

*MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE*

*UNIVERSITE SAAD DEHLAB, BLIDA 1*



*FACULTE DE TECHNOLOGIE*

*DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE*

Polycopié de Cours

## **Télécommunications Fondamentales**

Destiné aux étudiants de la 2<sup>ème</sup> années Licence en Télécommunications

Réalisé par

Dr. BENDOUMIA Rédha

Janvier 2024

## Table de matières

<b>Avant-propos</b>	
<b>Introduction Générale.....</b>	01
<b>Chapitre I : Généralités sur les Télécommunications</b>	
1.1. Définitions.....	02
1.2. Historique et évolution des télécommunications .....	03
1.3. Normes et standards de télécommunications.....	12
<b>Chapitre II : Systèmes de communication</b>	
2.1. Sources et signaux des télécommunications .....	16
2.2. Principes d'un système de communication .....	21
2.3. Support de transmission.....	22
<b>Chapitre III : Techniques de transmission analogiques</b>	
3.1. Classifications de signaux.....	29
3.2. Signaux élémentaires .....	32
3.3. Analyse de Fourier .....	35
3.4. Principe de la transmission analogique .....	37
3.5. Filtrage .....	39
3.6. Amplification .....	44
3.7. Modulation .....	48
3.8. Mélange .....	58
<b>Chapitre IV : Techniques de transmission numérique</b>	
4.1. Principe de la transmission numérique.....	60
4.2. Numérisation des signaux .....	61
4.3. Echantillonnage .....	62
4.4. Quantification .....	66
4.5. Codage .....	68
4.6. Canal de transmission .....	73
<b>Conclusion Générale .....</b>	75
<b>Documents de référence</b>	

# **Avant-propos**

Ce polycopié constitue un support de cours du module Télécommunications fondamentales enseigné aux étudiantes de 2<sup>ème</sup> année Licence, Filière : Télécommunications. Le programme proposé sous forme de points dans le cahier de charge a été suivi après une restructuration en quatre chapitres. Le volume horaire hebdomadaire fixé par le cahier de charge est : deux (02) cours et un (01) TD par semaine.

Le cours a pour objectif de fournir une compréhension complète des systèmes de télécommunications, qu'ils soient analogiques ou numériques, en mettant l'accent sur les concepts essentiels et les caractéristiques fondamentales de ces technologies. Au travers de ce cours, les étudiants seront exposés aux principes fondamentaux qui sous-tendent les communications à travers divers supports de transmission, tels que les signaux électriques, les ondes radio, et les données numériques.

## **Introduction générale**

Les télécommunications, telles que nous les concevons aujourd'hui, se définissent comme le moyen de transmettre des informations à distance en utilisant des dispositifs électroniques et informatiques. Cette notion se distingue clairement de la poste traditionnelle, qui a pour rôle de transporter des informations sous forme physique.

De nos jours, nous pouvons caractériser la télécommunication comme le processus consistant à émettre, transmettre à distance et recevoir des informations. Ce processus s'effectue par le biais de divers moyens, qu'il s'agisse de fils, d'ondes radioélectriques, de systèmes optiques ou électromagnétiques. En d'autres termes, la télécommunication représente avant tout un échange d'informations, quels que soient les espaces géographiques en jeu.

Ce qui distingue fondamentalement la télécommunication d'une simple communication ordinaire, c'est l'utilisation d'un support de transmission, qui rend possible la transmission de l'information sur de grandes distances.

Dans ce contexte, ce cours a pour ambition de fournir une vue d'ensemble des principes fondamentaux qui gouvernent les systèmes de télécommunications, qu'ils soient de nature analogique ou numérique. L'objectif principal est d'extraire les caractéristiques minimales essentielles à leur fonctionnement.

La structure du cours se décline en quatre chapitres : tout d'abord, le chapitre 1 pose des bases générales sur les télécommunications, définitions, historique et normes. Ensuite, le chapitre 2 explore en détail les systèmes de communication. Les techniques de transmission analogique sont ensuite présentées dans le chapitre 3. Enfin, le chapitre 4 présente les techniques de transmission numérique.

# CHAPITRE 1

## **Généralités sur les Télécommunications**

Les télécommunications, telles que nous les connaissons aujourd'hui, ont une histoire intéressante. Le terme "télécommunication" lui-même est un mélange de racines grec et latines, "tele" signifiant "loin" en grec et "communicare" signifiant "partager" en latin. Cette combinaison reflète parfaitement la nature essentielle de cette discipline : la transmission à distance de l'information.

Au fil des siècles, les télécommunications ont évolué de simples signaux de fumée et de miroirs réfléchissants à des réseaux mondiaux de communication hautement sophistiqués. Dans ce premier chapitre, nous plongerons dans l'histoire des télécommunications, explorant leur genèse et leur évolution, ainsi que les services offerts par cette technologie révolutionnaire. Nous découvrirons également l'importance des normes et des standards dans le domaine des télécommunications, qui jouent un rôle crucial pour garantir l'interopérabilité des systèmes de communication à l'échelle mondiale.

## 1.1. Définitions

### 1.1.1. Système de communication

Un système de communication au sens large comprend l'ensemble des moyens techniques nécessaires pour transmettre les informations entre deux points a priori quelconques, à une distance quelconque.

### 1.1.2. Information

L'information est la substance ou le contenu essentiel qui est transmis d'un émetteur à un destinataire. Elle peut être sous forme de données ou de connaissances qui ont une signification pour les destinataires.

### 1.1.3. Signal

Un signal est une forme physique ou électrique qui transporte l'information d'un point à un autre dans un système de communication. Il s'agit d'une représentation réelle de l'information, généralement sous forme de variations électriques, optiques ou électromagnétiques. Un signal peut être analogique (représentation continue) ou numérique (représentation discrète).

### 1.1.4. Message

Un message est la forme concrète et structurée de l'information qui est préparée pour la transmission ou la communication. Il est généralement composé de données ou de texte organisés de manière à ce qu'il puisse être transmis efficacement. Un message peut être un texte, une image, un fichier audio, une vidéo, etc.

## 1.2. Historiques et évolution des télécommunications

### 1.2.1. Antiquité : Le carré de Polybios

Le Carré de Polybios, également connu sous le nom de grille de Polybios, est un dispositif de chiffrement historique qui remonte à l'Antiquité grecque, plus précisément à l'époque d'Alexandre le Grand (IVe siècle avant notre ère). Ce dispositif a été attribué à Polybios, un historien et savant grec, bien que son origine exacte reste sujette à débat.

Le Carré de Polybios consiste en une grille rectangulaire (ou carrée) où les lettres de l'alphabet grec sont placées de manière systématique. Traditionnellement, le Carré est de 5x5, bien que des variations puissent exister. Chaque lettre est identifiée par sa position dans la grille, indiquée par les coordonnées de sa ligne et de sa colonne. Par exemple, la lettre "A" pourrait être située à la position (1, 1), la lettre "B" à (1, 2), la lettre "C" à (1, 3), et ainsi de suite.

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

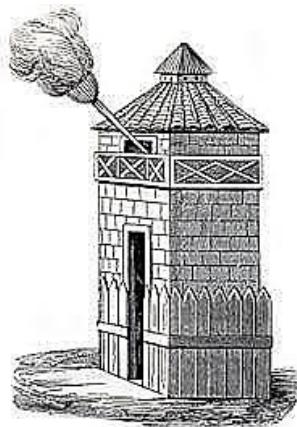
**Figure 1:** Carré de Polybios

**Exemple :**

**Texte :** message secret

**Code :** 32154343112215 431513421544

Les Romains ont mis en œuvre ce système pour transmettre des informations à des endroits éloignés en érigeant des tours de signalisation, également connues sous le nom de tours à feux. Dans ce système, les deux chiffres du code de Polybios étaient symbolisés par l'allumage de deux torches, et le nombre de fois que chaque chiffre était répété était indiqué en brandissant les torches. Pour percevoir ces signaux de loin, une longue lunette était nécessaire.



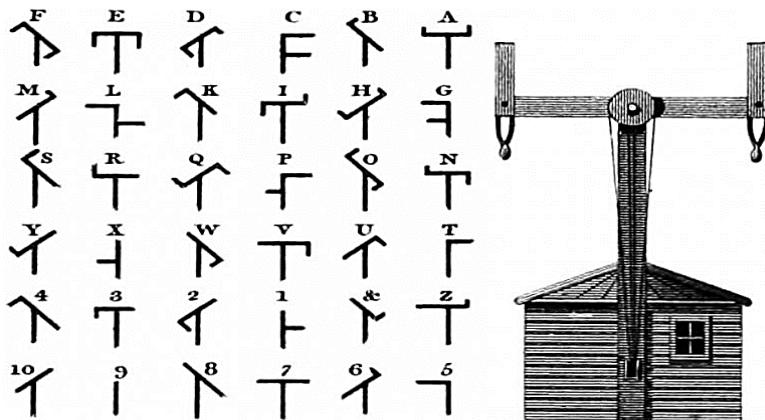
**Figure 2:** Ancien système de communication à base de tours à feux

### 1.2.2. Télégraphe de Chappe

Le télégraphe de Chappe, inventé par les frères français Claude Chappe et Ignace Chappe, était une avancée significative dans la communication à distance. Il se composait de tours de signalisation réparties sur de longues distances, équipées de bras mobiles. Les opérateurs positionnaient ces bras dans différentes positions pour former des codes qui représentaient des lettres, des mots et des phrases.

Lorsqu'un message était transmis, les opérateurs ajustaient rapidement les bras pour refléter le contenu du message. Le télégraphe de Chappe permettait de communiquer bien plus rapidement que les méthodes précédentes, réduisant par exemple le temps nécessaire pour transmettre des informations entre Paris et Lille de plusieurs jours à quelques heures.

Bien que remplacé par les télégraphes électriques au XIXe siècle, le télégraphe de Chappe a joué un rôle essentiel dans l'histoire des télécommunications en facilitant les échanges d'informations sur de longues distances en France et au-delà.



**Figure 3:** Télégraphe de Chappe

Le 3 mars 1791, les frères Chappe ont mené leur toute première expérience avec le télégraphe aérien, couvrant une distance de 14 kilomètres dans le département de la Sarthe, en France. Suite à cette réussite initiale, un impressionnant réseau de 5000 kilomètres de lignes télégraphiques et 533 stations a été rapidement déployé sur l'ensemble du territoire français.

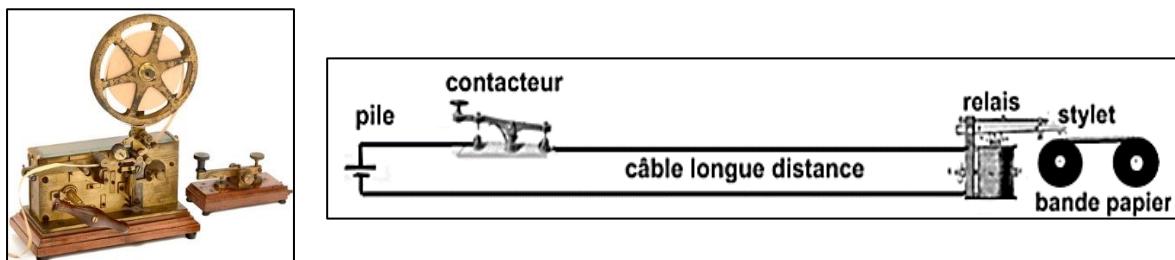
***En Algérie :*** En 1842, le télégraphe à bras a été installé à Alger pour répondre aux besoins de l'administration militaire coloniale. Cette installation a marqué le début de la création d'un réseau télégraphique comprenant deux axes principaux : Alger-Oran et Alger-Constantine, avec des extensions vers des destinations telles que Médéa, Mascara et Tlemcen. Les travaux de construction de ces lignes télégraphiques ont été menés à bien, et en 1853, les lignes de l'axe Ouest étaient entièrement opérationnelles, s'étendant sur une distance totale de 850 kilomètres. Parallèlement, la construction de la ligne vers Constantine, entreprise à partir de 1848, a également été achevée en 1853.



### 1.2.3. Télégraphe électrique de Morse

Le 11 janvier 1838, Samuel Morse effectua la première transmission d'un message télégraphique dans le New-Jersey en utilisant un câble de 3 kilomètres de long. Le télégraphe électrique de Morse était composé d'une pile, inventée par Alessandro Volta en 1800, et d'un interrupteur manuel pour l'émission des messages.

En ce qui concerne la réception, un récepteur était constitué d'une bobine-relais reliée mécaniquement à un stylet, de telle sorte que ce dernier laissait une marque sur une bande de papier lorsque la bobine était alimentée en courant électrique.



**Figure 4:** Télégraphe électrique de Mors

Morse a élaboré un système de codage où chaque lettre de l'alphabet est symbolisée par une combinaison de points et de traits, correspondant à la durée pendant laquelle le contacteur reste fermé, soit 1 seconde pour le point et 3 secondes pour le trait, définissant ainsi un code de communication distinctif.

A	• -	K	- - .	U	• • -	1	• - - - -
B	- - - .	L	• - - .	V	• • • -	2	• - - - -
C	- - . - .	M	- -	W	• - - -	3	• - - - -
D	- - . .	N	- - .	X	- - - - .	4	• - - - -
E	.	O	- - -	Y	- - - - .	5	• - - - -
F	• - - - .	P	• - - - .	Z	- - - - .	6	• - - - -
G	- - - .	Q	- - - - .			7	• - - - -
H	• - - - .	R	• - - .			8	• - - - -
I	..	S	• - -			9	• - - - -
J	- - - - .	T	-			0	• - - - -

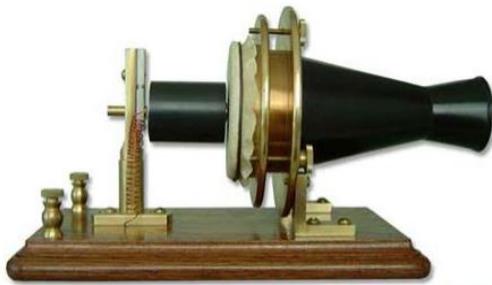
**Figure 5:** code de Télégraphe de Mors

**En Algérie :** Les premières lignes de télégraphe électrique ont été installées en 1854. Ces lignes reliaient Oran à Mostaganem sur une distance de 76 kilomètres, Alger à Médéa sur une distance de 90 kilomètres, et Constantine à Philippeville (Skikda) sur une distance de 83 kilomètres. Au tournant du siècle, en 1900, tous les bureaux de poste en Algérie étaient équipés de systèmes de télégraphe. L'administration française a également posé six câbles télégraphiques sous-marins reliant la France et l'Algérie entre 1870 et 1913, renforçant ainsi les communications entre les deux territoires. Cette expansion du réseau de télégraphe a joué un rôle dans l'amélioration des échanges d'informations.

#### 1.2.4. Graham Bell et le téléphone

Alexander Graham Bell est largement crédité de l'invention du téléphone. En 1876, Bell a obtenu le brevet américain n° 174,465 pour son invention du téléphone. Son concept de base était de transformer les vibrations sonores en signaux électriques et inversement.

Bell a réalisé la première transmission de parole réussie par téléphone en mars 1876 lorsqu'il a dit à son assistant, Thomas Watson, "Monsieur Watson, venez ici, je voudrais vous voir." Ce moment historique a marqué le début de l'ère des communications téléphoniques.



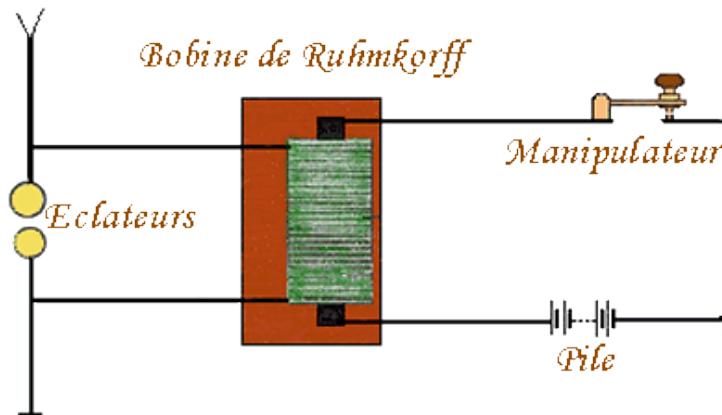
**Figure 6:** Ancien poste téléphonique de Graham Bell

Le téléphone de Bell a été amélioré au fil du temps, et Bell Telephone Company, plus tard devenue AT&T, a joué un rôle majeur dans le développement du réseau téléphonique aux États-Unis.

**En Algérie :** le service téléphonique a connu ses débuts en 1882 lorsque la Société Générale des Téléphones, une entreprise privée. Cette société a pris en charge l'installation et l'exploitation des réseaux téléphoniques urbains d'Oran et d'Alger. En 1889, la responsabilité du service téléphonique a été transférée à l'administration des Postes, Télégraphes et Téléphones (P.T.T.). Depuis lors, les progrès dans l'exploitation du service téléphonique ont connu une progression constante. La longueur totale des lignes téléphoniques est passée de 469 kilomètres en 1900 à une impressionnante étendue de 94 400 kilomètres en 1928. Cette expansion considérable du réseau téléphonique a joué un rôle majeur dans l'amélioration des communications en Algérie.

### 1.2.5. Guglielmo Marconi et la TSF

Guglielmo Marconi est largement reconnu comme l'une des figures clés dans le développement de la télégraphie sans fil, souvent abrégée en TSF (Télégraphie Sans Fil).



**Figure 6:** Principe de base de transmission sans fil

Les réalisations les plus importantes de Marconi dans le domaine de la TSF comprennent les suivantes :

**Transmission sans fil de signaux radio :** Marconi est crédité de la première transmission réussie d'un signal radio à une distance significative. En 1895, il a réussi à envoyer un signal radio sur une distance d'environ 1,5 kilomètre.

**Développement de la radio :** Marconi a travaillé sur la mise au point de l'équipement nécessaire pour transmettre et recevoir des signaux radio.

**Communication sans fil à longue distance :** Marconi a réalisé une percée significative en transmettant des signaux radio sur des distances de plus en plus grandes. En 1901, il a réussi à établir une communication sans fil transatlantique entre la Grande-Bretagne et le Canada.

**Création de la première station de radio maritime :** Marconi a également été un pionnier dans l'utilisation de la TSF pour la communication en mer. Il a créé la première station de radio maritime en 1904, améliorant ainsi la sécurité des communications et la réponse aux urgences en mer.

**Prix Nobel de physique :** En reconnaissance de ses contributions significatives à la télégraphie sans fil, Guglielmo Marconi a reçu le prix Nobel de physique en 1909, partagé avec Karl Ferdinand Braun, pour leur travail dans le domaine de la TSF.

En 1907, l'Algérie a marqué un événement significatif avec l'installation de sa toute première station de Télégraphie Sans Fil (TSF) dans un domaine militaire situé à Fort-de-l'Eau (Bordj el Kiffan). Cette station était équipée d'une antenne d'une puissance de 1 kW, ce qui lui permettait d'établir des communications avec des navires se trouvant à une distance maximale de 500 km d'Alger. Par la suite, grâce à l'augmentation de la puissance des antennes, portée à 12 kW, la portée des communications s'est considérablement étendue, couvrant des distances pouvant atteindre 3000 km.

#### 1.2.6. Évolution après 1907 : Moments Clés et Dates Significatives

**1907** : L'invention de la Triode par Lee de Forest ouvre la voie à l'amplification analogique des signaux et à la transmission longue distance.

**1921** : Edwin Armstrong révolutionne les communications avec l'invention de la Modulation de Fréquences (FM).

**1928** : La première liaison radiotéléphonique commerciale transatlantique est établie, rapprochant les continents grâce à la communication sans fil.

**1935** : La première émission de télévision en France, à Paris, marque le début de l'ère télévisuelle.

**1938** : Alec Reeves introduit la Modulation par Impulsions Codées (MIC, ou PCM pour Pulse Code Modulation), marquant la transition vers la représentation numérique des signaux analogiques.

**1948** : L'invention du transistor signale une révolution dans l'électronique, ouvrant la voie à une nouvelle ère de miniaturisation et d'innovation technologique.

**1948** : Claude Shannon pose les fondements de la théorie de l'information, jetant les bases de la numérisation des données.

**1956** : Le lancement du premier câble transatlantique téléphonique (TAT1) avec 60 circuits téléphoniques réduit encore la distance entre les continents.

**1956** : La France établit son premier réseau de radiotéléphonie avec 10 000 abonnés, améliorant les communications nationales.

**1962** : Le lancement du premier satellite de communication, "Telstar-1," permet des communications téléphoniques et télévisuelles entre les États-Unis et l'Europe.

**1965** : L'introduction du premier satellite géostationnaire "Early Bird" facilite simultanément la téléphonie et la télévision à l'échelle mondiale.

**1965** : La France compte déjà 3 millions d'abonnés au téléphone, marquant une adoption rapide des technologies de communication.

**1969** : La transmission en direct des premiers pas sur la Lune devient un moment historique de communication globale.

**1971** : Le début du système de repérage par satellite GPS est un jalon important pour la navigation et la géolocalisation.

**1972** : La naissance de l'InterNetworking, l'organisme de gestion d'Internet, prépare le terrain pour la révolution numérique à venir.

**1973** : L'Angleterre et la Norvège rejoignent Internet, marquant les premiers pas vers la mondialisation d'Internet.

**1980** : La sonde spatiale Voyager-1 transmet des images de Jupiter et de Saturne, illustrant la portée des communications spatiales.

**1981** : Le lancement du satellite Télécom 1A en France renforce encore les capacités de communication nationales.

**1984** : Le début des réseaux cellulaires de radiocommunications mobiles aux États-Unis annonce l'ère de la téléphonie mobile.

**1986** : L'ouverture du service de mobiles "Radiocom2000" inaugure la première génération de téléphonie mobile, même en voiture.

**1987** : La mise en service en France du premier réseau entièrement numérique à intégration (RNIS) marque une nouvelle ère de communications numériques.

**1993** : Le lancement commercial de la 2ème génération de téléphonie mobile (GSM) en France (ITINERIS) est un grand succès pour la téléphonie mobile.

**1997** : L'arrêt de l'usage du Morse dans les télécommunications radio-maritimes en France symbolise la transition vers la technologie numérique.

**1999** : Avec 35 millions d'abonnés filaires en France, le téléphone portable dépasse toutes les prévisions, marquant l'essor de la mobilité.

**2000** : La 3G a été déployée pour la première fois, les dates de lancement précises varient selon les pays, mais les premiers réseaux 3G ont été opérationnels à partir de 2001.

**2001** : La commercialisation de l'ADSL en France offre des débits élevés en réception et émission, ouvrant la voie à l'ère de l'Internet haut débit.

**2003** : Un nouveau record de débit longue distance est établi avec l'introduction de l'Internet nouvelle génération IPv6, propulsant les communications à des niveaux inégalés.

**2004** : Le lancement de l'UMTS en France marque l'arrivée de la 3ème génération de téléphonie mobile, offrant de nouvelles applications et services, notamment la visioconférence, le web, le courrier électronique et le streaming. Les Smartphones se développent.

**2005** : L'introduction officielle de la TNT (Télévision Numérique Terrestre) en France, une procédure entamée en 1996, révolutionne la télévision.

**2006** : La convergence voix et données prend forme, marquant la convergence entre les réseaux de télécommunications fixes et sans fil, ouvrant la voie à une communication multimédia intégrée.

**2007** : Apple lance l'iPhone, qui révolutionne l'industrie de la téléphonie mobile en introduisant un téléphone intelligent multifonctionnel.

**2008** : Lancement de la 4G (quatrième génération) des réseaux mobiles, offrant des débits de données plus rapides pour les utilisateurs mobiles.

**2013** : Lancement de la 4G LTE (Long Term Evolution) avec des vitesses de données encore plus rapides.

**2015** : L'adoption des smartphones et des réseaux sociaux continue de croître rapidement, transformant la communication personnelle et professionnelle.

**2016** : Lancement de la 5G (cinquième génération) des réseaux mobiles, promettant des débits de données encore plus élevés, une latence réduite et de nouvelles possibilités pour l'Internet des objets (IoT).

**2020** : La pandémie de COVID-19 stimule la demande de connectivité Internet et de télétravail, mettant en évidence l'importance cruciale des télécommunications pour la société moderne.

**2021** : L'essor de la vidéoconférence devient un phénomène majeur, avec des plates-formes telles que Zoom jouant un rôle essentiel dans le travail à distance et l'apprentissage en ligne.

**2022** : Les discussions sur la réglementation de la 5G et la protection de la vie privée en ligne continuent de faire les gros titres, soulignant les défis en constante évolution dans le domaine des télécommunications.

### 1.3. Normes et standards de télécommunications

Dans tous les domaines de la technologie, les termes "norme" ou "standard" font référence à des directives techniques et à des spécifications concernant la conception et le fonctionnement d'un équipement ou d'un système dans son intégralité.

La normalisation revêt une importance fondamentale dans le domaine de la communication, car elle garantit que tous les utilisateurs connectés au réseau de communication sont en mesure de recevoir et de transmettre des informations à l'intention de l'ensemble des participants.

### 1.3.1. Organisation internationale de normalisation (ISO)

L'ISO créée en 1947 et relevant de l'Organisation des Nations Unies (ONU), est chargée de la normalisation dans tous les domaines techniques, à l'exception de l'électricité et de l'électronique. Elle regroupe les organismes nationaux de tous les pays et est structurée en comités techniques (TC) ou sous-comités (SC), qui sont ensuite subdivisés en groupes de travail (Working Group).

Le processus d'élaboration des normes comprend trois étapes : DS (Draft Proposal), qui correspond au document de travail initial, DIS (Draft International Standard), qui représente la proposition de norme, et enfin IS (International Standard) une fois que la norme est adoptée de manière définitive.

L'ISO est une organisation qui réunit les organismes nationaux de normalisation de nombreux pays, notamment :

- **AFNOR** : Association française de normalisation (France)
- **ANSI** : American National Standards Institute (États-Unis)
- **DIN** : Deutsches Institut für Normung (Allemagne)
- **BSI** : British Standards Institute (Royaume-Uni)
- **JISC** : Japanese Industrial Standards Committee (Japon)

#### **En Algérie**

*L'Algérie est devenue membre de l'ISO en 1976, représentée par l'**IANOR** (Institut Algérien de la Normalisation). L'IANOR est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) sous la tutelle du Ministère du Développement Industriel et de la Promotion de l'Investissement.*

*Ses principales missions incluent :*

**Élaboration de normes techniques** : *L'IANOR est responsable de l'élaboration de normes techniques nationales pour divers secteurs industriels et techniques*

**Adoption de normes internationales** : *L'IANOR participe activement aux travaux de normalisation internationale en tant que membre de l'ISO et adopte des normes internationales dans le cadre de sa législation nationale.*

**Promotion de la normalisation** : L'IANOR sensibilise les entreprises, les organismes publics et les acteurs de l'industrie à l'importance de la normalisation.

**Certification de conformité** : L'IANOR peut être impliqué dans le processus de certification de conformité des produits, ce qui signifie qu'il évalue et certifie que les produits répondent aux normes nationales ou internationales spécifiques.

**Recherche et développement** : L'IANOR peut également être impliqué dans des activités de recherche et développement liées à la normalisation, notamment l'adaptation des normes aux besoins nationaux spécifiques.

**Participation aux comités techniques internationaux** : En tant que membre de l'ISO, l'IANOR participe aux comités techniques internationaux pour contribuer à l'élaboration de normes mondiales dans divers domaines.

### 1.3.2. Union Internationale des Télécommunications (UIT)

L'UIT est effectivement un organisme international fondé en 1865, dont le siège est à Genève. Il opère dans le cadre des Nations Unies et est chargé de traiter les questions liées aux télécommunications à l'échelle mondiale. Voici quelques points clés concernant l'UIT :

**Structure** : L'UIT est composée de membres, à savoir les États membres et les membres associés. Elle est dirigée par un Secrétaire général. L'organisation est divisée en trois secteurs principaux : le Secteur des radiocommunications (UIT-R), le Secteur des normalisations (UIT-T), et le Secteur du développement des télécommunications (UIT-D).

**CCITT** : Le Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique (CCITT) était l'une des entités de l'UIT, chargée du développement et de l'adoption de normes internationales en matière de télécommunications. Cependant, depuis 1992, le CCITT est devenu l'UIT-T, qui se consacre aux normes de télécommunications.

**UIT-T** : Ce secteur travaille sur les normes techniques pour les réseaux de télécommunications et les services, y compris les technologies de l'information et de la communication (TIC).

**UIT-R** : Ce secteur est responsable de la gestion des fréquences radioélectriques mondiales et de l'attribution des bandes de fréquences aux services de radiocommunication, ce qui est crucial pour éviter les interférences internationales.

**UIT-D** : Ce secteur est chargé de promouvoir le développement des télécommunications dans les pays en développement. Il travaille à améliorer l'accès aux technologies de l'information et de la communication (TIC) dans ces pays, à renforcer les infrastructures de télécommunication et à promouvoir l'utilisation efficace des TIC pour le développement économique et social.

### 1.3.3. Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)

L'IEEE est l'une des plus grandes organisations professionnelles au monde dédiées à la promotion de l'ingénierie électrique, électronique et des technologies de l'information. Fondée en 1963, l'IEEE rassemble des ingénieurs, des chercheurs, des professionnels de l'informatique, des scientifiques et d'autres experts dans le domaine des technologies. Cette organisation joue un rôle crucial en favorisant l'innovation, en établissant des normes techniques, en publiant des recherches et en organisant des conférences dans une variété de domaines technologiques. L'IEEE est également reconnu pour ses contributions aux avancées de l'industrie des télécommunications, de l'électronique, de l'informatique, de la robotique et de nombreuses autres disciplines connexes. En tant que force motrice derrière de nombreuses avancées technologiques, l'IEEE continue de jouer un rôle majeur dans la promotion de la collaboration mondiale et de l'excellence technique dans le domaine de l'ingénierie et des sciences de l'information.

## **CHAPITRE 2**

# **Systèmes de communication**

Les systèmes de communication jouent un rôle essentiel dans notre monde moderne, en permettant l'échange rapide et efficace d'informations à travers des supports de transmission. Pour comprendre pleinement leur fonctionnement, il est essentiel d'examiner les éléments fondamentaux qui les composent. Dans ce chapitre, nous présentons les systèmes de communication en explorant les différents aspects qui les sous-tendent.

Dans la première sous-section, nous allons présenter les sources et les signaux des télécommunications. Il est crucial de comprendre comment les informations sont générées et transformées en signaux transmissibles. Ensuite, nous aborderons le schéma de base et les principes d'un système de communication. Cela nous permettra de comprendre la structure et le fonctionnement de ces systèmes. Un élément clé des systèmes de communication est le support de transmission. Nous étudierons en détail divers supports de transmission, notamment les lignes bifilaires, les câbles coaxiaux, les lignes imprimées, les guides d'ondes, les fibres optiques et même l'espace libre.

## 2.1. Sources et signaux des télécommunications

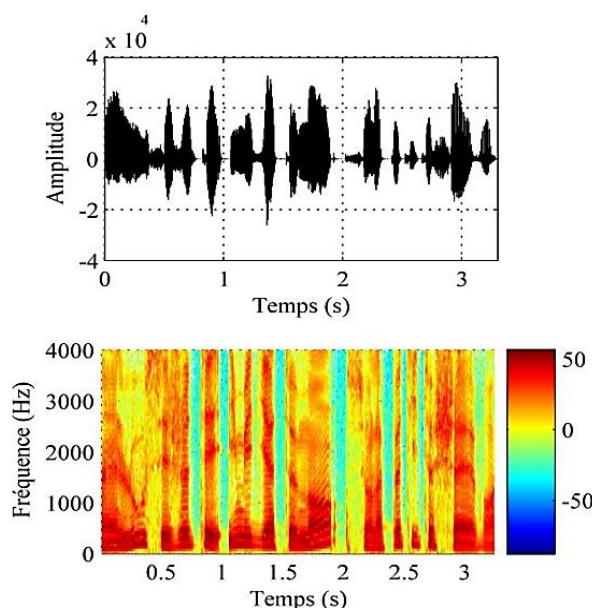
Pour que la communication se produise, il faut des informations à transmettre et des moyens pour les transmettre. Les "sources et signaux" des télécommunications sont très importants de tout système de communication moderne.

Les sources de signaux peuvent prendre de nombreuses formes, des voix et des images aux données numériques complexes. Ces sources contiennent l'essence même de ce que nous voulons communiquer. Nous explorerons comment les informations sont extraites de ces sources et préparées pour le voyage à travers les réseaux de télécommunication.

Les signaux sont les messagers qui transportent nos messages d'un point à un autre. Comprendre la nature des signaux est essentiel pour garantir que les informations parviennent à destination de manière intacte et compréhensible. Nous examinerons les différentes formes de signaux, analogiques et numériques, ainsi que les techniques de modulation et de codage qui les rendent aptes à la transmission.

### 2.1.1. Signal vocal

Un "signal vocal" se réfère à un signal sonore produit par la voix humaine lors de la parole. Ce signal est généralement une onde acoustique caractérisée par des variations de pression de l'air qui se propagent à travers l'air ou d'autres milieux. Le signal vocal contient des informations linguistiques et émotionnelles et peut être analysé et traité à des fins de communication, d'enregistrement, de diffusion, de reconnaissance vocale, et bien plus encore.



**Figure 7.** Evolution temporelle d'un signal parole avec son spectrogramme

Voici quelques points importants à considérer concernant les signaux vocaux,

- (i) Les signaux vocaux peuvent être décrits en termes de fréquence, d'intensité, de durée, de hauteur, et de timbre. Ces caractéristiques varient en fonction du son produit et de la manière dont il est prononcé.
- (ii) Les signaux vocaux sont la principale forme de communication orale entre les êtres humains. Ils sont utilisés pour transmettre des idées, des émotions, des informations, et bien plus encore.
- (iii) Les signaux vocaux peuvent être traités électroniquement à l'aide de technologies telles que la reconnaissance vocale, la synthèse vocale, et la compression audio.

En principe, notre oreille est capable de détecter des vibrations sonores dans une plage de fréquences allant de 20 [Hz] (les sons graves) à 20 000 [Hz] (les sons aigus). Cette plage de fréquences doit être reproduite avec précision dans les systèmes audio. Cependant, dans le cas de la radio AM, les fréquences ne sont reproduites que jusqu'à 4500 [Hz], ce qui offre néanmoins une qualité sonore relativement bonne. En téléphonie, l'objectif est de garantir l'intelligibilité du message, et la bande de fréquence normalisée pour cela se situe entre 300 et 3400 [Hz]. Cette plage de fréquences est maintenue intacte tout au long du réseau.

### 2.1.2. Image

En électronique, le processus de transformation d'une image statique commence par l'utilisation d'un capteur, tel qu'une caméra, qui capture l'image. Cette image est ensuite convertie en une matrice de points lumineux, appelés pixels. Chaque pixel dans cette matrice détient des valeurs qui représentent à la fois l'intensité lumineuse et la couleur de la région correspondante de l'image. Il est important de noter que toute couleur que nous observons dans la nature peut être décomposée et représentée par une combinaison des trois couleurs fondamentales : Rouge, Vert, et Bleu, abrégées sous l'acronyme RGB (Red Green Blue).

Ce modèle de couleur RGB est largement utilisé dans les domaines de la photographie numérique, de la télévision, de la vidéo, de l'affichage électronique et de la reproduction des couleurs en général. Il offre une méthode précise pour représenter des images en utilisant des combinaisons de ces trois couleurs premiers.



**Figure 7.** Exemple d'une image " Place Toute à Blida "

### 2.1.3. Lumière

La lumière peut être appréhendée sous deux modèles physiques, en fonction de nos besoins : le modèle corpusculaire (où la lumière est constituée de particules appelées photons) et le modèle ondulatoire (où la lumière est considérée comme une onde électromagnétique). Cependant, dans le contexte des télécommunications, notre principal intérêt se porte sur le modèle ondulatoire.

Selon le modèle ondulatoire, la lumière est définie comme une onde électromagnétique qui se déplace à une vitesse constante de  $3.10^8$  m/s dans le vide. Elle possède une puissance, que nous mesurons sous la forme d'intensité lumineuse. De plus, la lumière se caractérise par une plage de fréquences spécifique notée  $f$ , laquelle s'étend de  $4.10^{14}$  Hz à  $8.10^{14}$  Hz dans le cas de la lumière visible. Cette gamme de fréquences correspond à une plage de longueurs d'onde  $\lambda$  allant de 740 nm dans la partie infrarouge à 380 nm dans la partie ultraviolette du spectre.

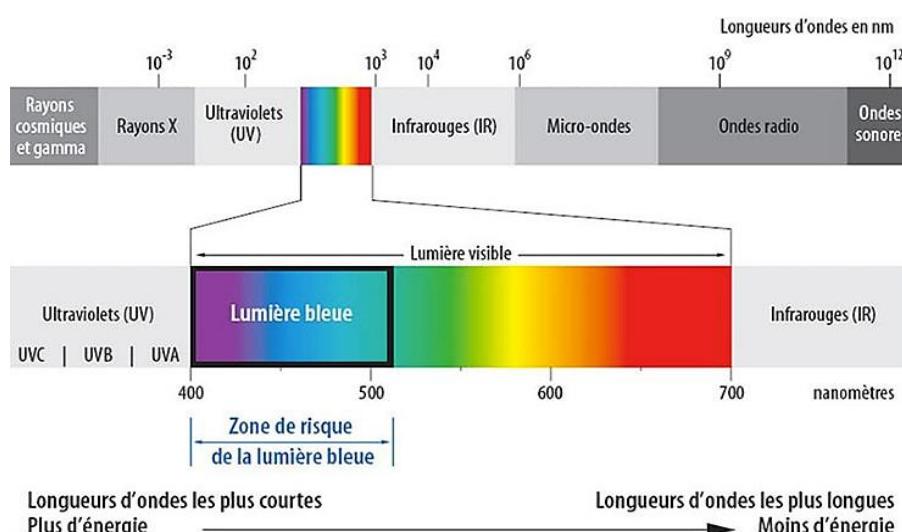


Figure 8. Plage des longueurs d'ondes de la lumière visible

### 2.1.4. Texte

Un texte peut être défini comme une séquence de caractères appartenant à un alphabet donné. Il a la capacité de présenter une source d'information, qu'elle soit sous forme d'éléments visuels extraits d'une image (comme dans le cas d'un fax ou d'une photocopie), ou bien sous forme d'une représentation numérique où chaque caractère est codé selon un système particulier.

Cette représentation numérique est ensuite convertie en un signal numérique, c'est-à-dire une séquence de 1 et de 0, que l'on désigne couramment par des unités binaires ou bits.

Pour représenter un caractère spécifique, plusieurs bits sont nécessaires. Historiquement, plusieurs codes ont été développés pour cette tâche. Par exemple, le code ASCII a été introduit, utilisant 8 bits pour représenter des caractères, et il est devenu largement utilisé dans le contexte de l'informatique. Plus récemment, l'Unicode est apparu, utilisant 16 bits pour prendre en charge un ensemble beaucoup plus vaste de caractères et de symboles provenant de différentes langues et cultures à travers le monde.

### 2.1.5. Vidéo

Un signal vidéo est une représentation visuelle d'informations qui peut être transmise, affichée ou enregistrée à des fins de visualisation. Les signaux vidéo sont utilisés dans de nombreux contextes, y compris la télévision, la vidéoconférence, la surveillance, l'industrie du cinéma, les jeux vidéo et la diffusion en continu sur Internet.

Voici quelques points clés à prendre en compte concernant les signaux vidéo :

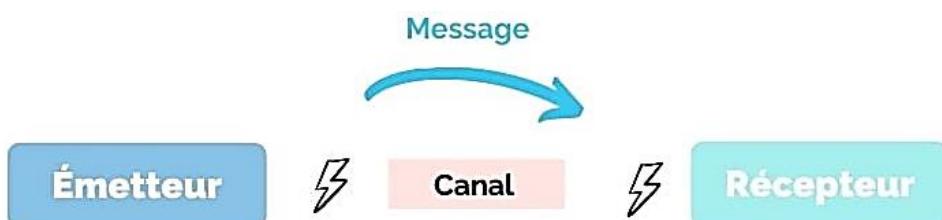
- (i) Les signaux vidéo consistent généralement en une séquence d'images fixes (ou images par seconde) qui sont présentées rapidement les unes après les autres pour créer l'illusion du mouvement. Plus le nombre d'images par seconde est élevé, plus la vidéo semble fluide.
- (ii) La résolution d'une vidéo détermine la netteté et la qualité de l'image. Elle est mesurée en pixels.
- (iii) Il existe de nombreux formats vidéo différents, notamment le MPEG, AVI, MP4, MOV, ...
- (iv) Pour économiser de l'espace de stockage et de bande passante, les vidéos sont souvent compressées. Les codecs de compression, tels que H.264, H.265, et VP9, sont utilisés pour réduire la taille des fichiers vidéo tout en préservant la qualité.

(v) Les vidéos peuvent être en noir et blanc ou en couleur. La profondeur de couleur fait référence au nombre de couleurs différentes que la vidéo peut afficher, allant du noir et blanc à des millions de couleurs.

(vii) Les vidéos peuvent également inclure un signal audio pour accompagner l'image. La qualité audio est tout aussi importante que la qualité vidéo dans de nombreuses applications.

## 2.2. Principes d'un système de communication

Le schéma synoptique général d'une chaîne de communication se compose de trois éléments principaux : un émetteur, un canal de transmission, et un récepteur.



**Figure 9.** Schéma de base de communication

Chacun de ces éléments joue un rôle essentiel dans le processus global de communication. Voici une brève description de leur fonctionnement :

**Émetteur :** L'émetteur est le point de départ de la chaîne de télécommunication. Il prend l'information à transmettre, qu'il s'agisse de voix, de données, d'images, ou d'autres types d'informations, et la convertit en un signal approprié pour la transmission. Cette conversion peut impliquer la modulation du signal, la compression de données, ou d'autres processus en fonction du contexte de communication.

**Canal de Transmission :** Le canal de transmission est le moyen par lequel le signal est transporté de l'émetteur au récepteur. Ce canal peut prendre de nombreuses formes, y compris les câbles, les fibres optiques, les ondes radio, et bien d'autres. Pendant son transit à travers le canal, le signal peut subir diverses perturbations, telles que l'atténuation, le bruit, les distorsions, etc. Ces altérations sont inhérentes au canal de transmission et nécessitent souvent des techniques de correction ou de récupération à la réception.

**Récepteur :** Le récepteur est le point final de la chaîne de communication. Il reçoit le signal qui a parcouru le canal de transmission et tente de le restaurer dans sa forme d'origine autant que possible. Pour ce faire, le récepteur peut utiliser des techniques de démodulation, de décompression de données, et d'autres méthodes de traitement du signal. Une fois le signal restauré, le récepteur extrait l'information d'origine pour la rendre accessible à l'utilisateur final.

### 2.3. Supports de transmission

Les supports de transmission sont des éléments fondamentaux de notre société interconnectée, facilitant la communication, l'accès à l'information, le fonctionnement des entreprises, l'éducation, les soins de santé, le divertissement et la recherche. Qu'il s'agisse de câbles, de fibres optiques ou de réseaux sans fil, leur utilité est incontestable, permettant la transmission de données, de signaux et d'informations à travers le monde, créant ainsi un tissu essentiel de notre vie quotidienne et de notre économie. Leur évolution constante demeure cruciale pour répondre aux besoins croissants de notre société de plus en plus connectée.

#### 2.3.1. Lignes bifilaires

Les "lignes bifilaires" se réfèrent généralement à des paires de fils torsadés utilisées pour la transmission de signaux, que ce soit dans les télécommunications, la transmission de données, l'électronique ou le domaine électromagnétique. Ces configurations de câbles aident à réduire les interférences électromagnétiques et à maintenir l'intégrité des signaux transmis sur les conducteurs.

##### 2.3.1.1. Télégraphe électrique de Morse

Une "ligne bifilaire à paires droites" fait référence à un type de configuration de câbles dans lequel deux fils parallèles sont disposés sans torsion entre eux. Cette configuration est généralement utilisée dans le domaine de l'électromagnétisme et de la transmission de signaux à haute fréquence.

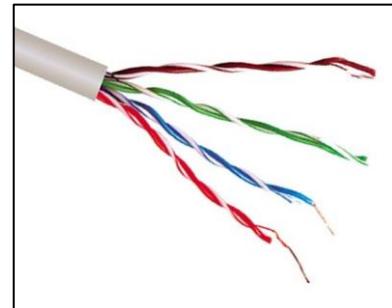


Les paires droites minimisent la capacité et l'inductance mutuelle entre les fils, ce qui peut être important pour maintenir des caractéristiques de transmission précises et réduire les perturbations électromagnétiques.

### 2.3.1.2. Ligne bifilaire à paires torsadées

Une "ligne bifilaire à paires torsadées" est une configuration de câblage où deux fils conducteurs parallèles sont enroulés l'un autour de l'autre à intervalles réguliers, créant ainsi une torsion. Cette torsion a pour but de réduire les interférences électromagnétiques (EMI) en diminuant la capacité de capter des signaux extérieurs et en annulant les champs électromagnétiques créés par les fils.

Les lignes bifilaires à paires torsadées sont couramment utilisées dans les câbles Ethernet pour la transmission de données, les câbles téléphoniques, et d'autres applications de communication, car elles contribuent à améliorer la qualité de la transmission en minimisant les perturbations électromagnétiques.

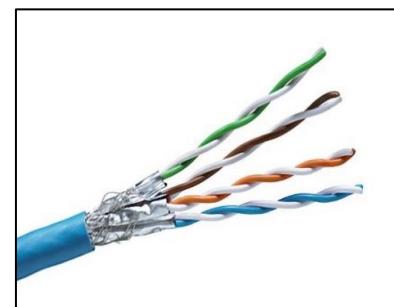


### 2.3.1.3. Ligne bifilaire à paires torsadées blindées

Les lignes bifilaires à paires torsadées blindées sont des câbles de transmission de signaux caractérisés par des paires de fils torsadés pour réduire les interférences électromagnétiques, complétées par une couche de blindage qui offre une protection supplémentaire contre les interférences extérieures.

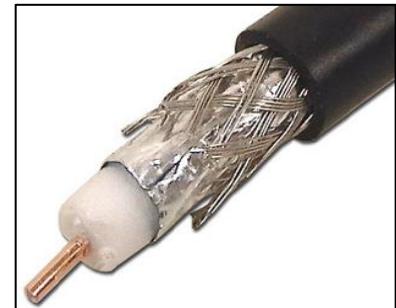
Ces câbles sont couramment utilisés dans des environnements sensibles aux interférences électromagnétiques, tels que les réseaux informatiques industriels ou les systèmes audio professionnels, garantissant ainsi une transmission de signaux de haute qualité et fiable.

Les connecteurs spécifiques sont souvent utilisés pour préserver l'intégrité du blindage lors de la connexion. Ces câbles sont fréquemment déployés pour le câblage des réseaux fonctionnant à des vitesses de 10 et 100 Mb/s.



### 2.3.2. Câble coaxial

Le câble coaxial est constitué de deux conducteurs. Le conducteur central est généralement en cuivre ou en aluminium et est entouré d'une gaine isolante. À l'extérieur de l'isolant, il y a une deuxième couche conductrice qui sert de blindage. Le blindage extérieur est généralement en métal et peut prendre la forme d'une tresse de fils métalliques ou d'une feuille métallique. Ce blindage protège les signaux à l'intérieur du câble des interférences électromagnétiques externes. Les câbles coaxiaux ont une impédance caractéristique spécifique, généralement de 50 ohms ou 75 ohms, ce qui détermine leur capacité à transporter des signaux dans certaines gammes de fréquence.



- Les câbles coaxiaux offrent une largeur de bande considérable, ce qui signifie qu'ils peuvent transporter des signaux à des fréquences variées, de l'audio et de la vidéo aux signaux haute fréquence.
- Les câbles coaxiaux sont dotés de connecteurs spécifiques, tels que les connecteurs BNC, pour permettre la connexion à des équipements appropriés.
- Les câbles coaxiaux sont utilisés dans une variété d'applications, y compris la transmission de signaux vidéo (comme les câbles de télévision par câble), la transmission de signaux RF (radiofréquence), et la transmission de données à haut débit, notamment dans les anciens réseaux informatiques.

### 2.3.3. Fibre optique

Une fibre optique est un filament mince et flexible, généralement fabriqué en verre ou en plastique, conçu pour la transmission de la lumière d'un point à un autre. Les informations sont transmises sous forme de signaux lumineux qui se propagent à travers le cœur de la fibre, en utilisant la réflexion totale interne pour guider la lumière le long du trajet de transmission.



**Fibre en verre :**

Fabriquées à partir de silice ( $\text{SiO}_4$ ) dopée ou non, se caractérisent par une atténuation minimale, soit une perte de signal inférieure à 1 décibel par kilomètre (dB/Km), ce qui les rend adaptées aux liaisons longue distance. Pour comparaison, un câble électrique présente généralement une atténuation d'environ 100 dB/Km à 1 gigahertz, avec un indice de réfraction (ON) compris entre 0,1 et 0,4. Cependant, ces fibres optiques sont relativement coûteuses et fragiles. Il convient de noter que, comme pour tout guide d'onde, il existe un rayon de courbure minimal à ne pas dépasser pour éviter d'endommager le câble et garantir la propagation du signal, généralement de l'ordre de quelques centimètres. En microélectronique, il est possible d'intégrer des microcanaux dopés dans un substrat en verre pour guider la lumière, une technologie avancée adaptée aux liaisons ultracourtes.

**Fibre en plastique :**

Fabriquées en plastique (comme le PMMA), présentent une atténuation significativement plus élevée, généralement supérieure à 1 dB/Km, ce qui les limite aux liaisons de courte distance. De plus, elles ont un indice de réfraction (ON) d'environ 0,5 et sont relativement coûteuses.

**Fibre Monomode (SMF - Single-Mode Fiber) :** La fibre monomode présente un cœur très fin (généralement autour de 9 à 10 micromètres) et est conçue de manière à permettre à un seul mode de lumière de se propager en ligne droite. Elle offre une grande bande passante et une atténuation minimale, ce qui la rend idéale pour les transmissions longue distance, notamment dans les réseaux de télécommunications à haut débit.

**Fibre Multimode à Gradient d'Indice (GI-MMF - Graded-Index Multi-Mode Fiber) :** Cette fibre multimode est caractérisée par un cœur de diamètre plus important (environ 50 à 62,5 micromètres) et un indice de réfraction qui diminue graduellement de la périphérie vers le centre. Cela permet à plusieurs modes lumineux de se propager en ligne droite, offrant une bande passante plus élevée que la fibre multimode à saut d'indice. Les liaisons à courte distance, comme celles dans les réseaux locaux (LAN) ou les systèmes audiovisuels, sont des applications courantes.

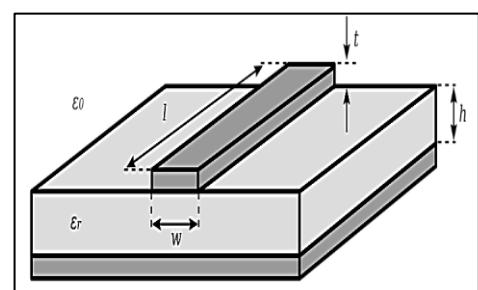
**Fibre Multimode à Saut d'Indice (SI-MMF - Step-Index Multi-Mode Fiber) :** La fibre multimode à saut d'indice possède un cœur de diamètre plus large, mais son indice de réfraction est constant à travers le cœur. Cela permet à plusieurs modes de lumière de se propager, mais ils sont plus sujets à la dispersion et à l'atténuation que dans le cas du GI-MMF. Elle est utilisée pour des applications à courte distance, mais offre des performances légèrement inférieures en termes de bande passante par rapport à la GI-MMF.

Dénomination	Multimodes à saut d'indice	Multimodes à gradient d'indice	Monomodes
En coupe			
Profil d'indice			
Trajet des rayons			
Réponse à un DIRAC			
Bande passante pour 1Km	5 à 100 MHz	300 à $10^3$ MHz	100 GHz

**Figure 10.** Caractéristiques des Fibres Optiques

#### 2.3.4. Ligne imprimée

Une ligne imprimée ou micro ruban est une structure de transmission sur un substrat, composée d'une paire de conducteurs : le micro ruban supérieur pour la transmission du signal, et la masse située en dessous.



Cette configuration est fréquemment utilisée dans la fabrication de circuits à haute fréquence, en grande partie en raison de sa compatibilité avec les procédés de photolithographie, et de sa facilité d'intégration des composants passifs et actifs en surface.

### 2.3.5. Guide d'ondes

Un guide d'ondes est un système physique utilisé pour diriger et confiner les ondes électromagnétiques sur une certaine distance, en les maintenant à l'intérieur d'un milieu spécifique. Traditionnellement, un guide d'ondes était généralement fabriqué en métal et permettait la propagation des ondes grâce à des réflexions multiples.



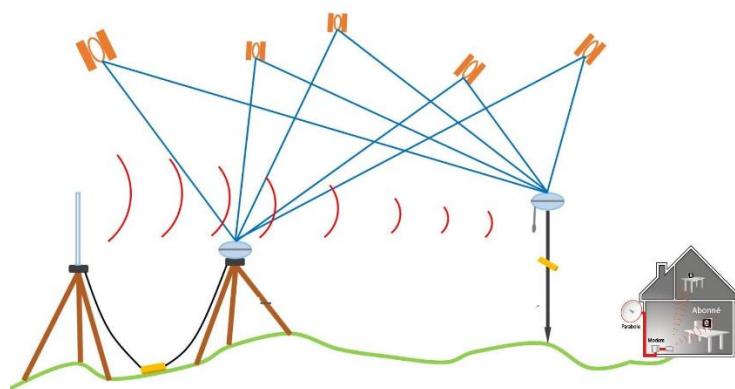
### 2.3.6. Transmission sans fil

Une antenne aérienne à l'émetteur émet une onde électromagnétique, qui se propage à travers l'espace, pour ensuite être captée par une antenne au récepteur. Cette forme d'onde est couramment appelée onde hertzienne ou onde radio, et elle est utilisée dans divers systèmes de télécommunications à travers un large éventail de fréquences, allant de 10 kHz à 300 GHz, regroupées sous le terme de Radio fréquences RF. En espace libre, cette onde hertzienne se déplace à une vitesse constante égale à la vitesse de la lumière, soit environ  $3 \times 10^8$  m/s, et cette propagation est généralement assimilée à une transmission à travers le vide.

L'air, en tant que support de transmission, joue un rôle crucial dans de nombreuses applications de communication, de la radio à la télévision en passant par les communications sans fil et la transmission de signaux sonores. Voici quelques paragraphes qui expliquent son importance en tant que support de transmission :

Premièrement, l'air est essentiel pour la transmission du son, que ce soit par la voix humaine, des instruments de musique ou des systèmes de sonorisation. Les ondes sonores se propagent à travers l'air sous forme de variations de pression, permettant ainsi la communication auditive dans de nombreux contextes.

L'air est un excellent support naturel pour la transmission d'ondes radio, car il offre une faible atténuation pour les fréquences radioélectriques. Les ondes radio, utilisées pour les communications terrestres et sans fil, se propagent efficacement dans l'atmosphère, ce qui les rend idéales pour une gamme de services de communication, des émissions de radio à la téléphonie mobile. Ce support de transmission joue également un rôle majeur dans la transmission des ondes lumineuses.



**Figure 11.** Schéma explicative d'une communication sans fil

Limites de la transmission sans fil : Bien que l'air soit un excellent support pour les communications sans fil, il présente également des limites. Les ondes radio et les signaux sans fil peuvent être perturbés par des obstructions physiques, des interférences électromagnétiques, ou des conditions atmosphériques défavorables, ce qui nécessite des technologies avancées pour surmonter ces problèmes.

# **CHAPITRE 3**

## **Techniques de transmission analogiques**

Les systèmes de transmission analogiques ont longtemps été le fondement de la communication, permettant de transmettre des signaux audio, vidéo et de données sur de longues distances. Bien que les technologies numériques aient gagné en popularité ces dernières années, la transmission analogique conserve un rôle essentiel dans de nombreuses applications, de la diffusion de signaux de télévision aux communications radio. Nous explorerons les principes fondamentaux de la transmission analogique, ses défis et les diverses techniques qui ont été développées pour permettre une transmission efficace et fiable des signaux analogiques. Ce chapitre offre un aperçu complet des bases de la transmission analogique, jetant les bases pour une compréhension plus approfondie des technologies de communication analogiques.

### 3.1. Classification des signaux

#### 3.1.1. Classification phénoménologique

La classification phénoménologique repose sur l'analyse de l'évolution d'un signal en fonction du temps, permettant de distinguer la nature de cette évolution, qu'elle soit prévisible ou imprévisible. Dans cette classification, l'ensemble des signaux peut être regroupé en deux catégories principales :

- (i) Les signaux déterministes, qui sont caractérisés par une évolution prévisible et régulière.
- (ii) Les signaux aléatoires, où l'évolution est imprévisible et non régulière.

##### 3.1.1.1. Signaux déterministes

Le terme "déterministe" est utilisé pour décrire des signaux dont le comportement temporel peut être pleinement expliqué. Cela suppose que l'évolution de ces signaux au fil du temps peut être parfaitement décrite à l'aide d'un modèle mathématique. Il presuppose également que ces signaux déterministes résultent de phénomènes pour lesquels les lois physiques correspondantes et les conditions initiales sont bien connues, ce qui permet de prédire leur évolution, c'est-à-dire que l'on peut connaître leurs valeurs à n'importe quel moment. Un exemple concret serait un signal électrique fourni par un générateur dont l'amplitude et la fréquence sont préalablement réglées et connues.

### a) Signaux périodiques

En termes de signaux déterministes, un signal périodique est représenté par une fonction  $x$  qui est dite périodique de période  $T$  si, pour n'importe quel moment  $t$ ,  $x(t)$  est égal à  $x(t+T)$ . En d'autres termes, le signal est composé d'un motif qui se répète de manière régulière et identique à des intervalles de temps égaux à  $T$ . Cette notion de périodicité est fondamentale dans l'étude des signaux déterministes et est couramment observée dans de nombreux phénomènes naturels et artificiels.

Un signal sinusoïdal est un type de signal périodique qui suit une forme d'onde sinusoïdale, c'est-à-dire qu'il varie en fonction du temps selon la loi du sinus.

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$x(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (2)$$

Les caractéristiques principales d'un signal sinusoïdal comprennent :

- Amplitude  $A$  : La différence entre la valeur maximale et minimale du signal, représentée en unités d'amplitude (par exemple, volts pour un signal électrique).
- Fréquence  $f$  : Le nombre de cycles complets du signal qui se produisent par unité de temps, généralement mesuré en hertz (Hz).
- Période  $T$  : L'inverse de la fréquence, indiquant la durée d'un cycle complet.  $T$  (période) est en relation inverse avec la fréquence :  $T = 1/f$ .
- Phase  $\varphi$  : Un décalage temporel par rapport à un signal de référence, généralement mesuré en radians ou degrés.

**Signaux composites** : Les signaux composites sont des signaux qui peuvent être analysés comme une combinaison de signaux périodiques ayant des rapports de périodes rationnels entre eux.

### b) Signaux non-périodiques

**Signaux pseudopériodiques** : sont des signaux caractérisés par une variation d'amplitude au fil du temps.

**Signaux transitoires** : sont des signaux dont l'existence est temporaire, limitée dans le temps.

### 3.1.1.2. Signaux aléatoires

Un signal  $x(t)$  est considéré comme aléatoire lorsque son évolution est imprévisible et peut uniquement être caractérisée par des méthodes statistiques. L'analyse de ces signaux implique l'utilisation du calcul des probabilités. Dans un système électronique, un signal aléatoire agit en tant que perturbateur, représentant un signal indésirable.

#### a) Signaux stationnaires

Les signaux stationnaires sont caractérisés par le fait que leurs propriétés aléatoires restent constantes au fil du temps, ce qui signifie que les résultats de leur analyse statistique demeurent invariables, quel que soit le moment d'observation.

#### b) Signaux non-stationnaires

Les signaux non stationnaires se distinguent par le fait que leurs propriétés statistiques évoluent au fil du temps.

### 3.1.2. Classification énergétique

#### 3.1.2.1. Signaux à énergie finie :

Un signal est dit avoir une énergie finie s'il a une amplitude bornée et une durée finie.

#### 3.1.2.2. Signaux à énergie infinie :

Les signaux à énergie infinie sont des signaux pour lesquels l'énergie totale sur une période donnée est considérée comme infinie. Cela se produit lorsque l'amplitude du signal ne diminue pas à zéro sur une durée finie.

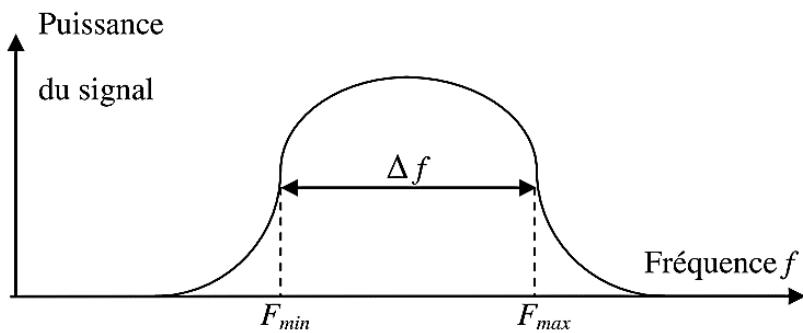
### 3.1.3. Classification morphologique :

On distingue les signaux qui ont des valeurs à chaque instant  $t$  et les signaux qui n'ont de valeurs qu'à certains instants  $t_i$ .

Amplitude	Continu	Discret
Temps		
Continu	Analogique	Quantifié
Discret	Discret	Numérique

### 3.1.4. Classification spectrale :

Les signaux peuvent être catégorisés en fonction de la répartition de leur énergie ou de leur puissance sur la fréquence. La plage de fréquences englobée par leur spectre, représentée par  $B = \Delta f = f_2 - f_1$ , est désignée comme la bande occupée ou la largeur de bande du signal.



**Figure 12. Largeur de bande d'un signal**

*Si  $\Delta f \gg f_{moy}$  ( $f_{max} \gg f_{min}$ ) → Signaux à bande large*

*Si  $\Delta f \ll f_{moy}$  ( $f_{max} \approx f_{min}$ ) → Signaux à bande étroite*

Où

$$f_{moy} = \frac{f_{max} - f_{min}}{2} \quad (3)$$

### 3.1.5. Classification dimensionnelle :

**Monodimensionnel (1-D)** : Un signal qui comporte une seule variable, par exemple, le courant électrique.

**Bidimensionnel (2-D)** : Un signal qui comprend deux variables, tel qu'une image.

**Tridimensionnel (3-D)** : Un signal qui implique trois variables, comme la pression.

**Multidimensionnel (N-D)** : Un signal qui contient n variables.

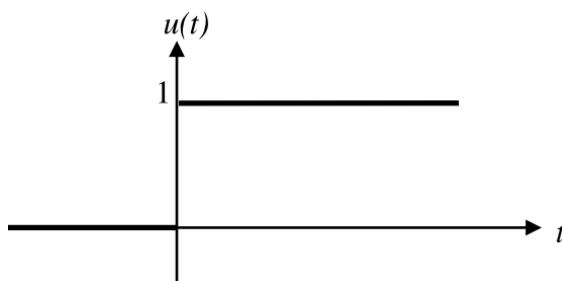
## 3.2. Signaux élémentaires

### 3.2.1. Echelon unité (Heaviside)

Souvent simplement appelé la fonction échelon, est une fonction mathématique utilisée en théorie des signaux et en analyse des systèmes dynamiques. Elle est nommée d'après le mathématicien britannique Oliver Heaviside.

La fonction échelon de Heaviside est généralement notée  $u(t)$  et est définie comme suit :

$$u(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \geq 0 \\ 0 & \text{si } t < 0 \end{cases} \quad (4)$$

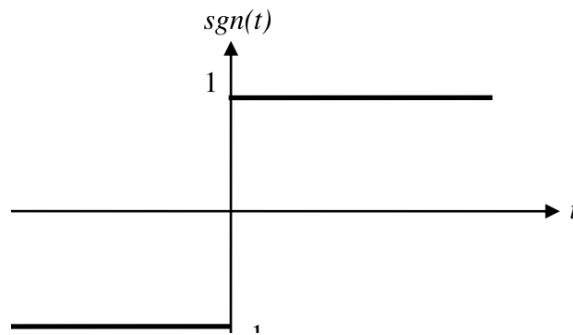


**Figure 13.** Signal échelon

### 3.2.2. Fonction Signe ( $\text{sgn}(t)$ )

La fonction signe, notée généralement  $\text{sgn}(x)$  ou  $\text{sign}(x)$ , est une fonction mathématique qui attribue à un nombre réel  $x$  la valeur suivante :

$$\text{sgn}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t > 0 \\ -1 & \text{si } t < 0 \end{cases} \quad (5)$$



**Figure 14.** Signal signe

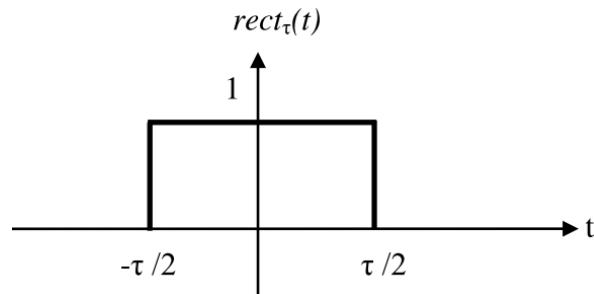
### 3.2.3. Fonction Porte ( $\text{rect}(t)$ ou $\Pi(t)$ )

La fonction porte, également appelée fonction rectangle ou fonction échelle, est une fonction mathématique souvent utilisée en théorie des signaux et en traitement du signal. Elle est généralement notée  $\text{rect}(t)$  ou  $\Pi(t)$  et est définie comme suit :

$$\pi_\tau(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \in \left[-\frac{\tau}{2}, +\frac{\tau}{2}\right] \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (6)$$

Elle sert de fonction de fenêtrage élémentaire

$$\pi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \in \left[-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\right] \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (7)$$



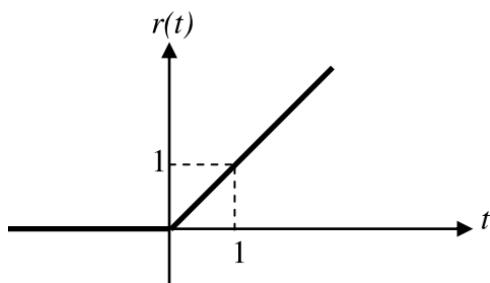
**Figure 15.** Signal porte de fenêtrage élémentaire

### 3.2.4. Fonction Rampe ( $r(t)$ )

La fonction rampe, souvent appelée fonction linéaire par morceaux ou fonction affine par morceaux, est une fonction mathématique qui s'accroît linéairement avec le temps. Elle est souvent notée  $r(t)$  et définie par :

$$r(t) = t u(t) \quad (8)$$

$$r(t) = \begin{cases} t & \text{si } t \geq 0 \\ 0 & \text{si } t < 0 \end{cases} \quad (9)$$

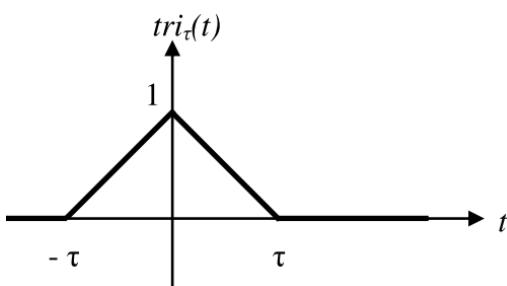


**Figure 16.** Signal rampe

### 3.2.5. Fonction triangulaire ( $\text{tri}(t)$ )

La fonction triangulaire, également connue sous le nom de fonction triangle ou fonction triangulaire uniforme, est une fonction mathématique qui prend la forme d'un triangle symétrique. Elle est souvent notée  $\text{tri}(t)$  et définie par :

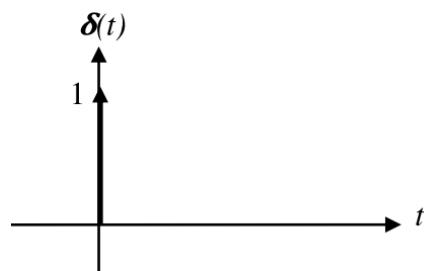
$$tri_{\tau}(t) = \begin{cases} 1 + \frac{t}{\tau} & \text{si } -\tau \leq t \leq 0 \\ 1 - \frac{t}{\tau} & \text{si } 0 < t \leq \tau \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (10)$$

**Figure 17.** Signal triangulaire

### 3.2.6. Impulsion de Dirac ( $\delta(t)$ )

L'impulsion de Dirac peut être envisagée comme une limite de la fonction porte lorsque la largeur  $T$  de la porte tend vers zéro, tout en maintenant une aire constante égale à 1.

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t = 0 \\ 0 & \text{si } t \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

**Figure 18.** Impulsion de Dirac

## 3.3. Analyse de Fourier

L'analyse de Fourier constitue l'outil mathématique fondamental qui facilite la transition de la représentation temporelle des signaux périodiques vers leur représentation fréquentielle.

### 3.3.1. Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier

La décomposition en série de Fourier consiste à représenter un signal comme la somme infinie de composants sinusoïdaux.

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \cos(2\pi k f_0 t) + \sum_{k=1}^{+\infty} b_k \sin(2\pi k f_0 t) \quad (12)$$

$a_0/2$  est la composante continue ou la valeur moyenne

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (13)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos(2\pi k f_0 t) dt \quad (14)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin(2\pi k f_0 t) dt \quad (15)$$

La fréquence fondamentale est la fréquence la plus basse d'un signal périodique, et toutes les autres fréquences présentes dans le signal sont des harmoniques. Les harmoniques sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ce qui signifie qu'elles sont des fréquences entières, non nulles, et sont des composantes du signal périodique qui sont des multiples de la fréquence fondamentale.

Si  $x(t)$  est paire  $x(t) = x(-t)$  alors  $b_k = 0$

Si  $x(t)$  est impaire  $x(-t) = -x(t)$  alors  $a_k = 0$

### 3.3.2. Transformée de Fourier

La série de Fourier facilite la transition du domaine temporel au domaine fréquentiel pour les signaux périodiques, tandis que la Transformée de Fourier est utilisée dans d'autres cas.

En considérant une période infinie (et donc une fréquence fondamentale tendant vers 0), les harmoniques, étant des multiples de la fréquence fondamentale, réduisent l'espace fréquentiel entre deux raies du spectre, convergeant ainsi vers un spectre continu. Ainsi, la transformée de Fourier devient la densité spectrale, qui mesure la "quantité" de fréquence  $f$  présente dans le signal  $x(t)$ . L'amplitude  $X(f)$  est définie comme :

$$X(f) = TF\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (16)$$

La transformée de Fourier inverse est :

$$x(t) = TF^{-1}\{X(f)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad (17)$$

### Cas particulier : Transformée de Fourier d'un signal sinusoïdal

Considérons un signal sinusoïdal  $x(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi)$  est proportionnelle à l'amplitude de la sinusoïde d'origine.

Mathématiquement, si  $X(f)$  est la transformée de Fourier de  $x(t)$ , alors pour un signal sinusoïdal,  $X(f)$  peut être représenté comme une impulsion de Dirac :

$$X(f) = \frac{A}{2} (\delta(f - f_0) + \delta(f + f_0)) \quad (18)$$

Cela signifie que la fréquence  $f_0$  du signal sinusoïdal est présente dans le spectre fréquentiel, avec une amplitude proportionnelle à l'amplitude de la sinusoïde d'origine.

### 3.4. Principe de transmission analogique

La transmission analogique de données implique le transfert d'informations à travers un support physique de transmission sous forme d'ondes. Les signaux destinés à la transmission sont le plus souvent des signaux audiofréquence, provenant d'un microphone captant des sons, ou des signaux vidéofréquence issus d'une caméra de télévision. Ces signaux, complexes, sont principalement constitués de composantes de basse fréquence, en raison de la sensibilité de l'oreille humaine, et d'une plage de fréquences des signaux vidéo.

Les ondes générées par ces signaux, qui portent l'information à transmettre, ne peuvent pas être efficacement propagées sur de longues distances par rayonnement atmosphérique. La puissance rayonnée est faible, proportionnelle au carré de la fréquence, ce qui entraînerait d'importantes pertes entre le point d'émission et le point de réception. De plus, la transmission directe par onde hertzienne d'un signal de basse fréquence est irréalisable en raison des dimensions prohibitives des antennes nécessaires, proportionnelles à un quart de la longueur d'onde.

L'utilisation d'une antenne appropriée serait indispensable pour assurer la transmission du signal, avec des longueurs spécifiques déterminées par la fréquence du signal. Dans le cas d'une fréquence de signal de 15 kHz, une antenne d'une longueur de 3750 m serait requise. Cette dimension souligne les défis pratiques et les limitations inhérents à la transmission directe par onde hertzienne, notamment lorsque les fréquences sont basses.

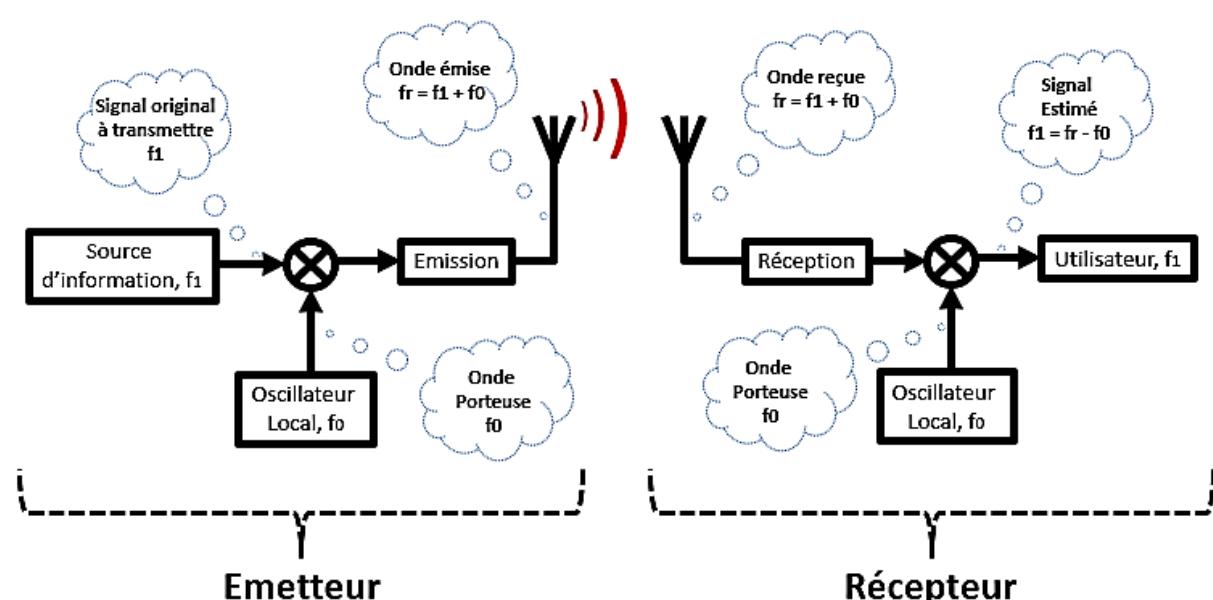
Ainsi, l'idée a été envisagée de transmettre l'information de basse fréquence (B.F) à travers une onde électromagnétique haute fréquence, modifiée par le signal B.F (comme illustré dans la figure ci-dessous).

Les données sont transmises en utilisant une onde porteuse, une onde simple dont le seul objectif est de transporter les données en modifiant l'une de ses caractéristiques (amplitude, fréquence ou phase). C'est pourquoi on la désigne généralement comme la transmission par modulation de l'onde porteuse. En fonction du paramètre de l'onde porteuse qui est modifié, on peut distinguer trois types de transmissions analogiques :

La transmission par modulation d'amplitude de la porteuse.

La transmission par modulation de fréquence de la porteuse.

La transmission par modulation de phase de la porteuse.



**Figure 19.** Principe de base d'une transmission analogique

### 3.4.1. Partie d'émission

La solution pour transporter un signal à distance consiste à transposer la fréquence du signal de départ : du type  $K \cos(2\pi f_1 t)$ , en utilisant une porteuse de fréquence  $f_0$  très élevée. La fréquence de la porteuse est générée à l'aide d'un oscillateur pour définir  $f_0$  avec précision.

La transposition de fréquence module le signal à transmettre avec la porteuse. Mathématiquement, en multipliant les 2 signaux (deux fréquences :  $f_1$  et  $f_0$ ), on utilise alors la propriété de la multiplication en trigonométrie :

$$\cos(x) * \cos(y) = \frac{1}{2} [\cos(x-y) + \cos(x+y)]$$

On obtient en un signal avec 2 composantes, l'une avec la somme des fréquences et l'autre avec la différence. Pour un émetteur, on cherche à éléver les fréquences, grâce à un filtre sélectif on ne gardera et transmettra que la composante de fréquence élevée.

### 3.4.2. Partie de réception

Dans le cas du récepteur, l'accord de l'antenne est réglé sur  $f_r = f_1 + f_0$ , on récupère ensuite le signal originel ( $f_1$ ) en décalant le signal reçu  $f_r$  de la fréquence  $f_0$  grâce au mélangeur, seule la composante contenant la fréquence  $f_1$  est conservée après le mélangeur en utilisant un filtre sélectif centré sur  $f_1$ .

## 3.5. Filtrage

En théorie des circuits électriques, un filtre représente un quadripôle capable de modifier l'amplitude ou la phase du signal d'entrée en fonction de sa fréquence. Il est important de noter que les filtres n'introduisent pas de nouvelles fréquences au signal initial.

En termes simples, les filtres sont des éléments utilisés dans les systèmes électroniques pour renforcer certains signaux dans des plages de fréquences spécifiques tout en atténuant d'autres signaux dans différentes plages de fréquences.

La caractérisation des filtres est principalement basée sur leurs effets sur les fréquences des signaux, et il est plus approprié, voire plus pratique, de les décrire analytiquement ou graphiquement dans le domaine fréquentiel.

Le comportement fréquentiel d'un filtre est mathématiquement défini par une fonction de transfert, qui représente le rapport entre la transformée de Laplace du signal de sortie et celle du signal d'entrée.

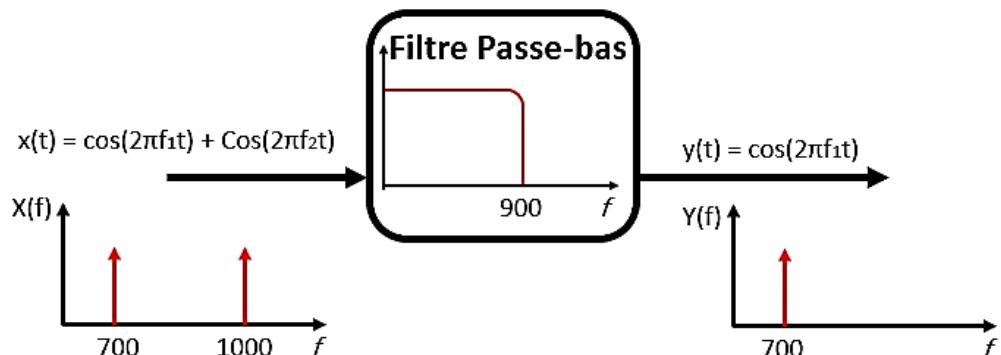
### Explication

On suppose le signal d'entrée  $x(t) = \cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)$

Dans le domaine fréquentiel,  $X(f)$  est représenté par deux impulsions : une pour chaque fréquence (par exemple :  $f_1 = 700$  Hz et  $f_2 = 1000$  Hz).

On va utiliser un filtre de type 'Passe-bas' pour supprimer la deuxième fréquence.

Notant que ce type de filtre supprime les hautes fréquences selon le besoin.



**Figure 20.** Exemple de filtrage analogique de type passe-bas

On peut distinguer quatre types principaux des filtres analogiques :

#### Fonction de Transfert :

La fonction de transfert est une fonction mathématique qui décrit le comportement en fréquence d'un filtre (en régime sinusoïdal).

$$H(s) = \frac{U_s(s)}{U_e(s)} \quad (19)$$

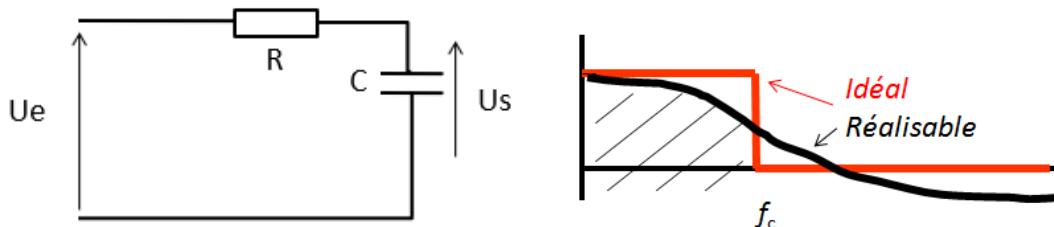


**Figure 21.** Représentation générale des signaux d'entrée et de sortie d'un filtre

où  $U_e(s)$  et  $U_s(s)$  sont les transformées de Laplace de la tension d'entrée et de la tension de sortie respectivement.  $s$  est une variable complexe représentant la fréquence.

### 3.5.1. Filtre passe-bas

Un filtre passe-bas autorise le passage sans atténuation uniquement des signaux dont les fréquences sont en deçà de sa fréquence de coupure ( $f_c$ ).



**Figure 22.** Circuit électronique d'un filtre passe-bas et sa représentation fréquentielle

Fonction de transfert :

$$H(\omega) = \frac{U_s}{U_e} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (20)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + jR\omega C} \quad (21)$$

Avec  $H(0) = 1$  et  $H(\infty) = 0$

Fréquence de coupure

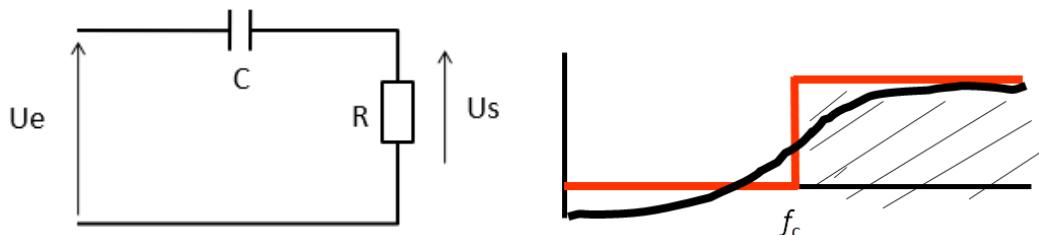
$$|H(\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega_c^2 R^2 C^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \quad (22)$$

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (23)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (24)$$

### 3.5.2. Filtre passe-haut

Un filtre passe-haut laisse passer exclusivement les signaux dont la fréquence est supérieure à sa fréquence de coupure, rejetant simultanément ceux dont la fréquence est inférieure à cette valeur de coupure.



**Figure 23.** Circuit électronique d'un filtre passe-haut et sa représentation fréquentielle

Fonction de transfert :

$$H(\omega) = \frac{U_s}{U_e} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (25)$$

$$H(\omega) = \frac{jR\omega C}{1 + jR\omega C} \quad (26)$$

Avec  $H(0)=0$  et  $H(\infty)=1$

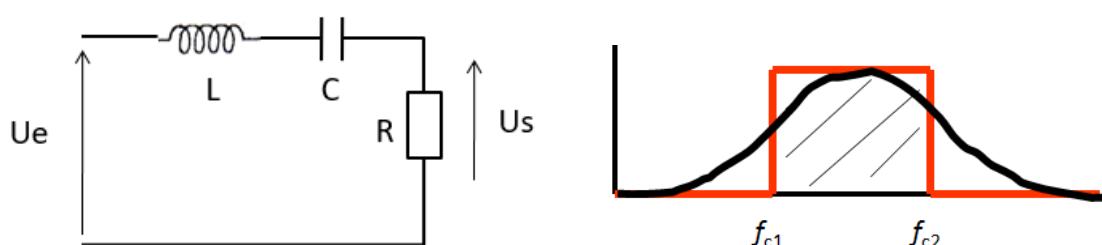
Fréquence de coupure

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (27)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (28)$$

### 3.5.3. Filtre passe-bande

Ce filtre laisse passer les signaux qui se situent dans une bande de fréquences ( $f_{c1}$  et  $f_{c2}$ ) et atténue ceux qui sont en dehors de cette bande. La gamme de fréquences qui ne sont pas atténuées par un filtre est appelée la bande passante du filtre.



**Figure 24.** Circuit électronique d'un filtre passe-bande et sa représentation fréquentielle

Fonction de transfert :

$$H(\omega) = \frac{Us}{Ue} = \frac{R}{R + j(\omega L - 1/\omega C)} \quad (29)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + j \frac{(\omega L - 1/\omega C)}{R}} \quad (30)$$

Avec  $H(0)=0$  et  $H(\infty)=0$

Bandé Passante :

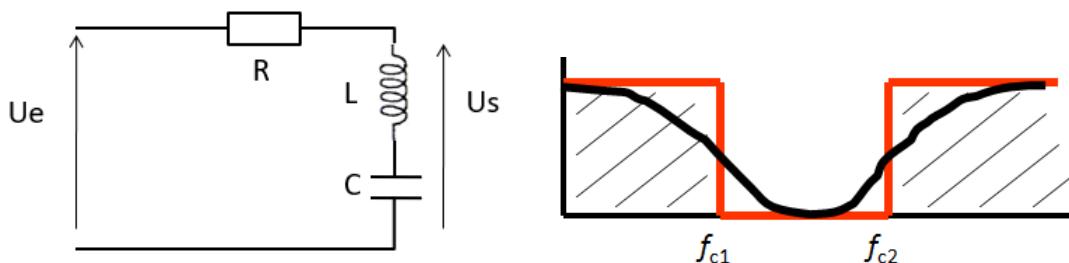
$$\omega_1 < \omega < \omega_2 \quad (31)$$

Fréquence centrale :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (32)$$

### 3.5.4. Filtre coupe-bande

Ce filtre également désigné comme filtre à rejetion de bande, autorise le passage des signaux dont la fréquence n'est pas incluse dans une plage spécifiée, tout en écartant les signaux dont la fréquence se situe à l'intérieur de cette plage déterminée.



**Figure 25.** Circuit électrique d'un filtre coupe-bande et sa représentation fréquentielle

Fonction de transfert :

$$H(\omega) = \frac{Us}{Ue} = \frac{j(\omega L - 1/\omega C)}{R + j(\omega L - 1/\omega C)} \quad (33)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{R}{j(\omega L - 1/\omega C)}} \quad (34)$$

Avec  $H(0)=1$  et  $H(\infty)=1$

Bande Passante :

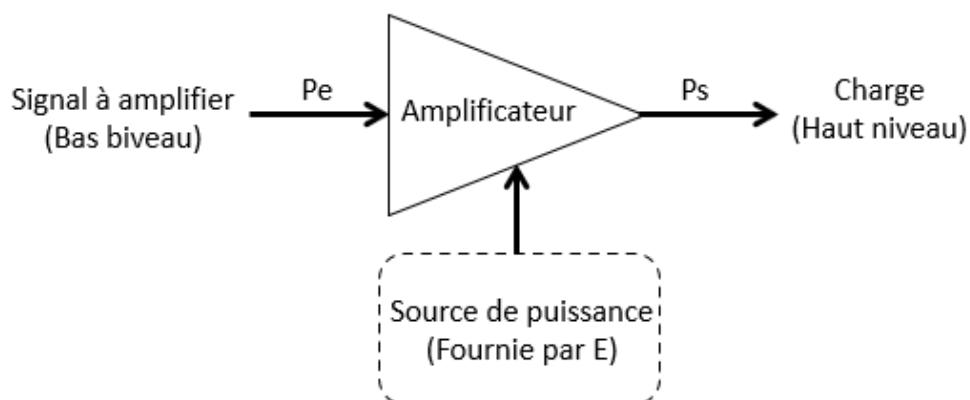
$$\omega_1 < \omega < \omega_2 \quad (35)$$

Fréquence centrale :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (36)$$

### 3.6. Amplification

L'étage d'amplification constitue une composante essentielle au sein d'un système de transmission analogique. Sa fonction principale est d'accroître l'amplitude du signal électrique, souvent nécessaire pour compenser les pertes de signal lors de la transmission sur de longues distances. Cet étage revêt une importance cruciale pour garantir la fidélité du signal d'origine tout au long de la chaîne de transmission. L'amplification permet de surmonter les affaiblissements naturels du signal et de minimiser le rapport signal/bruit, contribuant ainsi à maintenir la qualité du signal analogique. De plus, la conception et la performance de l'étage d'amplification jouent un rôle crucial dans la gestion des distorsions et la préservation de la précision du signal, assurant ainsi une transmission efficace et fiable des informations.



**Figure 26.** Principe de l'étage d'amplification

**Signal continu :** POLARISATION (point de repos)

**Signal alternatif :** AMPLIFICATION (point de fonctionnement qui se déplace autour de sa position de repos)

L'amplification est LINEAIRE si A, le gain de l'amplificateur se met sous la forme :

$$A = \frac{P_s}{P_e} \quad (37)$$

### 3.6.1. Transistor bipolaire

Un transistor est constitué de 2 jonctions PN (ou diodes) montées en sens inverse. Selon le sens de montage de ces diodes on obtient 2 types de transistors :

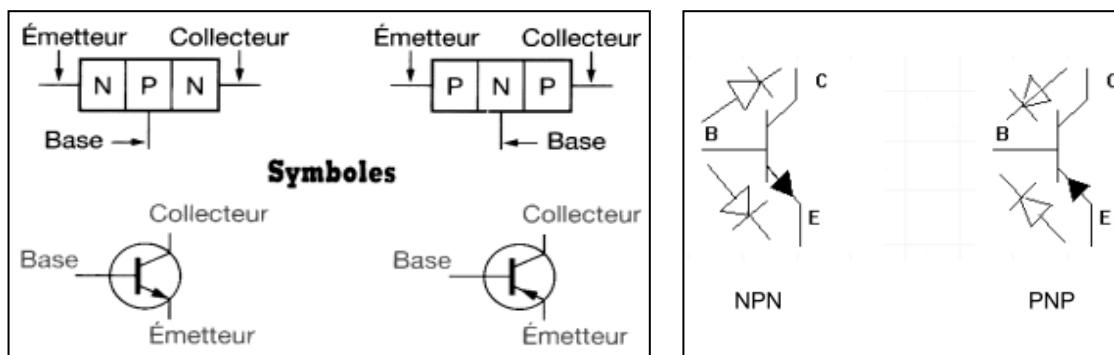


Figure 27. Type de transistor, NPN et PNP

L'émetteur est toujours repéré par une flèche qui indique le sens du courant dans la jonction entre base et émetteur. C'est l'effet transistor qui permet à la diode qui est en inverse de conduire quand une tension est appliquée sur la base.

### 3.6.2. Principe

dans la figure suivante, la loi des nœuds permet d'écrire :

$$I_E = I_B + I_C \quad (38)$$

D'autre part il existe une relation entre courant de base et courant collecteur due à l'effet transistor. Cette relation s'écrit :  $I_C = \beta I_B$

avec  $\beta$  est le gain en courant, il est parfois aussi appelé coefficient d'amplification statique en courant.

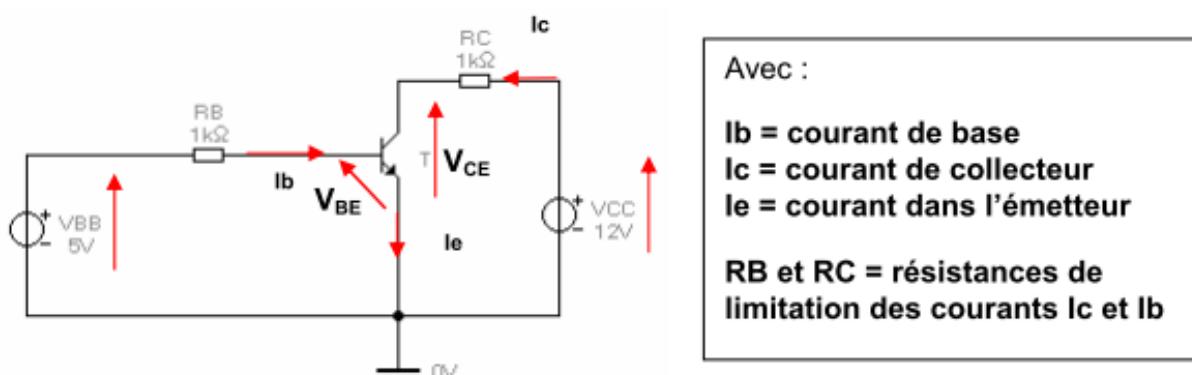


Figure 28. Schéma de principe d'un étage d'amplification

En règle générale  $\beta$  varie de 30 à 300 avec pour valeur courante :

- Transistors dit "Petit signaux" :  $100 < \beta < 300$
- Transistors dit de "Puissance" :  $30 < \beta < 100$

On peut écrire

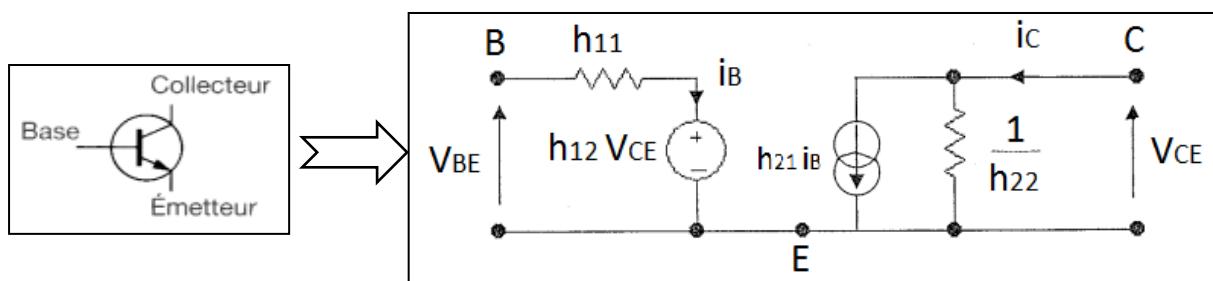
$$I_E = I_B + \beta I_B \rightarrow I_E = (1 + \beta)I_B \quad (39)$$

Si  $\beta I_B$  est grand devant  $I_B$  (ce qui est le cas pour les transistors "Petits signaux") on peut alors écrire :

$$\beta \approx (\beta + 1) \rightarrow I_E \approx I_C \quad (40)$$

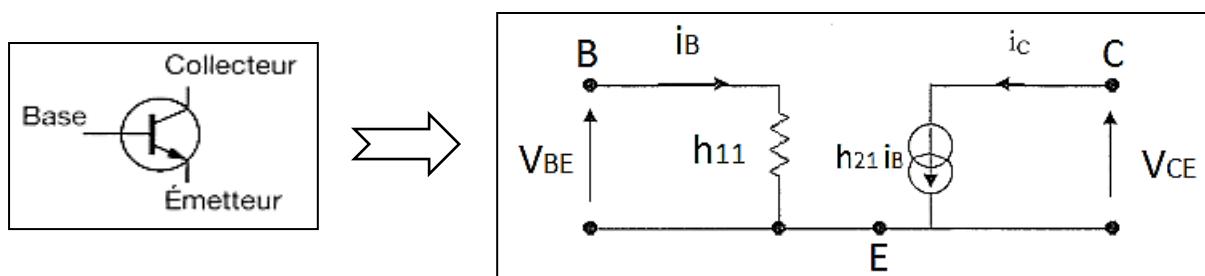
### 3.6.3. Schéma équivalent du transistor

Dans la figure suivante, nous avons vu que le paramètre  $h_{12}$ , est négligeable : soit,  $h_{12} V_{CE} \ll h_{11} i_B$ .



**Figure 29.** Schéma équivalent du transistor

Si la résistance extérieure connectée entre collecteur et émetteur d'un transistor est faible devant  $\frac{1}{h_{22}}$ ; on peut remplacer le transistor par le schéma suivant



**Figure 30.** Schéma équivalent simplifié du transistor

Principalement, on peut citer trois types de montage :

**Emetteur commun** : Dans la configuration de l'émetteur commun, le signal d'entrée est appliqué entre la base et l'émetteur, tandis que le signal de sortie est recueilli entre le collecteur et l'émetteur, où l'électrode d'émetteur est partagée entre les deux signaux. Ce montage, largement utilisé, permet d'obtenir un gain de puissance entre l'entrée et la sortie.

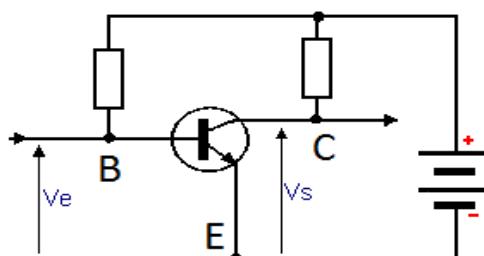


Figure 31. Montage émetteur commun

**Collecteur Commun** : Dans le montage collecteur commun, le signal d'entrée est introduit entre la base et le collecteur, tandis que le signal de sortie est récupéré entre l'émetteur et le collecteur. Ce type de montage facilite l'obtention d'un gain en courant entre l'entrée et la sortie.

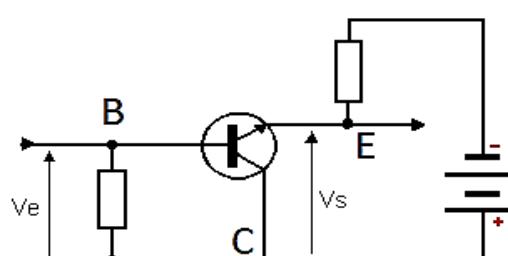


Figure 32. Montage collecteur commun

**Base commune** : Dans la configuration base commune, le signal d'entrée est injecté entre l'émetteur et la base, et le signal de sortie est collecté entre le collecteur et la base. Ce montage offre la possibilité d'obtenir un gain en tension entre l'entrée et la sortie.

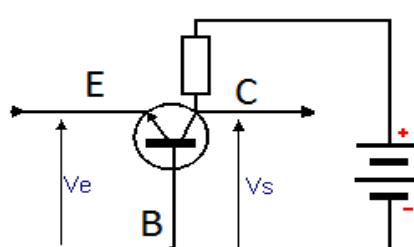


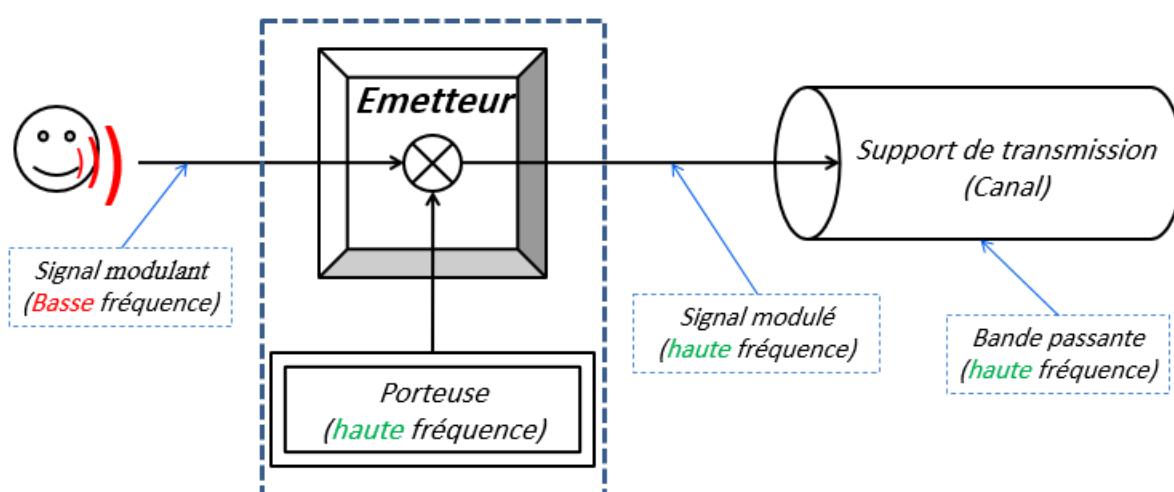
Figure 33. Montage base commun

### 3.7. Modulation

La modulation analogique revêt une importance significative dans les domaines des télécommunications et de la transmission de signaux. Son utilité principale réside dans sa capacité à moduler des signaux analogiques, tels que la voix ou les données, sur une porteuse à fréquence plus élevée. Cette technique permet d'adapter les caractéristiques du signal à celles du canal de transmission, améliorant ainsi l'efficacité de la transmission et la qualité du signal.

De plus, la modulation analogique offre la possibilité d'exploiter efficacement la bande passante disponible en permettant la transmission simultanée de plusieurs signaux sur des fréquences distinctes. Elle est couramment utilisée dans les communications radio, la téléphonie et d'autres applications où la transmission de signaux analogiques de manière fiable et efficiente est essentielle.

La modulation d'une porteuse à haute fréquence par un signal source en télécommunications a émergé pour ajuster les propriétés électriques et spectrales au canal de transmission. Cette pratique offre des avantages tels que l'utilisation simultanée d'une même ligne de transmission pour plusieurs communications via modulation et filtrage. De plus, elle permet la modulation directe et la transmission de sources analogiques, ou la conversion en données numériques avec l'emploi de techniques de modulation numérique.



**Figure 34.** Signaux importants dans la partie de modulation

La modulation fournit les moyens qui permettent de décaler le contenu fréquentiel d'un signal modulant (basse fréquence) dans une autre bande de fréquences (bande de transmission du canal) en utilisant une porteuse (haute fréquence).

**Superposition de bruit** : Les basses fréquences des signaux en bande de base peuvent entraîner une superposition du bruit généré par les dispositifs industriels en fonctionnement, compromettant ainsi la qualité du signal.

**Adaptation de l'antenne** : Il est difficile d'obtenir une adaptation optimale de la taille de l'antenne par rapport aux fréquences transmises en basse fréquence. Une transmission optimale nécessite que les dimensions de l'antenne soient du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du signal.

**Limitations de transmission à certaines fréquences** : Pour certaines fréquences, la transmission en bande de base peut être impossible dans des conditions optimales, ce qui pose des défis particuliers pour la communication dans certains milieux.

**Transmission simultanée** : La bande de base ne permet généralement pas la transmission simultanée de plusieurs signaux, limitant ainsi la capacité de communication dans des scénarios où cela est essentiel.

**Solution** : Utilisation d'une porteuse adaptée : Face à ces difficultés, l'utilisation d'une porteuse adaptée au milieu de transmission est recommandée. Cette approche permet de surmonter ces limitations en offrant une meilleure qualité de transmission, une adaptation efficace de l'antenne et la possibilité de transmettre simultanément plusieurs signaux.

### Porteuse $p(t)$

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

$$p(t) = A_0 \cos(2 \pi f t) \quad (41)$$

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

## Le signal modulant $x(t)$

Le signal modulant contenant l'information est constitué de valeurs réelles. Les fréquences minimale et maximale qu'il contient sont notées respectivement  $F_m$  et  $F_M$ , où  $F_M$  est considérablement inférieure à la fréquence de la porteuse  $f_0$ . Il est également possible que la fréquence  $F_m$  soit égale à 0.

La transformée de Fourier  $X(f)$  de ce signal est généralement complexe, comprenant une partie réelle et une partie imaginaire. Pour représenter le spectre de manière standard, on considère le module de  $X(f)$ .

Ce spectre occupe la bande de fréquence  $F_m \leq f \leq F_M$ , dénommée bande de base. Dans cette plage, l'information du signal modulant est encapsulée, et elle sera ensuite transmise par modulation à une fréquence plus élevée,  $f_0$ , pour faciliter la transmission et l'exploitation efficace du canal de communication.

## Signal modulé $s(t)$

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

$$s(t) = A(t) \cos(\phi(t)) \quad (42)$$

Où  $A(t)$  est l'amplitude instantanée de signal modulé  $s(t)$ .

$\phi(t)$  la phase instantanée du signal modulé  $s(t)$ ,

$$\phi(t) = 2\pi f_0 t + \varphi(t) \quad (43)$$

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

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

**Modulation d'amplitude AM** : l'information est insérée dans l'amplitude instantanée

**Modulation de fréquence FM** : l'information est insérée dans la fréquence instantanée  $f(t)$ ,

**Modulation de phase PM** : l'information est insérée dans la déviation de phase  $\varphi(t)$

### 3.7.1. Principe de la modulation et démodulation

La modulation d'amplitude permet la transmission de signaux de faibles fréquences par ondes électromagnétiques.

Le signal à transmettre (musique, voix ...) (appelé signal modulant), signal de basse fréquence, est transformé en tension électrique par un microphone ; la tension ainsi formée est utilisée pour faire varier (on dit moduler) l'amplitude d'un signal de Haute Fréquence (H.F.) appelée porteuse.

Le signal modulé est transformé en onde électromagnétique contenant les mêmes fréquences, au moyen d'une antenne émettrice.

Une antenne réceptrice capte l'onde électromagnétique et restitue le signal électrique modulé. La démodulation permet alors d'extraire le signal modulant d'origine du signal modulé.

### 3.7.2. Modulation AM à double bande latérale sans porteuse (DBSP)

Le signal modulant est appelé :

$$v_m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \quad (44)$$

La porteuse est appelée :

$$v_p(t) = A_p \cos(2\pi f_p t) \quad (45)$$

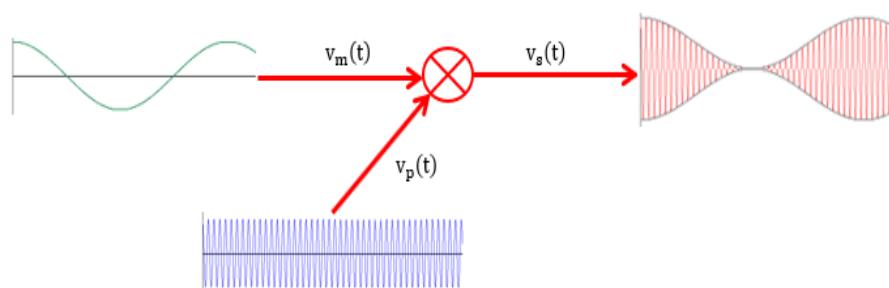
Le signal modulé en amplitude est le produit de

$$v_s(t) = k * v_m(t) * v_p(t) \quad (46)$$

$$v_s(t) = k * A_m \cos(2\pi f_m t) * A_p \cos(2\pi f_p t) \quad (47)$$

k est le gain du multiplicateur. L'amplitude de la porteuse est alors multipliée par le signal modulant.

Dans le signal de sortie (modulé), on distingue l'enveloppe extérieure du signal qui est égale au signal modulant et à l'intérieur un signal qui est la porteuse.



**Figure 35.** Représentation temporelle des signaux dans la modulation DBSP

Après un développement mathématique du signal modulé, on trouve l'expression suivante

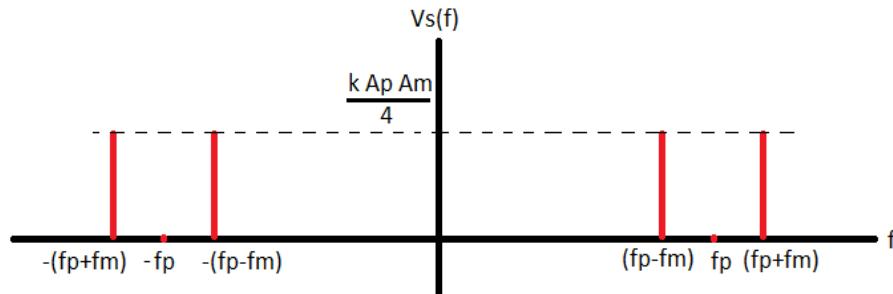
$$v_s(t) = \frac{kA_m A_p}{2} [\cos(2\pi(f_p - f_m)t) * \cos(2\pi(f_p + f_m)t)] \quad (47)$$

Dans le signal  $v_s(t)$ , on peut distinguer deux fréquences  $(f_p - f_m)$  et  $(f_p + f_m)$

### Spectre du signal modulé

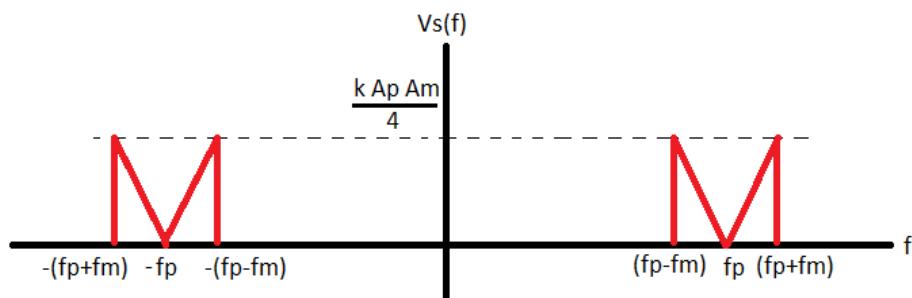
On calcule la transformée de Fourier TF du signal  $v_s(t)$ .

$$\begin{aligned} V_s(f) = & \frac{kA_m A_p}{4} [\delta(f - (f_p - f_m)) + \delta(f + (f_p + f_m)) + \delta(f - (f_p + f_m)) \\ & + \delta(f + (f_p - f_m))] \end{aligned} \quad (48)$$



**Figure 36.** Spectre de signal modulé dans la modulation DBSP dans le cas de signal modulant sinusoïdal

De manière générale le spectre du signal modulé (DBSP) est donnée par le spectre suivant



**Figure 37.** Spectre de signal modulé dans la modulation DBSP dans le cas de signal modulant quelconque

Bande complète du signal modulé  $v_s(t)$  en amplitude DBSP:  $(f_p + f_m) - (f_p - f_m) = 2 f_m$

### 3.7.3. Modulation AM à double bande latérale avec porteuse (DBAP)

Le signal modulant :  $v_m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$

La porteuse :  $v_p(t) = A_p \cos(2\pi f_p t)$

Le signal modulé en amplitude donné par

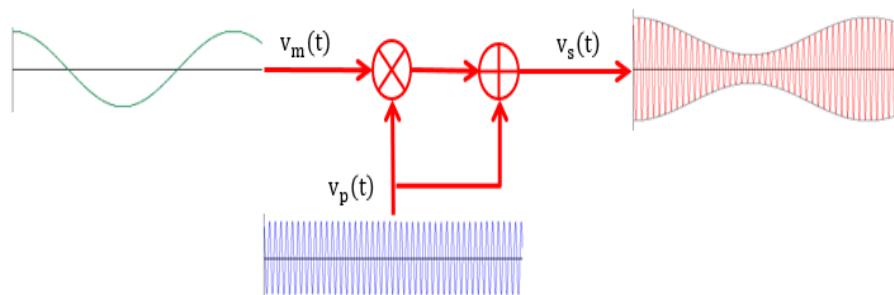
$$v_s(t) = v_p(t) + k * v_m(t) * v_p(t) \quad (49)$$

$$v_s(t) = A_p \cos(2\pi f_p t) + k * A_m \cos(2\pi f_m t) * A_p \cos(2\pi f_p t) \quad (50)$$

$$v_s(t) = A_p \cos(2\pi f_p t) [1 + m * \cos(2\pi f_m t)] \quad (51)$$

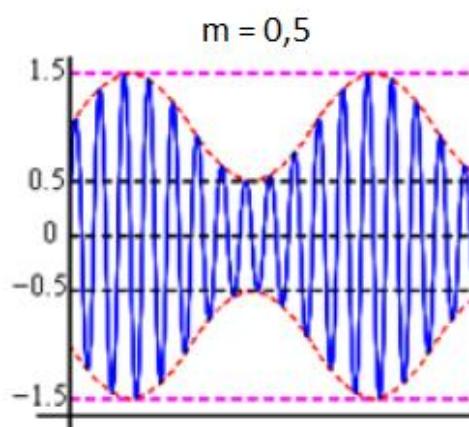
$m$  est appelé coefficient de modulation (indice de modulation).

$$m = k * A_m \quad (52)$$

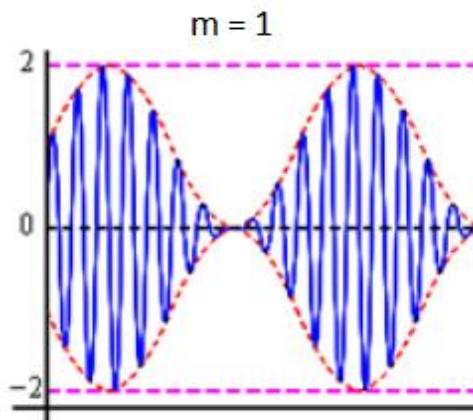


**Figure 38.** Représentation temporelle des signaux dans la modulation DBAP

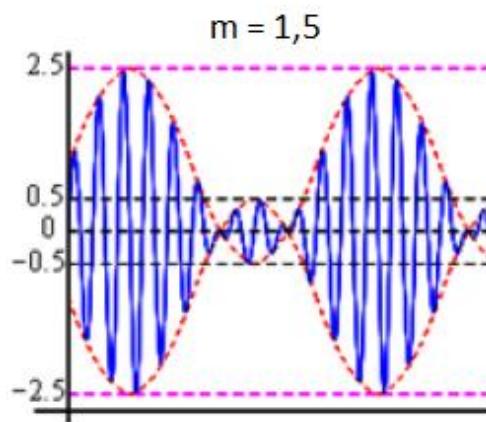
L'enveloppe de  $v_s(t)$  est unipolaire pour  $m \leq 1$ , elle est bipolaire pour  $m > 1$ , comme le montre la figure suivante.



**Figure 39.** Représentation temporelle de signal modulé avec  $m = 0.5$



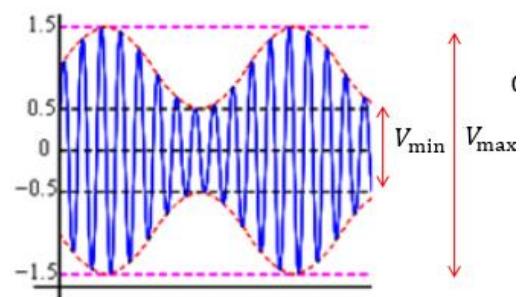
**Figure 40.** Représentation temporelle de signal modulé avec  $m = 1$



**Figure 41.** Représentation temporelle de signal modulé avec  $m = 1,5$

On peut calculer l'indice de modulation par :

$$m = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}}$$



Nous pouvons écrire la relation (51) par

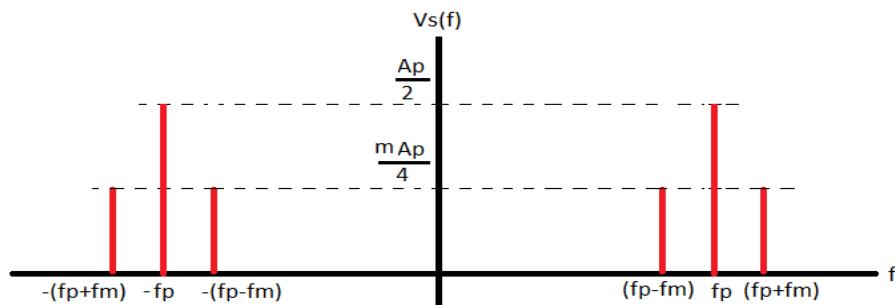
$$v_s(t) = A_p \cos(2\pi f_p t) + \frac{mA_p}{2} [\cos(2\pi(f_p - f_m)t) * \cos(2\pi(f_p + f_m)t)] \quad (53)$$

Dans le signal  $v_s(t)$ , on peut distinguer trois fréquences  $f_p$ ,  $(f_p - f_m)$  et  $(f_p + f_m)$

### Spectre du signal modulé

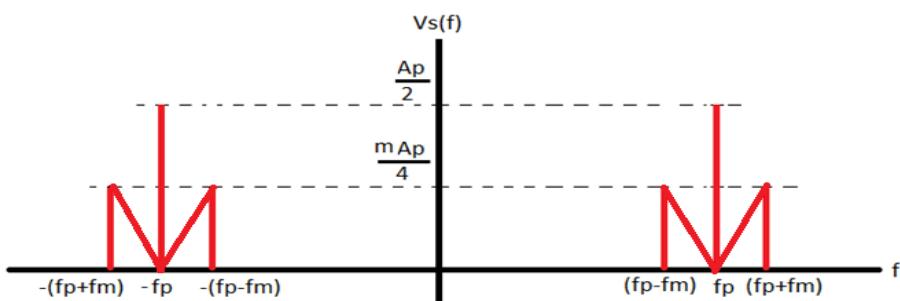
On calcule la transformée de Fourier TF du signal  $v_s(t)$ .

$$\begin{aligned} V_s(f) = & \frac{A_p}{2} [\delta(f - f_p) + \delta(f + f_p)] \\ & + \frac{m A_p}{4} [\delta(f - (f_p - f_m)) + \delta(f + (f_p - f_m)) + \delta(f - (f_p + f_m)) \\ & + \delta(f + (f_p + f_m))] \end{aligned} \quad (54)$$



**Figure 42.** Spectre de signal modulé dans la modulation DBAP dans le cas de signal modulant sinusoïdal

De manière générale le spectre du signal modulé (DBAP) est donné par le spectre suivant

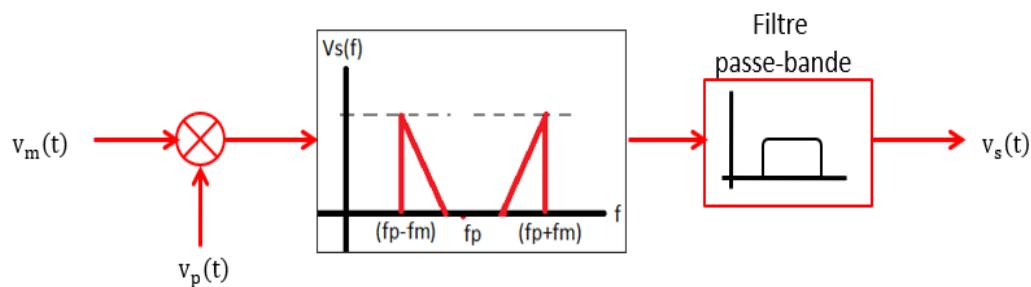


**Figure 43.** Spectre de signal modulé dans la modulation DBAP dans le cas de signal modulant sinusoïdal

Bande complète du signal modulé  $v_s(t)$  en amplitude DBAP  $(f_p + f_m) - (f_p - f_m) = 2 f_m$

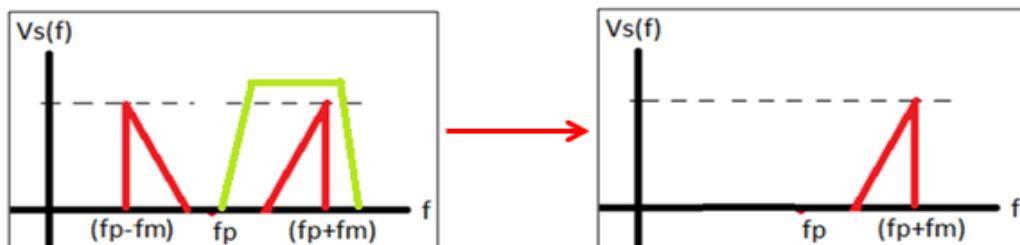
#### 3.7.4. Modulation AM à bande latérale unique (BLU)

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



**Figure 44.** Exemple d'une modulation d'amplitude avec une bande latérale unique

La bande passante du filtre doit être minutieusement centrée pour supprimer la bande latérale inférieure tout en évitant de chevaucher la bande latérale supérieure. La bande spectrale du signal modulé est alors égale à celle du signal modulant  $V_s(f)$ , et il n'y a pas de raie à la fréquence porteuse.



**Figure 45.** Spectre de signal modulé dans la modulation BLU

Toute l'information est disponible, mais la bande de fréquence est réduite de moitié.

Bande complète du signal modulé  $v_s(t)$ :  $(f_p + f_m) - (f_p) = f_m$

Deux fois plus d'information est transmise sur un même canal. C'est cette méthode qui est utilisée dans le réseau téléphonique analogique pour le partage de ligne entre plusieurs communications simultanées par multiplexage à division de fréquence FDM.

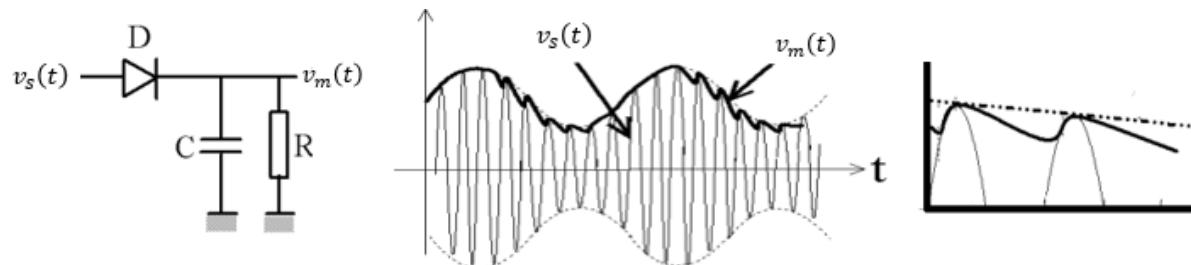
### 3.7.5. Démodulation d'amplitude

Un des principaux avantages de la modulation d'amplitude est de permettre une démodulation très simple par détection d'enveloppe. Il faut noter que la détection d'enveloppe n'est pas la seule méthode utilisable mais que sa simplicité en fait la méthode la plus répandue.

On peut aussi envisager une démodulation cohérente dans le récepteur et multiplier le signal reçu par une porteuse identique en phase et en fréquence avec la porteuse émise.

### A) Démodulation par détecteur d'enveloppe

Le principe consiste à utiliser une diode D pour bloquer la partie négative du signal modulé en amplitude. Le filtre RC élimine la porteuse et sa constante de temps doit être judicieusement choisie.



**Figure 46.** Principe d'une démodulation par détecteur d'enveloppe

On distingue 2 phases :

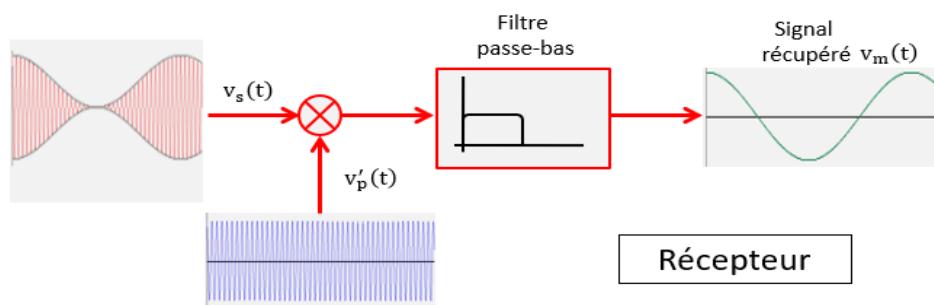
Phase a : charge de C

Phase b : décharge de C.

Après, on peut utiliser un étage pour supprimer la composante continue.

### B) Démodulation cohérente

Le signal reçu DBSP est amplifié et on cherche à retrouver le signal modulant : c'est l'opération de démodulation. La démodulation du signal DBSP nécessite un multiplicateur. Le signal  $A_p' \cos(2\pi f_p t)$  est un signal image de la porteuse qui est reconstitué côté récepteur. Pour restituer le signal modulant, on utilise un filtre passe bas qui va atténuer les composantes au-dessus de la fréquence fm.



**Figure 47.** Principe d'une démodulation cohérente

On parle de réception cohérente lorsque dans le récepteur, on reconstitue un signal identique, en phase et en fréquence, au signal original non modulé. Soit le signal original modulé en amplitude :

$$v_s(t) = A_p \cos(2\pi f_p t) + k * A_m \cos(2\pi f_m t) * A_p \cos(2\pi f_p t) \quad (55)$$

$$\begin{aligned} v_s(t) &= A_p \cos(2\pi f_p t) \\ &+ \frac{k A_m A_p}{2} \cos(2\pi (f_p - f_m) t) + \frac{k A_m A_p}{2} \cos(2\pi (f_p + f_m) t) \end{aligned} \quad (56)$$

Le signal de  $v'_p(t)$  est donné par

$$v'_p(t) = \cos(2\pi f_p t) \quad (57)$$

A la sortie de mélangeur ; on récupère le signal suivant

$$s(t) = v_s(t) v'_p(t) \quad (58)$$

$$\begin{aligned} s(t) &= \left[ A_p \cos(2\pi f_p t) + \frac{k A_m A_p}{2} \cos(2\pi (f_p - f_m) t) \right. \\ &\quad \left. + \frac{k A_m A_p}{2} \cos(2\pi (f_p + f_m) t) \right] \cos(2\pi f_p t) \end{aligned} \quad (59)$$

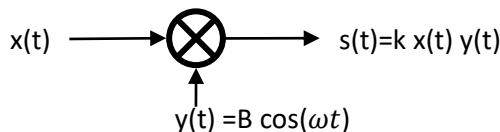
$$\begin{aligned} s(t) &= A_p \cos(2\pi f_p t) \cos(2\pi f_p t) + \frac{k A_m A_p}{2} \cos(2\pi (f_p - f_m) t) \cos(2\pi f_p t) \\ &\quad + \frac{k A_m A_p}{2} \cos(2\pi (f_p + f_m) t) \cos(2\pi f_p t) \end{aligned} \quad (60)$$

A la sortie de filtre passe-bas, on a :

$$v_m(t) = \frac{k A_m A_p}{4} \cos(2\pi f_m t) \quad (61)$$

### 3.8. Mélangeur

Couramment utilisé dans les émetteurs/récepteurs HF, le mélangeur (multiplieur) est un dispositif non-linéaire à deux entrées et une sortie, effectuant une multiplication entre deux signaux  $x(t)$  et  $y(t)$ ,



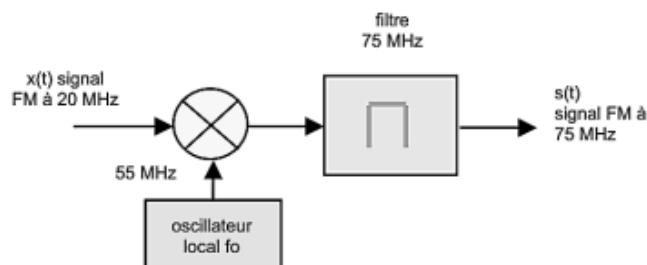
**Figure 48.** Principe de mélangeur de deux signaux

Dans le cas simple où  $x(t)$  est sinusoïdal  $x(t) = A \cos(\omega_0 t)$  le signal en sortie du mélangeur s'écrit :

$$s(t) = k x(t) y(t) = k \frac{A B}{2} \cos(\omega - \omega_0) + k \frac{A B}{2} \cos(\omega + \omega_0) \quad (62)$$

**Exemple 1 :****Changement de fréquence**

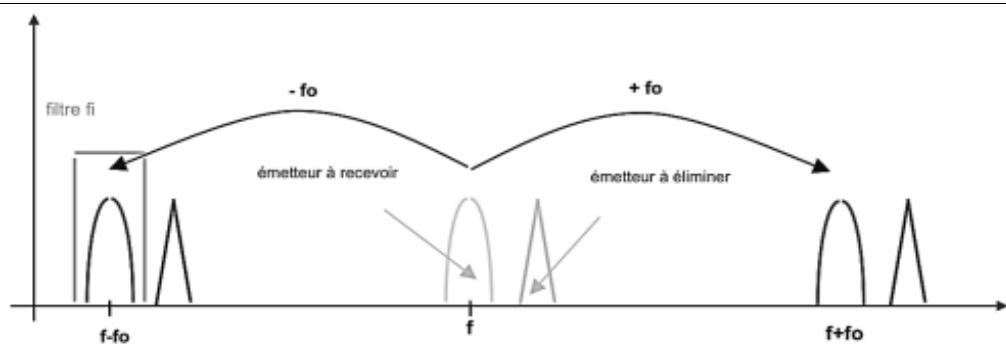
Pour faire passer un signal modulé de 20 MHz à 75 MHz, on le multiplie par une sinusoïde à  $f = 55$  MHz et on fait suivre le mélangeur par un filtre centré sur 75 MHz.

**Exemple 2 :****Changement de fréquence dans un émetteur**

Dans un téléphone GSM, le signal à transmettre vers la station de base est produit à  $f = 160$  MHz. Pour le transposer à la fréquence d'émission de 900 MHz, il va être multiplié par  $f_0 = 740$  MHz, puis filtré à 900 MHz pour éliminer la fréquence indésirable de  $740 - 160 = 580$  MHz.

**Exemple 3 :****Changement de fréquence dans un récepteur**

Pour recevoir la station radio FM à  $f = 100,1$  MHz avec une fréquence intermédiaire  $f_{\text{inter}} = 10,7$  MHz, il faut transposer la chaîne à recevoir à 10,7 MHz. On réglera donc l'oscillateur local à  $f_0 = 90,4$  MHz pour que  $f - f_0 = 100,1 - 90,4 = 10,7$  MHz.



# **CHAPITRE 4**

## **Techniques de transmission numériques**

La transmission numérique est un processus qui implique le transfert d'informations à travers un support physique de communication sous forme de signaux numériques. Pour ce faire, des données analogiques doivent d'abord être converties en données numériques avant d'être transmises. Ce processus de conversion, appelé numérisation, permet de représenter les informations sous forme de séquences de 0 et de 1, correspondant à des bits.

#### 4.1. Principe de transmission numérique

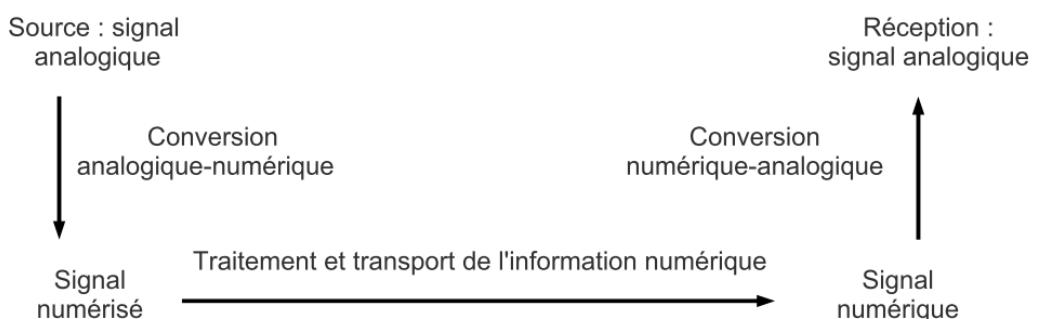
Cependant, les informations numériques ne peuvent pas être directement transmises sous forme de 0 et de 1. Elles doivent être codées sous la forme d'un signal qui peut prendre deux états distincts. Plusieurs méthodes de codage sont utilisées pour représenter ces bits. Parmi les exemples courants de codage, on trouve :

**Deux niveaux de tension par rapport à la masse** : Dans ce cas, les bits 0 et 1 peuvent être représentés par deux niveaux de tension différents, par exemple, une tension basse pour le 0 et une tension élevée pour le 1.

**Différence de tension entre deux fils** : Cette méthode implique de mesurer la différence de tension entre deux fils pour représenter les bits. Une tension positive peut représenter le bit 1, tandis qu'une tension nulle ou négative représenter le bit 0.

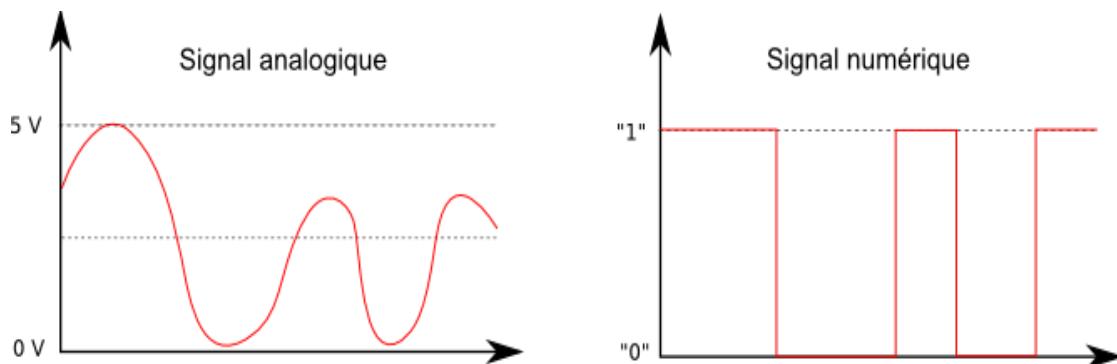
**Présence/absence de courant dans un fil** : Certains systèmes utilisent la présence ou l'absence de courant dans un fil pour coder les bits. La présence de courant peut représenter le bit 1, tandis que son absence représente le bit 0.

**Présence/absence de lumière** : Dans le cas des fibres optiques, la transmission numérique peut être réalisée en modulant la lumière. La présence ou l'absence de lumière peut être utilisée pour coder les bits, où la lumière allumée représente le bit 1 et l'obscurité le bit 0.



**Figure 49.** Principe générale de traitement et transport de l'information numérique

Un signal analogique est un signal continu qui peut prendre une infinité de valeurs, alors que le signal numérique est un signal discret (discontinu), qui se résume en une succession de « 0 » et de « 1 ».



**Figure 50.** Signal analogique et Signal numérique

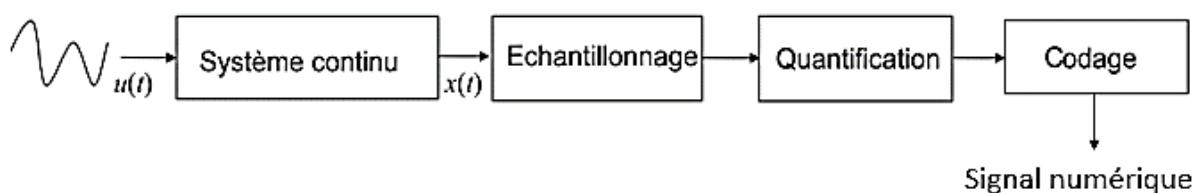
L'objectif de la numérisation est de transformer le signal analogique qui contient une quantité infinie d'amplitudes en un signal numérique contenant lui une quantité finie de valeurs.

Le nombre d'échantillons composant le signal numérique devra être suffisamment grand pour pouvoir représenter le signal analogique de départ mais pas trop grand non plus pour ne pas être trop volumineux.

Deux facteurs devront être ajustés pour répondre à ce cahier des charges : la précision et la rapidité.

#### 4.2. Numérisation des signaux

La chaîne de numérisation désigne le processus complet de conversion d'informations analogiques en données numériques. Ce processus implique plusieurs étapes, chacune contribuant à la transformation des signaux analogiques en une représentation numérique. Voici les étapes typiques d'une chaîne de numérisation :



**Figure 51.** Chaine de conversion analogique / Numérique

**Échantillonnage** : La première étape consiste à prélever des échantillons du signal analogique à des intervalles réguliers. Cela permet de discrétiser le signal en points, créant ainsi une séquence d'échantillons.

**Quantification** : Les échantillons ainsi obtenus sont ensuite quantifiés. Cela signifie que chaque échantillon est attribué à une valeur numérique spécifique. La quantification définit le nombre de bits utilisés pour représenter chaque échantillon, ce qui influence la précision de la représentation numérique.

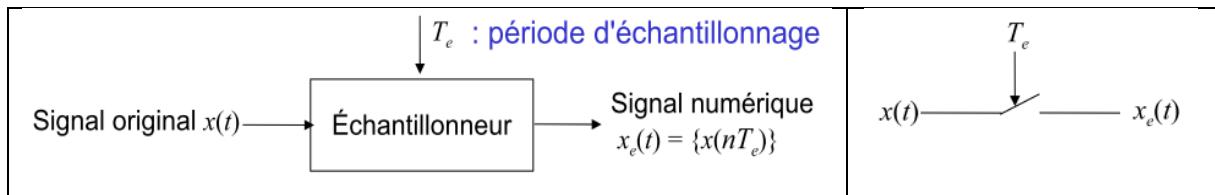
**Codage** : Les valeurs numériques résultantes de la quantification sont ensuite converties en une séquence binaire, où chaque valeur numérique est représentée par une combinaison de bits (0 et 1). C'est à ce stade que les informations analogiques sont transformées en données numériques.

### 4.3. Échantillonnage

Le premier paramètre crucial à définir lors du processus de numérisation est la fréquence d'échantillonnage. Cette étape revêt une importance pour garantir une reconstruction correcte du signal de sortie à partir du signal d'entrée. La fréquence d'échantillonnage, exprimée en hertz (Hz), détermine le nombre d'échantillons prélevés par seconde.

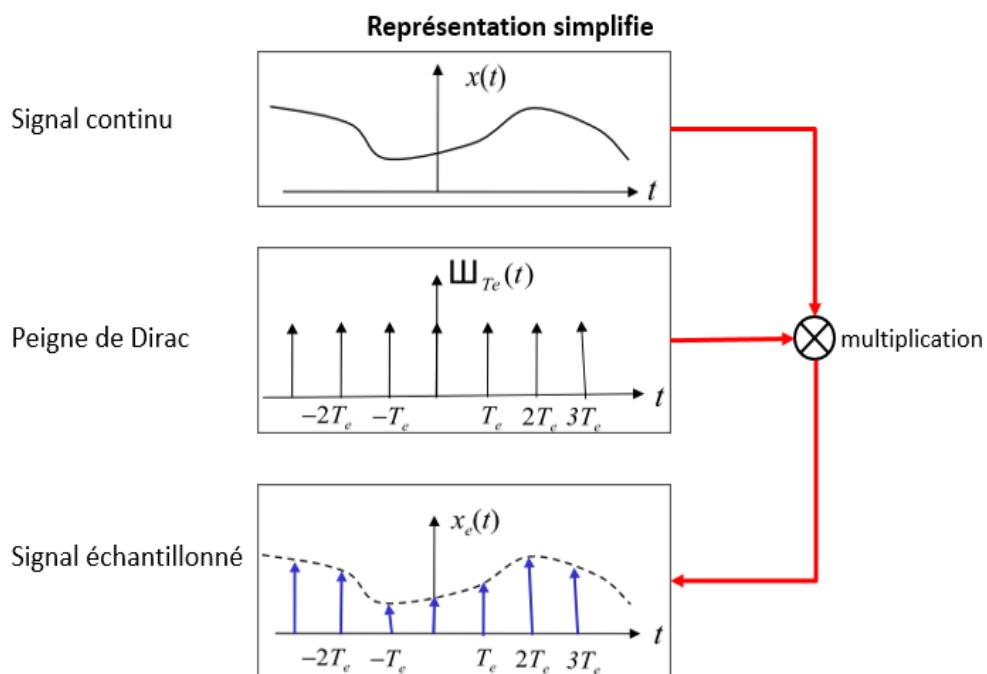
Il est impératif que la fréquence d'échantillonnage soit suffisamment élevée pour capturer de manière précise les variations rapides du signal d'entrée. En d'autres termes, si la fréquence d'échantillonnage est trop basse, certaines fluctuations rapides du signal original seront sous-représentées, réellement négligées dans la version numérique.

Cette limitation est inhérente au théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, qui exprime qu'une fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale du signal analogique pour éviter la perte d'information lors de la conversion. Cette condition garantit que les variations les plus rapides du signal sont correctement échantillonnées et représentées dans la version numérique, préservant ainsi la fiabilité du signal original.



**Figure 52.** Prélèvement des échantillons du signal analogique

**Échantillonnage idéal :** prélèvement pendant un temps infiniment court des valeurs de  $x(t)$  à  $t = nT_e$  (multiple entier de  $T_e$ ).



**Figure 53.** Principe de base d'échantillonnage

### Modélisation mathématique

L'échantillonnage correspond à la multiplication de  $x(t)$  par un peigne de Dirac  $\delta_{T_e}(t)$

$$x_e(t) = x(t) \delta_{T_e}(t) \quad (63)$$

$$x_e(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_e) \quad (64)$$

En utilisant la propriété :

$$x(t) \delta(t - t_0) = x(t_0) \delta(t - t_0) \quad (65)$$

On obtient

$$x_e(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT_e) \delta(t - nT_e) \quad (66)$$

## TF du signal échantillonné

Dans le domaine fréquentiel devient un produit de convolution

$$TF[x_e(t)] = TF[x(t)] * TF[\delta_{T_e}(t)] \quad (67)$$

Où la TF du peigne de Dirac est :

$$TF[\delta_{T_e}(t)] = F_e \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(f - nF_e) \quad (68)$$

On en déduit :

$$TF[x_e(t)] = X(f) * F_e \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(f - nF_e) \quad (69)$$

Comme le produit de convolution est distributif et que :

$$y(t) * \delta(t - t_0) = y(t - t_0) \quad (70)$$

On a alors

$$X_e(f) = F_e \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X(f - nF_e) \quad (71)$$

$$F_e = \frac{1}{T_e} \quad (72)$$

$F_e$  est la fréquence d'échantillonnage

Le spectre de  $X_e(f)$  est celui de  $X(f)$  "périodisé" avec une période fréquentielle  $F_e$ .

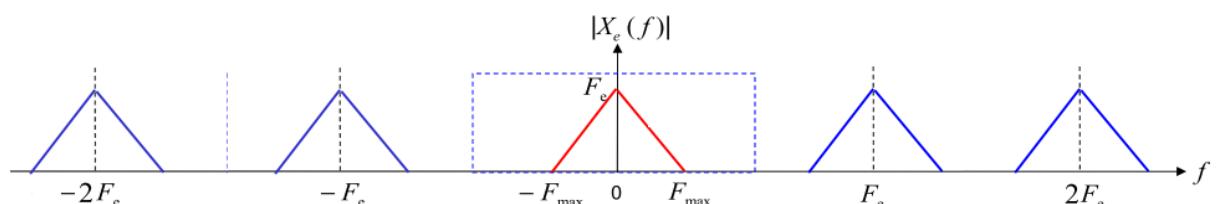


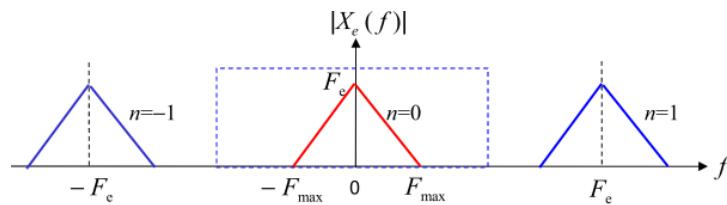
Figure 54. Spectre d'un signal échantillonné

Où  $F_{max}$  est la fréquence maximale du signal  $x(t)$ .

L'échantillonnage dans le domaine temporel se traduit par une "périodisation" de période  $F_e$  dans le domaine fréquentiel.

**Cas 1:**  $F_e \geq 2F_{max}$

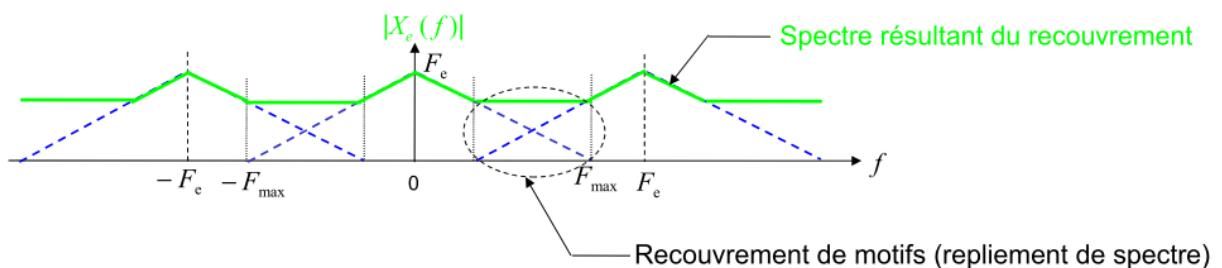
Les motifs élémentaires de  $|X_e(f)|$  sont disjoints (pas de recouvrement des motifs). Le motif principal ( $n = 0$ ) est égal au spectre de  $x(t)$ . Comme les motifs sont disjoints, on peut extraire  $X(f)$  grâce à un filtre passe-bas idéal et donc reconstituer intégralement le signal  $x(t)$  à partir de la connaissance de son échantillonné  $x_e(t)$ .



**Figure 55.** Spectre d'un signal échantillonné dans le cas où  $F_e \geq 2F_{\max}$

### Cas 2: $F_e < 2F_{\max}$

Il n'est pas possible de récupérer le spectre  $X(f)$  par un filtrage approprié. Il n'est donc pas possible de reconstruire le signal initial  $x(t)$  à partir de la connaissance de son échantillonné  $x_e(t)$ .



**Figure 56.** Spectre d'un signal échantillonné dans le cas où  $F_e < 2F_{\max}$

Pour que la répétition périodique du spectre de  $x_e(t)$  ne déforme pas le spectre  $X(f)$  répété, il faut et il suffit que  $F_e \geq 2F_{\max}$

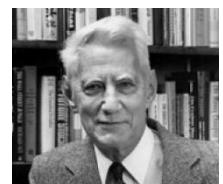
### Théorème de Shannon

La condition nécessaire et suffisante pour échantillonner un signal sans perte d'information est que la fréquence d'échantillonnage  $F_e$  soit supérieure ou égale au double de la fréquence maximale du signal. Plus précisément, si on note  $F_{\max}$  la fréquence maximale du signal, il faut et il suffit que :  $F_e \geq 2F_{\max}$

Pour  $F_e$  fixée,  $F_e/2$  est appelée fréquence de Nyquist : c'est la fréquence maximale admissible du signal pour éviter les distorsions de spectre.

**Claude Shannon** est né le 30 avril 1916 à Gaylord dans le Michigan.

Mathématicien et physicien il entre au M.I.T et sa thèse est considérée comme peut - être la plus importante du siècle. Il entre aux laboratoires Bell qu'il quittera en 1972. Il décède le 24 février 2001.



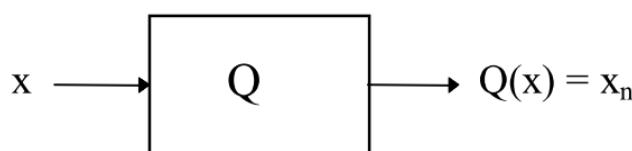
L'ouvrage fondateur est: *A mathematical theory of communication*, *Bell System Technical Journal*, Vol 27, 1948

#### 4.4. Quantification

L'opération de quantification est une étape cruciale dans le processus de numérisation des signaux analogiques. Elle intervient après l'échantillonnage, où des échantillons du signal continu sont prélevés à des intervalles réguliers. La quantification consiste à attribuer une valeur numérique binaire à chaque échantillon afin de représenter de manière discrète le signal continu.

Concrètement, chaque valeur d'échantillon, qui est généralement une valeur analogique continue, est convertie en une valeur numérique discrète en utilisant un nombre fini de bits. Ces bits sont des unités binaires (0 ou 1) qui forment une séquence binaire, représentant ainsi la valeur quantifiée du signal à un instant donné.

Le nombre de bits utilisés pour la quantification influence la précision de la représentation numérique. Plus le nombre de bits est élevé, plus la plage de valeurs que peut prendre chaque échantillon est large, et plus la représentation numérique est précise. Cependant, cela entraîne également une utilisation plus importante de la mémoire ou de la bande passante pour stocker ou transmettre ces données.



**Figure 57.** Bloc de quantification

Chaque niveau de tension est codé par  $p$  bits, et chaque bit peut prendre deux valeurs : 0 ou 1.

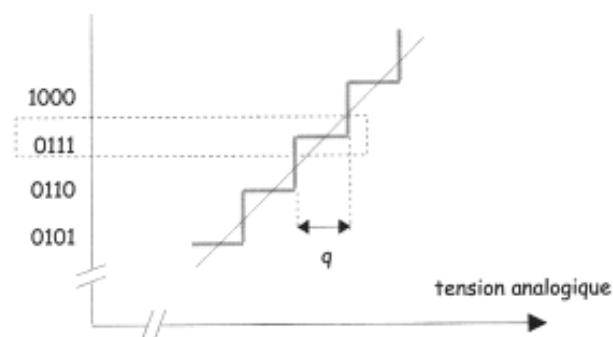
Un convertisseur de  $p$  bits possède  $2^p$  niveaux de quantification.

##### Exemple :

Considérons un convertisseur analogique numérique CAN de 4 bits.

Il y a donc que  $2^4 = 16$  valeurs possibles attribuables à toutes les valeurs prélevées lors de l'échantillonnage.

La figure ci-dessous représente une partie de la caractéristique de transfert d'un convertisseur 4 bits ; à tous les niveaux de tension d'un même palier, le convertisseur fait donc correspondre un seul et même nombre binaire :



**Figure 58.** Principe de base de la quantification

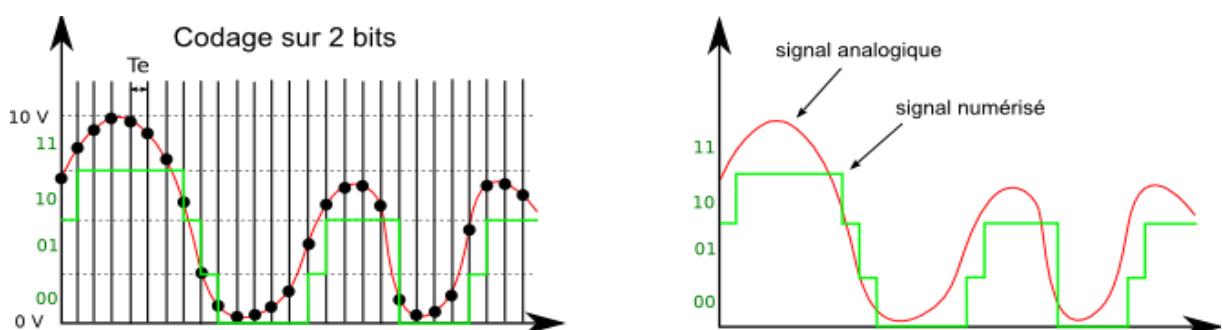
L'opération se fait donc avec une perte d'information d'autant plus grande que  $p$  est petit.

La précision ou résolution du signal obtenu en sortie va dépendre du convertisseur utilisé, autrement dit de l'électronique mise en œuvre.

La limite théorique de la résolution est définie par le nombre de bits du convertisseur analogique numérique.

L'exemple de la figure suivante montre un signal analogique codé sur 1 bit, seules deux valeurs sont possibles pour ce bit soit « 0 » soit « 1 ». La précision est alors très faible et ne permet pas un résultat satisfaisant.

Lorsque le codage s'effectue sur 2 bits, chaque bit pouvant prendre deux valeurs (« 0 » ou « 1 »),  $2^2$  valeurs seront stockées soit un pas de quantification de 2,5 V (soit 10/4).

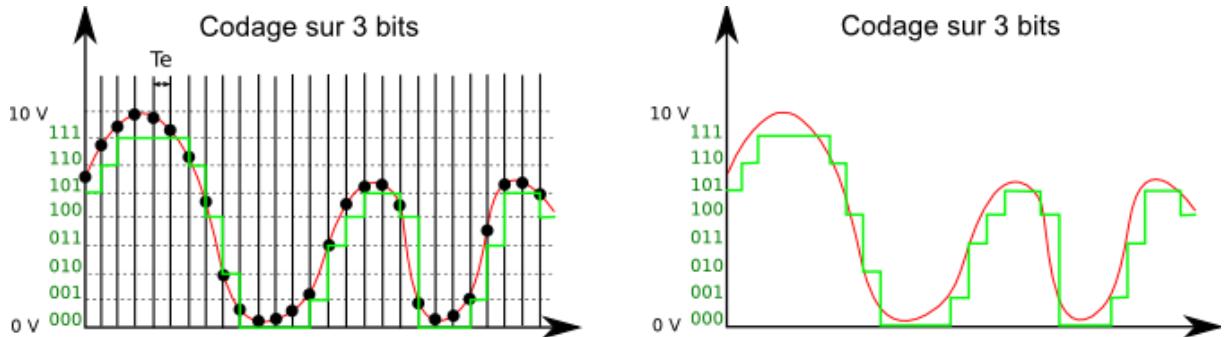


**Figure 59.** Quantification avec deux bits

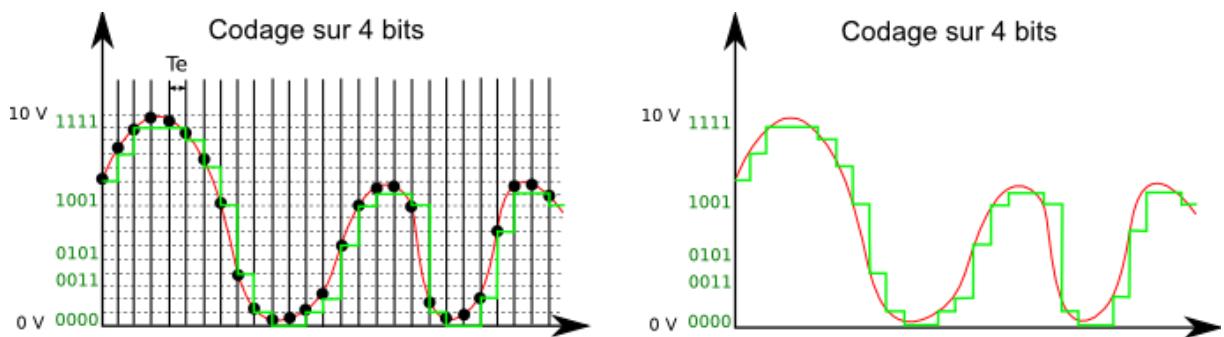
Dans cet exemple, le signal a une amplitude de 10 volts :

- 0 à 2,5 V, le code sera « 00 »
- 2,5 V à 5 V, le code sera « 01 »
- 5 V à 7,5 V, le code sera « 10 »
- 7,5 V à 10 V, le code sera « 11 »

Voici deux exemples de codage sur 3 et 4 bits à fréquence d'échantillonnage fixe.



**Figure 60.** Quantification avec trois bits



**Figure 61.** Quantification avec quatre bits

Plus le nombre de bits important implique que la précision est meilleure, mais plus le signal occupera de mémoire !

#### 4.5. Codage

Pour répondre aux impératifs physiques du canal de transmission, tels que la bande de fréquence, les niveaux logiques de la séquence binaire subissent une transformation dans la forme, ceci donne lieu à des codes en ligne, aussi appelés signaux en bande de base.

Les circuits électroniques digitaux ont adopté à l'origine l'absence de tension pour représenter le 0 et la tension d'alimentation pour représenter le 1, selon la logique du tout ou rien.

Pour que la transmission soit optimale, il est nécessaire que le signal soit codé de façon à faciliter sa transmission sur le support physique.

Il existe pour cela différents systèmes de codage pouvant se classer en deux catégories :

Le codage à deux niveaux : le signal peut prendre uniquement une valeur strictement négative ou strictement positive ( $-X$  ou  $+X$ ,  $X$  représentant une valeur de la grandeur physique permettant de transporter le signal).

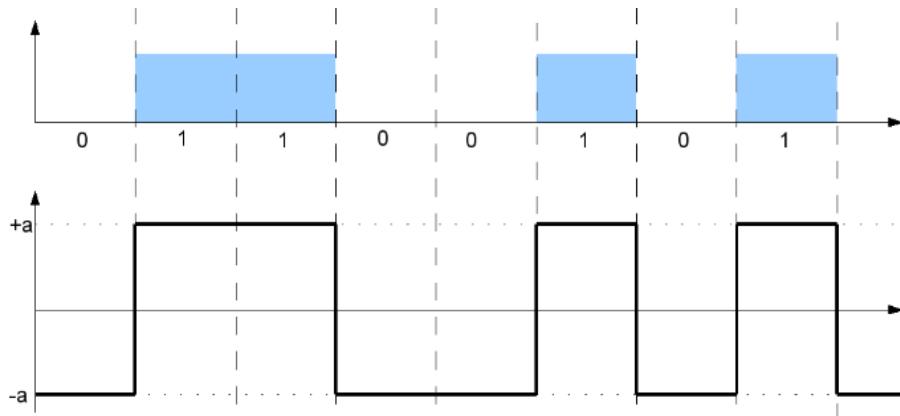
Le codage à trois niveaux : le signal peut prendre une valeur strictement négative, nulle ou strictement positive ( $-X$ ,  $0$  ou  $+X$ ).

#### 4.5.1. Code NRZ

La méthode NRZ (Non Return to Zero) est une technique de codage numérique qui se caractérise par sa simplicité. Elle utilise deux niveaux de tension pour coder les bits d'un signal numérique, suivant les règles suivantes :

Bit de données à 0 : Le niveau de tension est représenté par une valeur négative. Ainsi, pendant la période où le bit de données est à 0, le signal maintient une tension négative constante.

Bit de données à 1 : Le niveau de tension est représenté par une valeur positive. Pendant la période où le bit de données est à 1, le signal maintient une tension positive constante.



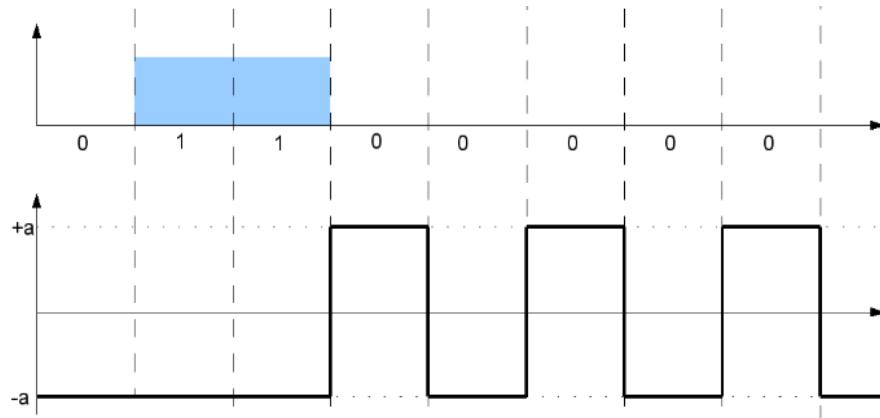
**Figure 62.** Exemple d'un codage NRZ

Les principales caractéristiques du codage NRZ sont :

- Une bonne résistance au bruit
- Une mauvaise adaptation au support (spectre centré sur la fréquence nulle)
- Peu de transitions, donc difficulté de synchronisation d'horloge

#### 4.5.2. Code NRZI (Non Return to Zero Inverted)

Lorsque le bit de donnée est égal à 0, la tension du signal change de polarité à chaque période. En revanche, lorsque le bit de donnée est égal à 1, la tension du signal reste constante d'une période à l'autre. La représentation graphique de ce signal est illustrée ci-dessous.



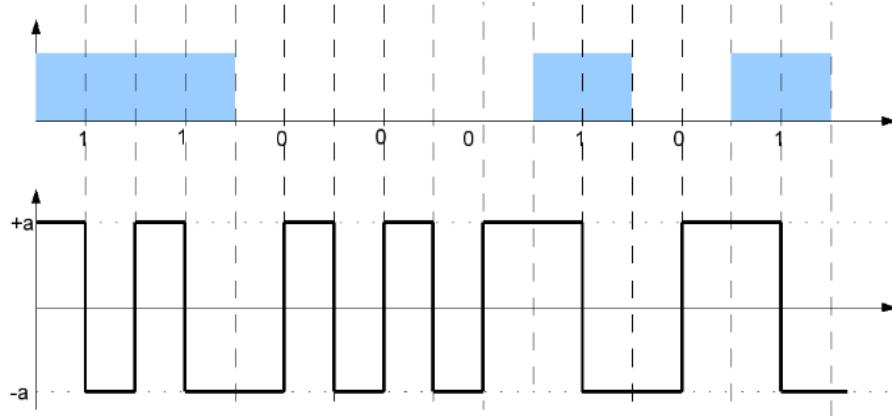
**Figure 63.** Exemple d'un codage NRZI

La principale amélioration de ce codage par rapport à la méthode précédente se manifeste lors des transmissions où le signal demeure pendant de longues périodes à 0. Dans de telles situations, des transitions sont introduites, favorisant la synchronisation de l'horloge du récepteur.

#### 4.5.3. Codage Manchester

Le codage Manchester, également appelé codage biphasé à niveau constant. Dans le codage Manchester, chaque bit de donnée est représenté par deux transitions de signal à travers le milieu d'une période (ou un cycle) d'horloge. Les règles de codage sont généralement définies comme suit :

- Pour représenter un bit logique 0, une transition montante (passage de bas à haut) est placée au milieu de la période, suivie d'une transition descendante (passage de haut à bas) avant la fin de la période.
- Pour représenter un bit logique 1, une transition descendante est placée au milieu de la période, suivie d'une transition montante avant la fin de la période.

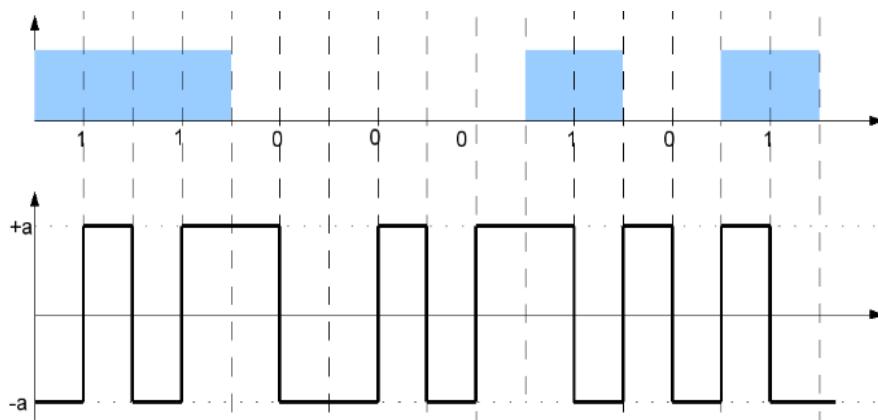
**Figure 64.** Exemple d'un codage Manchester

Cette méthode de codage présente l'avantage de maintenir une fréquence constante du signal, facilitant ainsi la récupération de l'horloge par le récepteur et améliorant la robustesse du système de transmission. Elle est largement utilisée dans des applications telles que les réseaux informatiques, les télécommunications et d'autres systèmes de transmission de données série.

#### 4.5.4. Codage Manchester Différentiel

Le codage Manchester différentiel, aussi appelé codage Manchester à déplacement de phase, est une variante du codage Manchester classique. Dans ce type de codage, la représentation des bits est basée sur les transitions du signal plutôt que sur les niveaux absolus du signal. Les règles du codage Manchester différentiel sont généralement définies comme suit :

- Pour représenter un bit logique 0, une transition (montante ou descendante) est placée au début de la période, et l'état du signal reste inchangé au milieu.
- Pour représenter un bit logique 1, le signal subit une transition au milieu de la période, mais l'état du signal reste inchangé au début de la période.

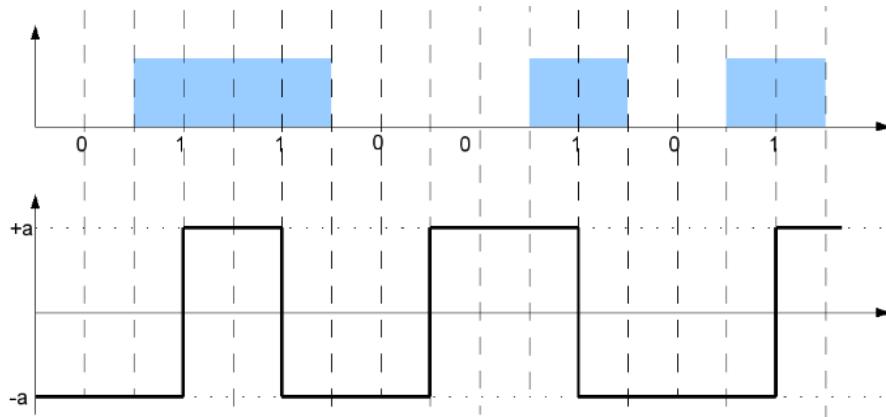
**Figure 65.** Exemple d'un codage Manchester différentiel

Ce type de codage est souvent utilisé dans des environnements où la fiabilité de la transmission des données est cruciale, car il offre une meilleure immunité au bruit et une détection d'erreur améliorée.

#### 4.5.5. Code de Miller

Le code de Miller est dérivé du codage Manchester en supprimant une transition sur deux. Les règles d'encodage prennent la forme suivante :

- Si le bit de donnée est égal à 1, alors une transition est insérée au milieu de l'intervalle significatif.
- Si le bit de donnée est égal à 0, alors il n'y a pas de transition au milieu de l'intervalle significatif. Cependant, si le bit suivant est également égal à 0, une transition est placée à la fin de l'intervalle significatif.



**Figure 66.** Exemple d'un codage Miller

- Le code de Miller permet d'atteindre des débits de transmission élevés, ce qui le rend adapté aux systèmes de communication où la bande passante est un facteur limitant.
- Une particularité de ce code est que même pour la fréquence nulle, une puissance non nulle est transmise.

L'inconvénient principal du code de Miller réside dans une immunité moindre vis-à-vis du bruit par rapport à certains codes précédents. La présence de transitions moins fréquentes peut rendre le signal plus sensible aux perturbations et aux erreurs de transmission.

#### 4.5.6. Codes bipolaires

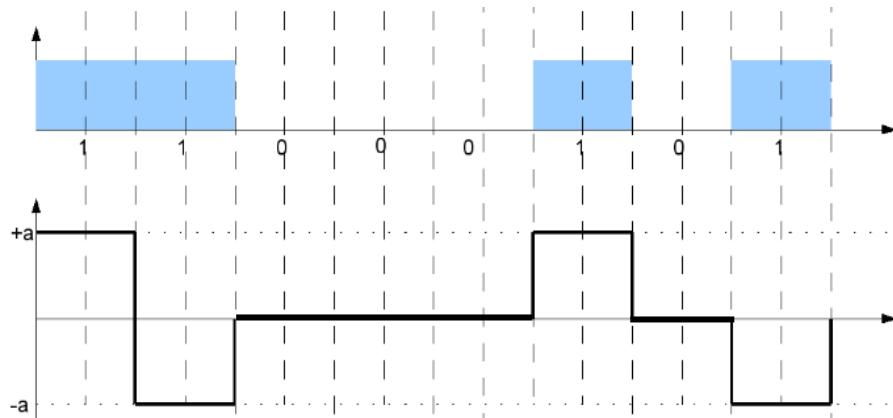
Les codes à 3 niveaux, en particulier le codage bipolaire simple, se démarquent par la création d'un spectre à bande étroite qui présente la particularité de s'annuler lorsque la fréquence tend vers 0.

Dans le cas du signal bipolaire simple, les niveaux sont définis comme suit :

- Niveau :  $-a$  (pour représenter le bit de donnée 1)
- Niveau : 0 (pour représenter le bit de donnée 0)
- Niveau :  $+a$  (pour représenter à nouveau le bit de donnée 1)

Les règles de codage associées à ce signal bipolaire simple sont les suivantes :

- Si le bit de donnée est égal à 0, alors le niveau résultant est nul.
- Si le bit de donnée est égal à 1, alors le niveau alterne entre  $-a$  et  $+a$  à chaque occurrence du bit de donnée 1.



**Figure 67.** Exemple d'un codage 3 niveaux (bipolaire simple)

#### 4.6. Canal de transmission

Le canal de transmission fait référence à tout phénomène physique clairement identifié et délimité sur un support physique donné, capable de transporter un signal. Les canaux de transmission peuvent être divers et sont associés à différents supports de communication. Quelques exemples de canaux de transmission incluent un fil de cuivre, l'atmosphère (utilisée dans les transmissions hertziennes, communément appelées ondes radio), et la fibre de verre (ou fibre optique).

Le signal lui-même est transporté sous la forme d'une onde ou d'une oscillation qui provoque une variation dans une caractéristique physique du support. Cette caractéristique peut être, le plus souvent, une différence de potentiel électrique, une onde radioélectrique, ou une variation de l'intensité lumineuse dans le cas spécifique de la fibre optique.

Les canaux de transmission, qu'ils soient physiques ou sans fil, jouent un rôle important dans la transmission des informations numériques d'un point à un autre. Ces informations sont représentées sous forme de signaux discrets, souvent sous forme binaire (0 et 1). Ces signaux numériques sont transmis à travers le canal de transmission pour atteindre leur destination. Voici quelques aspects clés :

**Capacité du Canal :** Chaque canal de transmission a une capacité limitée qui détermine la quantité d'information qu'il peut transporter. Cette capacité est influencée par des facteurs tels que la bande passante du canal, le niveau de bruit et la qualité du support de transmission.

**Distorsion et Bruit :** Lorsque le signal numérique traverse un canal, il peut subir des distorsions ou être affecté par le bruit. Les distorsions peuvent altérer la forme d'onde du signal, tandis que le bruit peut ajouter des perturbations indésirables. Les communications numériques doivent souvent intégrer des techniques de correction d'erreurs pour atténuer ces effets.

**Modulation et Démodulation :** Pour s'adapter aux caractéristiques du canal, les signaux numériques sont souvent modulés avant d'être transmis et démodulés à la réception. La modulation permet d'adapter le signal à la bande passante disponible et aux propriétés du canal.

**Protocoles de Communication :** Les communications numériques impliquent l'utilisation de protocoles spécifiques pour organiser, transmettre, et recevoir les informations. Ces protocoles sont conçus en tenant compte des caractéristiques du canal pour assurer une transmission fiable et efficace.

## Conclusion générale

L'objectif fondamental de ce cours était de fournir aux étudiants une vue d'ensemble complète des principes fondamentaux sous-tendant les systèmes de télécommunications, qu'ils soient de nature analogique ou numérique, tout en leur permettant de déduire les caractéristiques minimales nécessaires à leur fonctionnement efficace. Pour atteindre cet objectif, le cours s'est déroulé en plusieurs chapitres :

Dans le premier chapitre, les bases ont été posées en abordant l'historique et l'évolution des télécommunications. Les étudiants ont ainsi pu comprendre comment cette discipline cruciale a évolué au fil du temps. De plus, le chapitre a exploré les divers services offerts par les télécommunications, montrant la richesse des possibilités offertes par cette technologie.

Le deuxième chapitre s'est incliné sur l'analyse des systèmes de communication. Il a examiné les sources et les types de signaux utilisés dans les télécommunications, fournissant ainsi une base solide pour comprendre la nature de l'information transmise. De plus, le chapitre a présenté le schéma de base et les principes fondamentaux qui sous-tendent tout système de communication. Il a également abordé divers supports de transmission, soulignant leur rôle essentiel dans le processus de transmission.

Dans le troisième chapitre, les techniques de transmission analogique ont été présentées. Les étudiants ont ainsi pu appréhender les fondements des systèmes de communication traditionnels basant sur la modulation analogique.

Enfin, le quatrième chapitre a présenté les techniques de transmission numérique. Les étudiants ont ainsi pu se familiariser avec les systèmes de communication numérique.

## **Documents de références**

- [1] P.G Fontolliet, « Systèmes de Télécommunications », vol. XVIII, Lausanne, 1999.
- [2] M. T. Benhabiles, « Télécommunications fondamentales », polycopié de cours et TD, université Constantine, Algérie.
- [3] S. Abdelmouleh, « Traitement du signal », polycopié de cours, Nabeul, Tunisie, 2017
- [4] Y. Bennani, « Télécommunications fondamentales », polycopié de cours, université Blida 1, Algérie.
- [5] L. Mostari, « Télécommunications fondamentales », polycopié de cours, université Chlef, Algérie.
- [6] O. Chaumette, « Numérisation d'un signal analogique », TP, Lyon, France.
- [7] M. Christophe, « Transmission des signaux : cours et exercices d'électronique », Tec & Doc Lavoisier, 1995
- [8] D. Dromard et D. Seret, « Architectures des réseaux », 2013.