommunications et d'Imagerie, université de Liège, 2013
13. Danièle Dromard, Dominique Seret « Architecture des réseaux » Pearson France, 2010
14. Louis Trussart, Modulation numérique de porteuse, Cours: 243-325-SL, Communications analogiques, Département d'électronique, Cégep de Saint-laurent