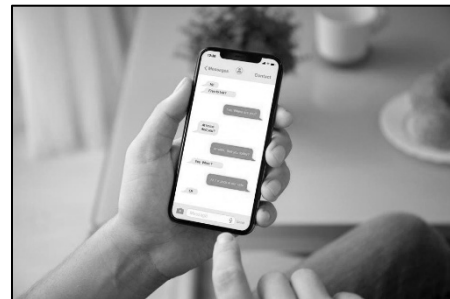


Chapitre 12 : Transmission de l'information

I. Introduction

La transmission de l'information constitue un pilier fondamental de la société moderne, car elle permet l'échange de données entre systèmes, machines et individus. Elle s'appuie sur différents supports (fils, ondes, fibres optiques) et répond au besoin croissant de connectivité. Sur le plan technique, elle se réalise soit en bande de base, où les signaux sont envoyés directement, soit par modulation, où une onde est adaptée pour garantir une communication efficace, notamment sans fil.



Dans ce cours, notre principal objectif sera d'explorer en détail les **principes** et les **applications** pratiques concernant la transmission en bande de base.

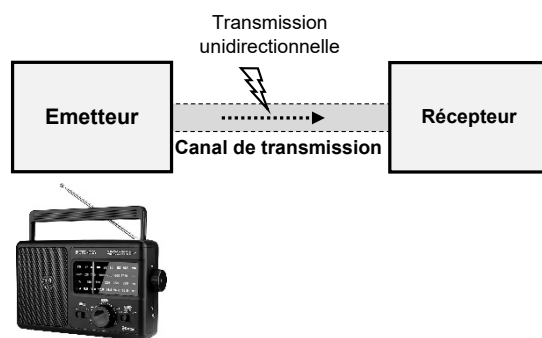
II. Sens de transmission de l'information

Une liaison de données associe matériels et logiciels assurant l'échange d'informations entre équipements. Selon les contraintes techniques et fonctionnelles, trois **modes principaux de transfert** existent entre deux appareils : **simplex**, **half-duplex** et **full-duplex**.

1. Liaison SIMPLEX

Une liaison **SIMPLEX** correspond à une communication unidirectionnelle : les données circulent uniquement de l'émetteur vers le récepteur. Ce dernier ne peut pas répondre ni renvoyer d'informations. L'émetteur garde ainsi le contrôle exclusif du transfert.

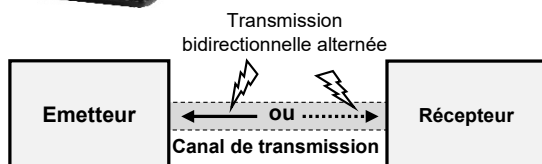
Exemple : Radiodiffusion, télédiffusion, etc.



2. Liaison HALF-DUPLEX

Une liaison **HALF-DUPLEX** autorise la communication bidirectionnelle, mais de manière alternée. Chaque appareil peut être tour à tour émetteur ou récepteur, sans simultanéité. Ainsi, la transmission s'effectue dans un seul sens à la fois.

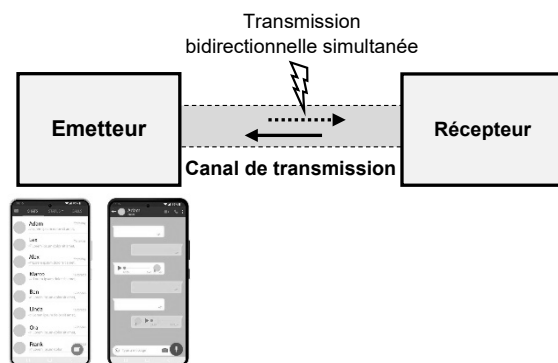
Exemple : Talkie-walkie



3. Liaison FULL-DUPLEX

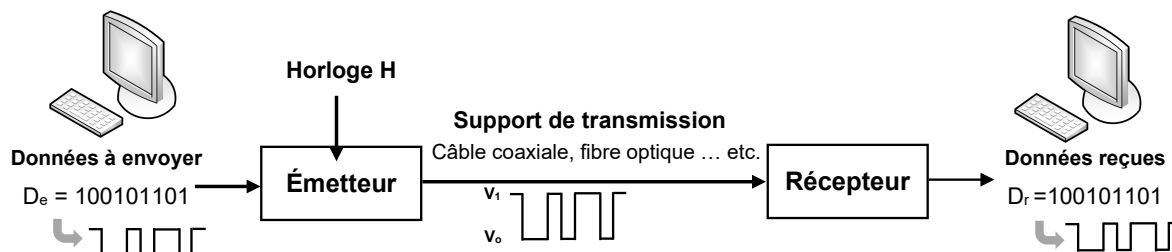
Une liaison **FULL-DUPLEX** assure une communication simultanée dans les deux sens. Les appareils peuvent envoyer et recevoir des données en même temps, garantissant un échange continu, comparable à une conversation téléphonique.

Exemple : Une conversation sur WhatsApp



III. Transmission numérique de l'information

Dans les réseaux informatiques, l'information est transmise sous forme numérique, représentée par des suites de « 0 » et de « 1 ». L'objectif essentiel est d'assurer que les données reçues soient identiques à celles émises. Cette transmission s'effectue à un rythme régulier, synchronisé par un signal appelé **horloge H**. Le schéma suivant illustre une liaison numérique entre deux équipements, l'un jouant le rôle d'émetteur et l'autre de récepteur.

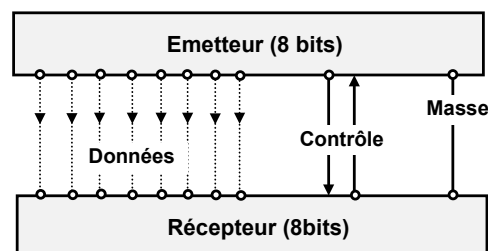


Remarque : Afin de transmettre les données par le support, elles sont converties en signaux électriques, souvent en utilisant deux niveaux tensions distinctes (**V0 pour "0" et V1 pour "1"**).

1. Modes de transmission

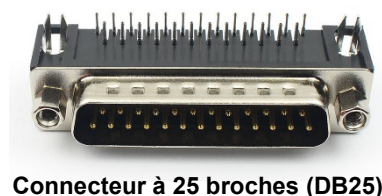
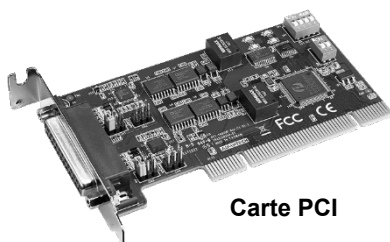
1.1. Transmission parallèle

La liaison parallèle permet de transmettre **simultanément plusieurs bits** en utilisant autant de lignes de transmission que de bits. Cette technique est largement utilisée à l'intérieur des ordinateurs, notamment dans les bus mémoire, les bus processeurs ou encore les bus PCI, où une grande rapidité de transfert est indispensable.



Dans une liaison parallèle, chaque fil transporte un signal binaire représenté par un **niveau électrique** :

- **Niveau bas (0 logique) :** généralement proche de 0 V.
- **Niveau haut (1 logique) :** dépend de la technologie (+5V en TTL, +3,3 V en CMOS).



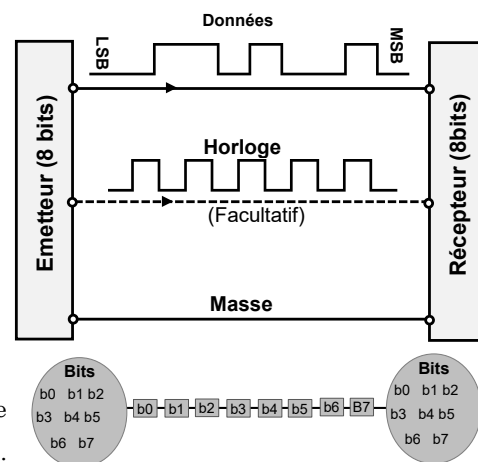
Bien que rapide, elle est coûteuse, encombrante (un fil par bit) et sensible aux interférences électriques, limitant son utilisation sur de longues distances. Elle était courante dans les premiers ordinateurs et les connexions internes, mais la transmission série est maintenant préférée pour les communications longue distance en raison de ses avantages.

1.2. Transmission série

La transmission série est une technique de communication dans laquelle les bits (représentés par « 0 » et « 1 ») sont **envoyés successivement**, un par un, sur une seule ligne de transmission. Contrairement à la transmission parallèle, où plusieurs bits circulent en même temps sur différentes lignes, elle fonctionne de manière séquentielle.

Bien que **plus lente**, cette méthode est largement utilisée dans les **communications à longue distance** et dans les liaisons entre ordinateurs et périphériques (modems, ports série, câbles de communication, USB, etc.).

Le principe fondamental de la transmission série repose sur l'utilisation de **registres de décalage**, qui assurent l'envoi et la réception ordonnée des données.

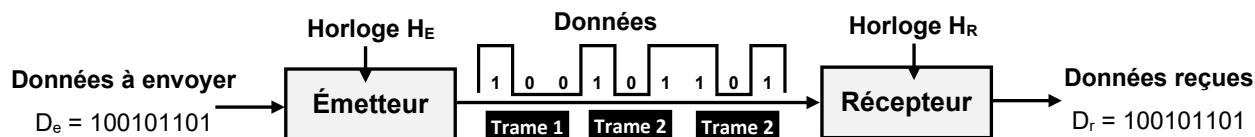


2. Synchronisation de transmission de l'information

La transmission d'informations numériques exige une synchronisation précise entre l'émetteur et le récepteur afin de garantir que les données reçues correspondent exactement aux données envoyées. Sans synchronisation, les bits pourraient être mal interprétés (par exemple, confondre un « 0 » avec un « 1 »), ce qui entraîne des erreurs.

2.1. Transmission asynchrone

La transmission est dite **asynchrone** car l'horloge d'émission (H_E) n'est ni transmise physiquement au récepteur, ni intégrée implicitement dans le signal. Ainsi, les horloges de l'émetteur (H_E) et du récepteur (H_R) fonctionnent de manière totalement indépendante.

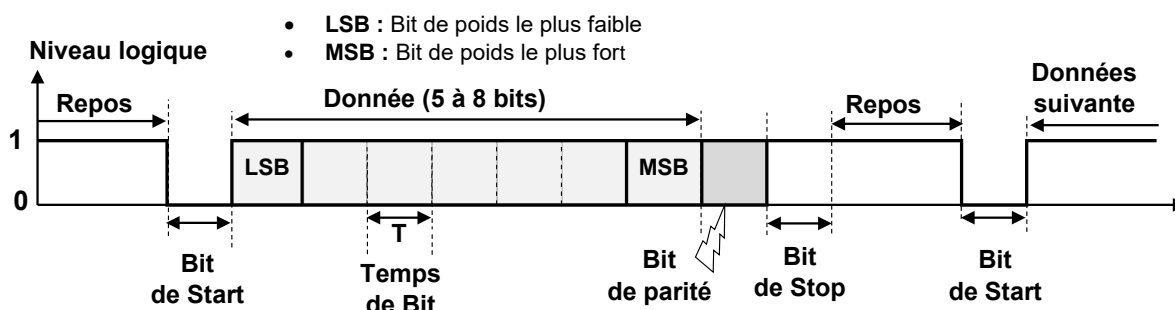


En transmission asynchrone, chaque caractère est encadré par des **bits de start et de stop** assurant la synchronisation et la détection correcte des données. Cette méthode tolère de **petites différences entre les horloges d'émission et de réception** grâce aux recalages périodiques. L'information est transmise **caractère par caractère** dans séquence binaire dite **trame**, ce qui simplifie les échanges mais **diminue l'efficacité** sur de grands volumes, par exemple les liaisons série classiques (RS232, UART) utilisent ce principe.

🔗 Trame d'une transmission asynchrone

Une trame asynchrone est une unité de transmission composée de bits spécifiques qui permettent au récepteur d'identifier correctement le début, le contenu et la fin d'un caractère transmis, sans partager l'horloge avec l'émetteur. La structure d'une trame asynchrone se définit en général par les éléments suivants :

- ☑ **Bit de Start (Bit de Début)** : Signal de début qui indique le début de la transmission d'une donnée (valeur logique 0).
- ☑ **Données** : Les bits de données eux-mêmes, qui représentent l'information à transmettre (généralement 5 ou 8 bits).
- ☑ **Bits de Parité (optionnels)** : Des bits supplémentaires qui peuvent être utilisés pour vérifier l'intégrité des données.
- ☑ **Bit(s) de Stop (Bit d'Arrêt)** : Un signal de fin qui indique la fin de la transmission d'une donnée (valeur logique 1, souvent 1 ou 2 bits).



Ces éléments assurent au récepteur la synchronisation et la bonne interprétation des données transmises de façon asynchrone, même lorsqu'elles ne sont pas envoyées à intervalles réguliers. L'un des exemples les plus connus de ce mode de transmission est la **liaison série RS232**.

🔗 Paramètres de la transmission en liaison RS232

- **Durée du Start** : fixée à 1 temps élémentaire d'horloge (T).
- **Durée du Stop** : peut-être de $1T$, $1.5T$ ou $2T$ (la valeur la plus utilisée étant $1T$).
- **Protection contre les erreurs** : assurée par un bit de parité, pouvant être paire ou impaire.

🔗 Vitesse de communication ou débit de transmission

La vitesse de transmission D , aussi appelée **débit binaire** ou *baud rate*, désigne le nombre de bits de données envoyés par unité de temps. Elle s'exprime en **bauds**, où **1 baud correspond à la transmission d'un bit par seconde (b/s)**.

Le débit est exprimé par les relation suivant :

En fonction de temps de un bit T	En fonction du nombre total de bits transmis
$D = \frac{1}{T}$	$D = \frac{\text{Nombre de bits transmis}}{\text{Temps de transmission}} = \frac{N_{\text{bits}}}{T_{\text{trans}}}$

Les vitesses normalisées de RS232 : 300, 600, 1200, 2400, 9600, 19200, 38400 et 115200 bauds

🔗 Génération du bit de parité

Le bit de parité est un bit supplémentaire ajouté à chaque octet transmis. Son rôle est de contrôler l'intégrité des données en servant de « marqueur » permettant de détecter certaines erreurs de transmission. Il existe deux modes courants de parité :

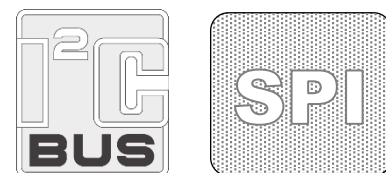
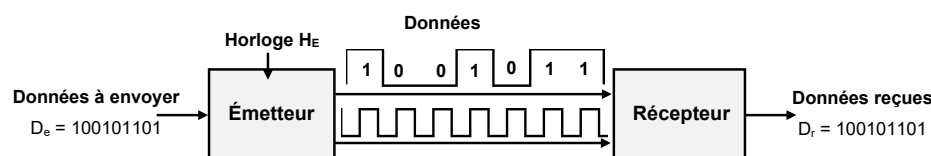
Parité paire (Even parity) :	Parité impaire (Odd parity) :
Si le nombre de bits « 1 » dans l'octet est pair , le bit de parité = 0. Et si le nombre de bits « 1 » est impair , le bit de parité = 1.	Si le nombre de bits « 1 » dans l'octet est impair , le bit de parité = 0. et si le nombre de bits « 1 » est pair , le bit de parité = 1.
Exemple : D = 10110001 <i>On a : Nombre des "1" : N(1) = 4 ; Donc le "4" est pair ; d'où : P = 0</i>	Exemple : D = 10110001 <i>On a : Nombre des "1" : N(1) = 4 ; le "4" est pair ; d'où : P = 1</i>

2.2. Transmission synchrone

La transmission synchrone est une technique de communication dans laquelle l'émetteur et le récepteur partagent la même horloge ou un signal de synchronisation commun. Les données sont envoyées à intervalles réguliers, sous forme de blocs ou trames continues, ce qui garantit un rythme stable et précis. On distingue de mode de transmission synchrone :

🔗 Emission d'un ligne d'horloge :

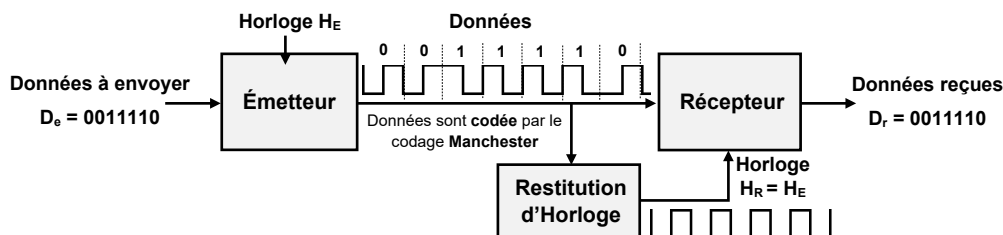
En transmission synchrone, la donnée circule sur une ligne dédiée tandis que l'horloge est transmise sur une autre ligne. Ce signal d'horloge, généré par l'émetteur, sert de référence temporelle au récepteur, garantissant une lecture correcte et parfaitement synchronisée des données.



Exemple : Les protocoles **I²C** et **SPI** utilisent une ligne d'horloge (SCL pour I²C et SCLK pour SPI) pour synchroniser la transmission. Les données circulent sur des lignes séparées, assurant une communication fiable entre circuits intégrés.

🔗 Synchronisation par horloge embarquée

Dans ce mode, l'horloge est incluse dans le signal transmis grâce à un schéma de codage spécifique. Le récepteur récupère ainsi la cadence directement depuis la trame de données, sans ligne supplémentaire d'horloge.



Exemple : dans les réseaux **Ethernet**, on utilise le **codage Manchester**, où chaque bit est représenté par une transition, permettant de transmettre simultanément l'information et l'horloge

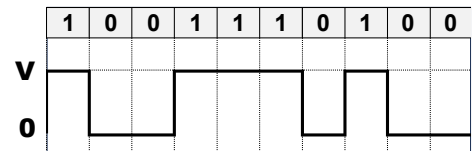
IV. Transmission en bande de base

1. Présentation

La **transmission en bande de base** consiste à envoyer directement un signal numérique sur le support de transmission, sans étape de modulation. Chaque bit est représenté par un niveau de tension distinct. Cette méthode est très efficace sur de **courtes distances** et utilisée notamment dans les réseaux **Ethernet**.

Cette approche permet de simplifier la conception des systèmes, de réduire les coûts, d'exploiter toute la bande passante pour un seul signal et de garantir une communication efficace et fiable sur de courtes à moyennes distances.

Le codage **RZ (Retour à Zéro)**, dans sa forme la plus simple, associe une tension V au bit « 1 » et une tension nulle au bit « 0 ». Ce principe, bien que facile à mettre en œuvre, entraîne plusieurs limites :



- La tension nulle peut signifier soit un « 0 », soit l'**absence de signal**, créant une **ambiguïté**.
- Le signal contient une **composante continue inutile (pertes d'énergie électrique dans la ligne de transmission)**.
- De longues suites de « 0 » ou de « 1 » peuvent entraîner une **perte de synchronisation** entre émetteur et récepteur.

Pour résoudre ces problèmes, plusieurs techniques ont été développées :

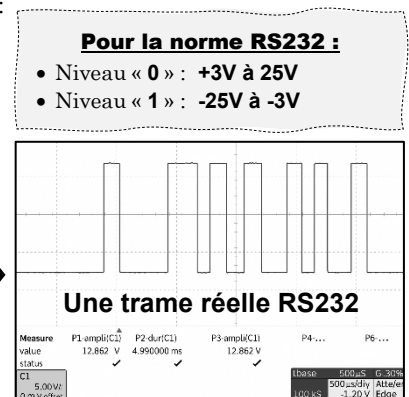
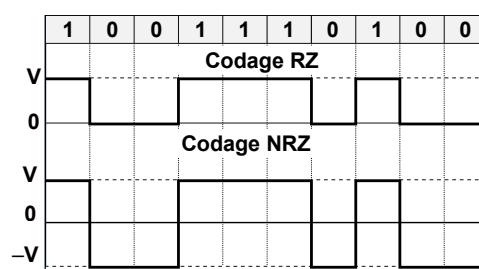
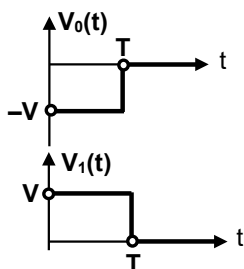
- **NRZ (Non Return to Zero)** : très simple, largement utilisé.
- **Manchester** : codage intégrant l'horloge, utilisé dans les réseaux **Ethernet**.
- **Manchester différentiel** : plus robuste face aux inversions de polarité.
- **Miller** : utilisé pour certaines transmissions à bande étroite.

Pour simplifier l'étude, nous retiendrons uniquement le **codage NRZ (Non Return to Zero, Non-Retour à Zéro)**, car il constitue la base du fonctionnement de la liaison **RS232**.

2. Codage NRZ (No Return to Zero)

Le codage NRZ est une méthode simple et largement utilisée en transmission de données numériques. Son principe repose sur l'affectation d'un niveau de tension constant pendant toute la durée d'un bit T :

- Le bit « 1 » est représenté par une tension positive $V_1 = +V$.
- Le bit « 0 » est représenté par une tension opposée $V_0 = -V$.

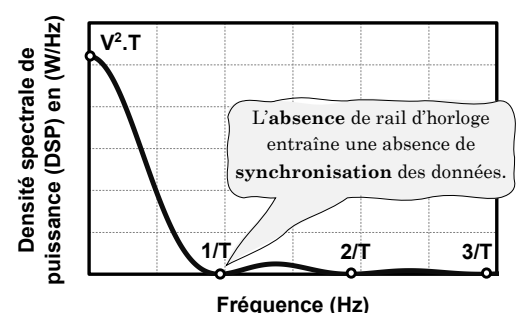


3. Propriétés de codage NRZ : la densité spectrale de puissance DSP

La **densité spectrale de puissance (DSP)** décrit la manière dont l'énergie ou la puissance d'un signal est **répartie en fonction de la fréquence**.

Dans le cas d'un **signal NRZ**, la DSP met en évidence :

- Présence d'une **composante continue** (inutile)
- Difficultés de **synchronisation** dues au manque d'énergie autour de la fréquence d'horloge $\Rightarrow$ nécessite une **synchronisation externe !!!**
- **Bande passante principale** est égale au **débit binaire**.



V. Supports de transmission

1. Présentation

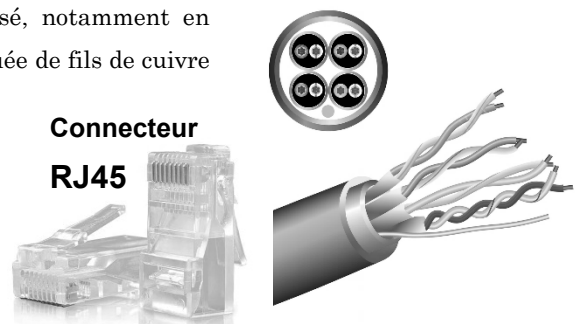
Les supports de transmission sont les canaux physiques ou immatériels permettant le transfert d'informations entre un émetteur et un récepteur. Ils se classent en **supports filaires** (paire torsadée, coaxial, fibre optique) et **supports sans fil** (ondes radio, micro-ondes, infrarouge), chacun offrant des performances adaptées aux besoins de communication.

2. Supports de transmission filaires

2.1. Paire torsadée

La paire torsadée est le support le plus ancien et le plus utilisé, notamment en téléphonie et réseaux Ethernet (câble RJ45 à 4 paires). Elle est constituée de fils de cuivre torsadés pour limiter les interférences.

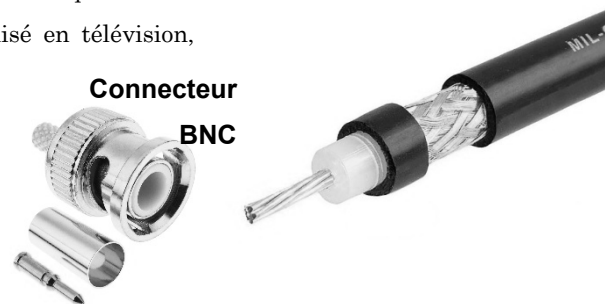
- ✓ **Débit** : de quelques kbit/s à plusieurs centaines de Mbit/s selon la qualité et la longueur.
- ✓ **Avantage** : faible coût, installation simple.
- ✓ **Limite** : sensible aux bruits, portée réduite.



2.2. Câble coaxial

Le **coaxial** est formé d'un conducteur central entouré d'un blindage métallique. Il offre une meilleure immunité aux parasites que la paire torsadée. Utilisé en télévision, vidéosurveillance et anciens réseaux Ethernet (10Base2, 10Base5).

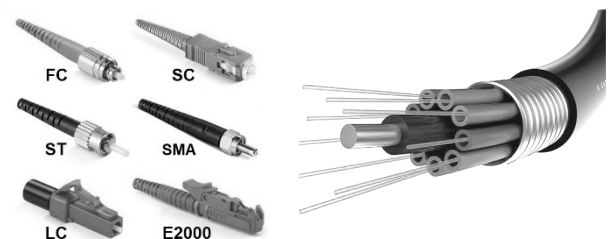
- ✓ **Débit** : jusqu'à plusieurs centaines de Mbit/s sur de courtes distances.
- ✓ **Avantage** : bon blindage, moins sensible aux interférences.
- ✓ **Limite** : coût plus élevé et moins flexible.



2.3. Fibre optique

La **fibre optique** transmet des signaux lumineux guidés par réflexion totale dans un cœur de silice. C'est aujourd'hui le support le plus performant (réseaux Internet, backbone).

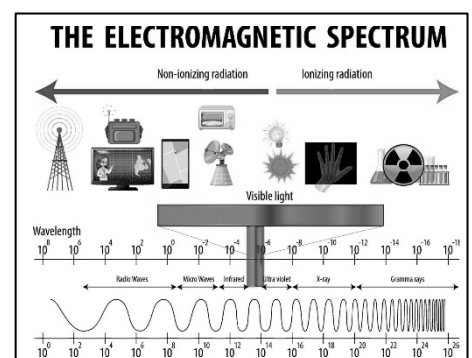
- ✓ **Débit** : de plusieurs centaines de Mbit/s à plusieurs Gbit/s.
- ✓ **Avantage** : très haut débit, grandes distances (jusqu'à 300 km sans répéteur), insensible aux parasites.
- ✓ **Limite** : installation coûteuse, connectique délicate.



3. Supports de transmission supports sans fil

Les supports de transmission sans fil utilisent les **ondes électromagnétiques** pour transporter l'information sans liaison physique entre émetteur et récepteur.

- ✓ Les **ondes radio** couvrent de quelques mètres (Bluetooth $\approx$ 10 m, Wi-Fi $\approx$ 100 m) à plusieurs kilomètres (téléphonie GSM/4G/5G).
- ✓ Les **micro-ondes** (300 MHz – 30 GHz) sont utilisées pour les faisceaux hertziens terrestres et les liaisons satellitaires, offrant un haut débit sur de longues distances.
- ✓ Les **ondes infrarouges**, limitées à quelques mètres, équipent les télécommandes et certaines liaisons locales point-à-point.



VI. Caractéristiques d'un canal de transmission

Un canal de transmission est le milieu par lequel circulent les signaux (bits). Exemples : cuivre (paires torsadées, coax), fibre optique, ondes radio (Wi-Fi, 4G/5G). Le canal modifie amplitude, phase et temporel des signaux.

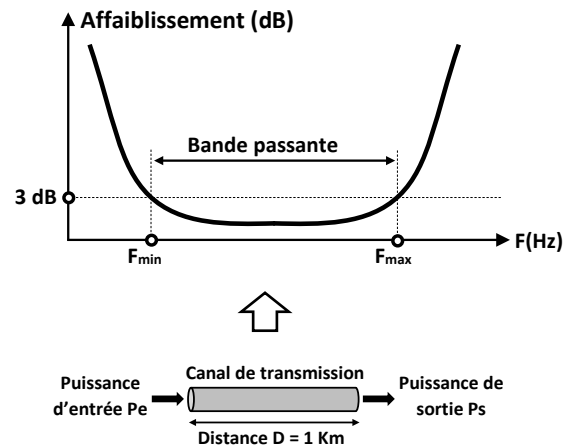
1. Bande passante B et l'affaiblissement A

L'affaiblissement **A** correspond à la diminution d'un signal au cours de sa propagation. Elle dépend du support utilisé, de la fréquence et de la distance parcourue. Elle s'exprime généralement en décibels et s'additionne tout au long d'une liaison. Il s'exprime par :

$$A = 10 \log_{10} \left(\frac{P_e}{P_s} \right) \text{ unité : dB / Km}$$

Avec **P_s** est la puissance reçue à une distance normalisée de **D = 1 Km**.

La **bande passante B** d'un canal représente l'intervalle de fréquences qu'il transmet fidèlement. Plus elle est large, plus le débit d'information possible croît. Hors de cette plage, les signaux sont affaiblis, entraînant pertes et distorsions dans la transmission. La bande passante se définit par rapport à un affaiblissement admissible à 3 dB : **B = F_{max} - F_{min}**



2. Bruit et capacité de transmission

Le bruit regroupe des parasites, souvent électromagnétiques, qui déforment le signal transmis. De courte durée mais intenses, ils perturbent les lignes haut débit et provoquent des erreurs de transmission.

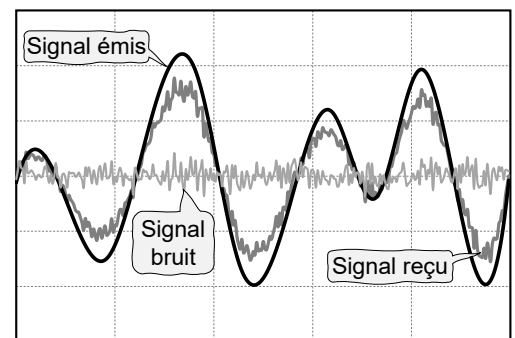
La quantité de bruit présent sur une ligne de transmission peut être quantifiée par le rapport **signal sur bruit S/B** et défini en dB par :

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_b} \right)$$

Avec : **P_s** est la puissance du signal reçu et **P_b** est la puissance du bruit.

Ainsi, en appliquant la relation de Nyquist, on obtient le débit maximal (ou capacité de transmission C) de la ligne bruitée, exprimé en bits par seconde (bps) : **C = B . log₂(1 + SNR)** avec **SNR = $\frac{P_s}{P_b}$**

Remarque : La capacité C fixe une limite orientant choix de modulation, codage et/ou architecture système.

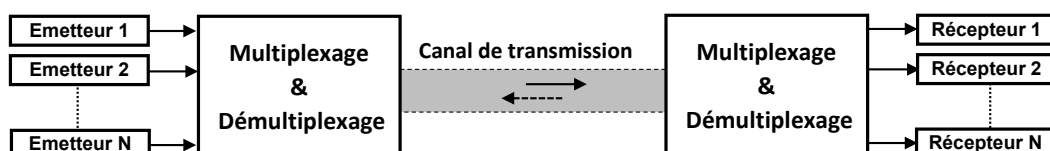


3. Vitesse de propagation et Temps propagation

La **vitesse de propagation** désigne la rapidité de déplacement de l'onde électromagnétique dans le câble, déterminée par ses propriétés électriques, souvent voisine d'une fraction de la vitesse de la lumière dans le vide. Le **temps de propagation** est le temps pour qu'un signal parcoure une liaison. Il dépend de la longueur et de la vitesse du support, influençant latence, synchronisation et cadence protocolaires.

VII. Multiplexage de données

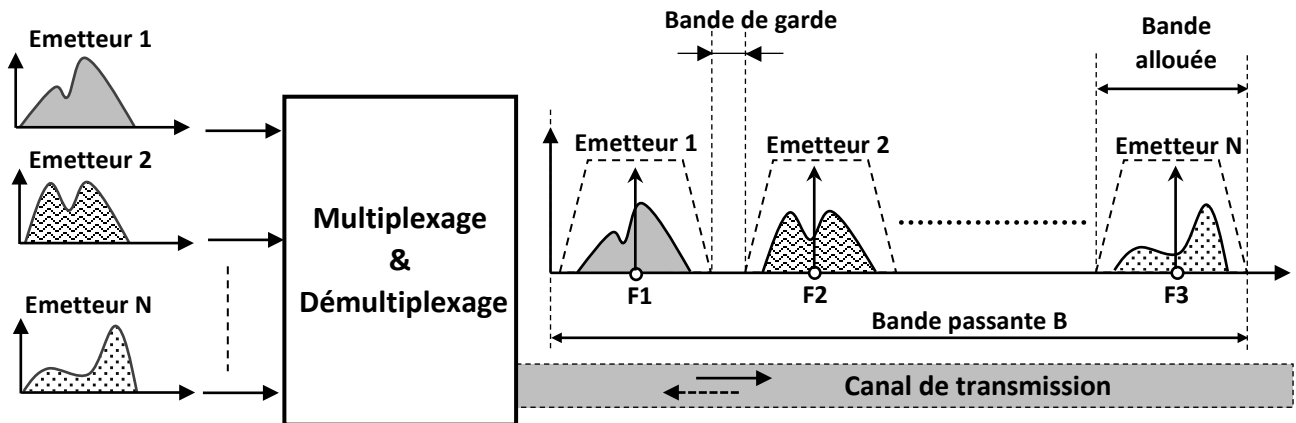
Le multiplexage permet de partager un même support de transmission, soit pour la communication bidirectionnelle, soit pour faire transiter plusieurs flux simultanément. Le **multiplexeur regroupe** les signaux en un flux composite unique, tandis que le **démultiplexeur restitue** chaque information vers sa sortie correspondante. On distingue de deux types plus courants :



1. Multiplexage fréquentiel (FDM)

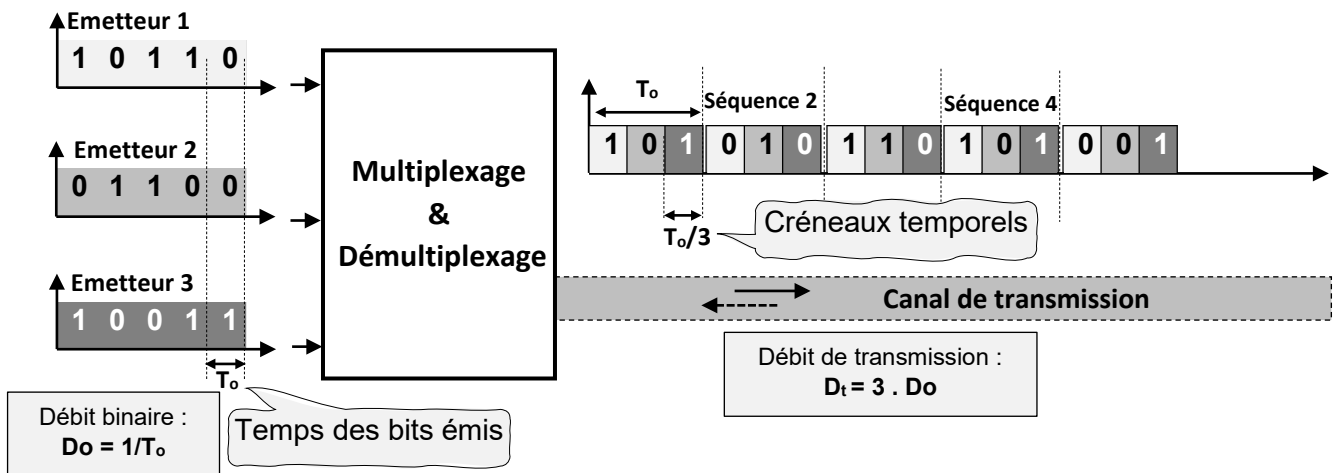
Le multiplexage fréquentiel (FDM) consiste à découper la bande passante d'un support en plusieurs sous-bandes, chacune affectée à un signal différent. Chaque signal est modulé sur une fréquence distincte, puis transmis simultanément. À la réception, un démultiplexeur utilise des filtres pour séparer les signaux.

Pour éviter tout chevauchement, des **bandes de garde** sont insérées entre les sous-bandes. Contrairement à cela, la **transmission en bande de base** occupe toute la bande passante et **ne permet pas le multiplexage fréquentiel !!!**



2. Multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage temporel (TDM) divise le support en créneaux successifs, attribués à chaque voie d'entrée **durant un intervalle réservé** (ici par exemple $T_0/3$). Les signaux partagent ainsi la même ligne, mais à des **instants distincts**. À la réception, le démultiplexeur réassemble chaque signal. Cette méthode optimise l'utilisation du canal et est couramment employée en **téléphonie** numérique et réseaux modernes.



3. Multiplexage avancé

Outre le multiplexage temporel (TDM) et fréquentiel (FDM), d'autres techniques modernes sont largement utilisées. Le **multiplexage en longueur d'onde (WDM)**, essentiel dans les **réseaux optiques**, permet de transmettre plusieurs signaux sur une même fibre en utilisant différentes couleurs de lumière. Le **multiplexage par code (CDM/CDMA)** attribue à chaque utilisateur un **code spécifique**, rendant possible le partage simultané d'une même bande passante, comme dans la téléphonie mobile. Le **multiplexage spatial (SDM)** exploite plusieurs antennes ou fibres parallèles, notamment avec la technologie **MIMO**, afin d'augmenter la capacité et la fiabilité des communications sans fil modernes.

Références bibliographiques :

- 📖 C. François, Les grandes fonctions de la chaîne d'information - IUT, BTS, CPGE, FRANCE : Ellipses, 2016
- 📖 Fraisse, P., Protière, R., & Marty-Dessus, D. (1999). Télécommunications 1 : Transmission de l'information. Paris : Ellipses.
- 📄 M, RAHBAOUI. Introduction aux réseaux TCP/IP [PDF]. ENSET Rabat, Année universitaire 2015/2016