

# Chapitre 1. Rappels des concepts de base

<b>Notion de Signal</b>	<b>3</b>
Signal Analogique	3
Signal Discret	3
<b>Notion de spectre</b>	<b>4</b>
Série de Fourier	4
Transformée de Fourier	5
Interprétation physique du spectre	5
<b>Classification des signaux selon le spectre</b>	<b>5</b>
Largeur de bande de fréquences	5
Signaux à bande étroite	6
Signaux large bande	6
<b>Bruit</b>	<b>7</b>
Bruit interne	7
Bruit de fond	7
Bruit thermique	7
Bruit blanc	8
Bruit Bande Etroite (Passe-bande)	9
Rapport signal sur Bruit SNR	10
<b>Ondes électromagnétiques</b>	<b>10</b>
<b>Spectre électromagnétique</b>	<b>11</b>
<b>Systèmes de communication</b>	<b>12</b>
Système de communication Numérique	12
Représentation de l'information dans les systèmes de Communication.	12
Flux de données	12
Notion de débit binaire	13
Le bit	13
L'octet	14
<b>Transmission des données à travers un canal de Communication.</b>	<b>14</b>
<b>Caractéristiques énergétiques</b>	<b>15</b>
<b>Taux d'erreur bit</b>	<b>15</b>
<b>Temps de transfert</b>	<b>16</b>

<b>Quelques notions sur les modulations numériques</b>	<b>16</b>
Propriétés des modulations	17
Modulation par déplacement d'amplitude (MDA)	17
Modulation par déplacement de fréquence (MDF)	18
Modulation à saut minimal (MSK)	18
Modulation par déplacement de phase (MDP)	18
Modulation d'Amplitude de deux porteuses en Quadrature MAQ	19
<b>Communication sans fil</b>	<b>20</b>
<b>Différents types de communication sans fil</b>	<b>20</b>
Liaisons hertziennes	20
Faisceaux hertziens	21
Liaisons satellitaires	22
<b>Différents Types de systèmes de communication sans fil</b>	<b>23</b>
Télévision et Radiodiffusion	24
Système de communication de téléphonie mobile	24
Système de Positionnement par Satellite GNSS	25
Système Bluetooth	25
Système Wi-Fi	26

## Notion de Signal

- ⇒ Un signal est une représentation physique de l'information envoyé de l'émetteur vers le récepteur.
- ⇒ C'est un phénomène qui évolue en fonction du temps.
- ⇒ Il peut être sous forme de courant, tension, ondes électromagnétiques, ondes acoustiques, ...etc.
- ⇒ En fonction de sa nature, le signal peut se propager dans différents milieux.

## Signal Analogique

- ⇒ C'est une grandeur physique sous la forme d'une tension ou d'un courant. Généralement, elle dépend du temps qui est une variable réelle continue dénotée par 't'.

**Exemple** : signal sinusoïdal.

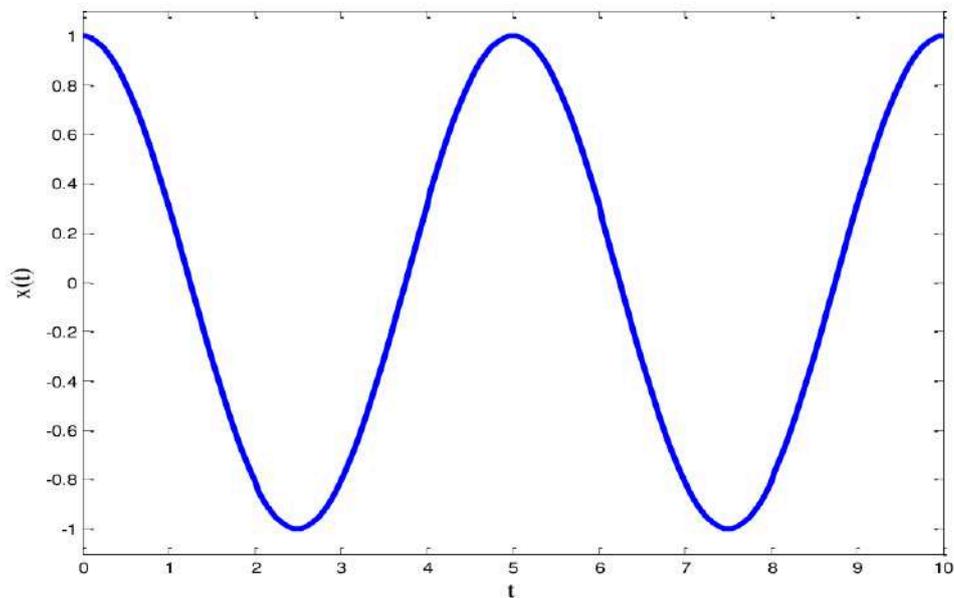


Figure.1. Signal analogique

## Signal Discret

Un signal discret est une séquence de valeurs numériques réelles ou complexes.

**Exemple** : signal sinusoïdal discrétisé.

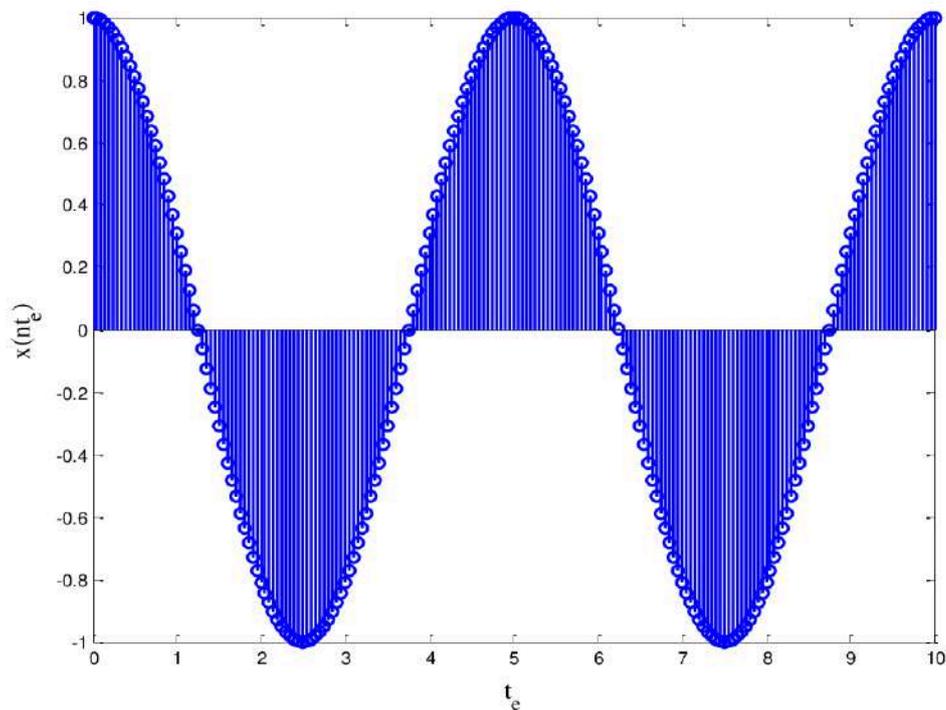


Figure.2. Signal discret

## Notion de spectre

### **Série de Fourier**

Un signal  $x(t)$  périodique est une représentation temporelle définie comme suit :

$$x(t) = x(t + T_0), \forall t. \quad (1)$$

$T_0$  est appelé la période.

La décomposition en série de Fourier de  $x(t)$ , sous sa forme trigonométrique, est donnée par :

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos 2\pi n f_0 t + b_n \sin 2\pi n f_0 t] \quad (2)$$

Les fréquences  $n f_0 = n \frac{1}{T_0}$  sont des multiples de  $f_0$ .

$f_0 = \frac{1}{T_0}$  est appelée fréquence fondamentale ;

$n f_0$  sont appelés les harmoniques.

Dans la décomposition en série de Fourier,  $a_n$  et  $b_n$  sont des coefficients réels positifs donnés par :

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) dt \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) \cos 2\pi n f_0 t dt = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \cos 2\pi n f_0 t dt \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) \sin 2\pi n f_0 t dt = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \sin 2\pi n f_0 t dt \quad (5)$$

### Transformée de Fourier

La transformée de Fourier (TF) est la version généralisée de la série de Fourier appliquée aux signaux apériodiques.

La transformée de Fourier d'un signal apériodique  $x(t)$  est donnée par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (6)$$

Avec :

$f$  : variable continue de la fréquence.

La transformée de Fourier inverse ( $TF^{-1}$ ) est donnée par :

$$x(t) = TF^{-1}[X(f)] = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi f t} df \quad (7)$$

### Interprétation physique du spectre

Selon le mathématicien français Joseph Fourier (1768 – 1830), toute forme d'onde peut être représentée par la somme d'un nombre (éventuellement infini) de sinusoides, chacune avec une amplitude, une fréquence et une phase particulières. Une telle représentation est appelée spectre du signal (ou sa représentation dans le domaine fréquentiel). Il est souvent plus facile d'analyser des signaux et des réseaux de signaux en fonction de leurs représentations spectrales. De plus, il existe de nombreux cas où il est plus facile de synthétiser un signal en utilisant une approche dans le domaine fréquentiel.

### Classification des signaux selon le spectre

#### *Largeur de bande de fréquences*

La largeur de bande spectrale, dénotée  $\Delta f$ , a une relation directe avec la distribution fréquentielle du spectre d'un signal. Elle est définie comme suit :

$$\Delta f = F_{max} - F_{min} \tag{8}$$

La figure suivante illustre la distribution spectrale d'un signal.

La fréquence moyenne est donnée par l'équation suivante :

$$F_{moy} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \tag{9}$$

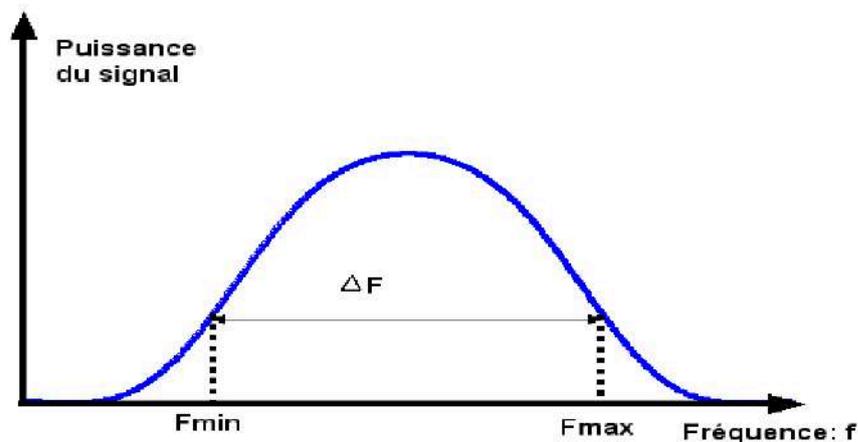


Figure.3. Distribution spectrale d'un signal

### Signaux à bande étroite

- ⇒ Un signal à bande étroite peut être interprété comme un signal sinusoïdal modulé en amplitude et / ou modulé en phase ou en fréquence ;
- ⇒ Il est obtenu par la transposition d'un signal basse fréquence vers les hautes fréquences ;
- ⇒ Les signaux à bande étroite sont caractérisés par :  $\frac{\Delta F}{F_{moy}}$  petit « soit  $F_{max} \# F_{min}$  ».

### Signaux large bande

- ⇒ Les signaux à large bande sont caractérisés par :  $\frac{\Delta F}{F_{moy}}$  grand « soit  $F_{max} \gg F_{min}$  ».
- ⇒ Le signal à transmettre ou le signal source a généralement besoin d'un signal porteur pour le moduler avant de pouvoir être envoyé à un destinataire ;
- ⇒ La figure suivante montre un signal bande étroite et un signal large bande.

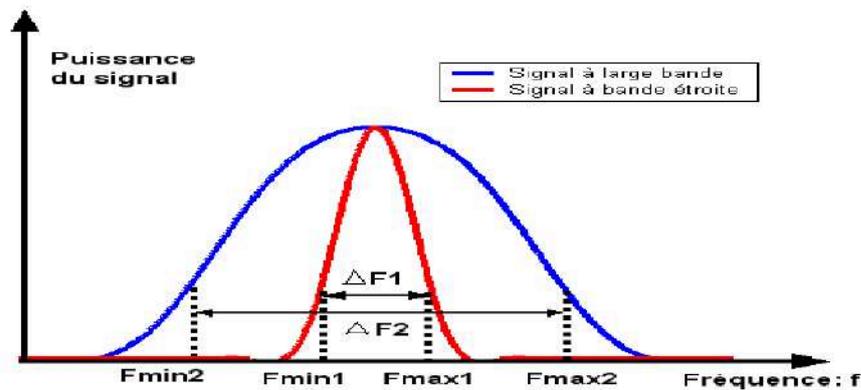


Figure.4. Un signal bande étroite et un signal large bande.

## Bruit

La source de bruit est localisée à l'extérieur du système et agit sur celui-ci par influence. On peut distinguer deux origines :

- Les perturbations naturelles (bruits cosmiques, bruits atmosphériques).
- Les perturbations artificielles, parasites générés par des équipements électriques industriels (poste de soudure à arc électrique, ligne à haute tension, ...etc.).

Ces deux types de perturbations peuvent être considérés comme négligeables au-delà d'une fréquence de quelques dizaines de MHz.

### **Bruit interne**

Les causes des perturbations internes peuvent se classer en deux groupes :  
 Les perturbations impulsionnelles engendrées par des commutations de courant (circuits logiques, interrupteurs, ...etc.).

### **Bruit de fond**

C'est un bruit généré dans les câbles et les composants électroniques en raison de la conduction électrique. Il est irréductible (Intraitable) et il résulte du déplacement irrégulier de particules chargées ou sous l'influence de champs appliqués.

### **Bruit thermique**

C'est la tension de bruit qui apparaît sur toute résistance. Il est appelé effet Johnson et il se traduit par une tension moyenne efficace  $b_{eff}^2$ , elle est donnée par :

$$b_{eff}^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f \tag{10}$$

$k$  : La constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$ ) J. K<sup>-1</sup>

$T$  : La température (en °K).

$R$  : La résistance en Ω.

$\Delta f$  : La bande de fréquence du système à l'entrée duquel on suppose que la résistance est branchée.

Pour une résistance constante la puissance totale du bruit thermique est donnée par :

$$P_{th} = k.T.\Delta.f \tag{11}$$

**Bruit blanc**

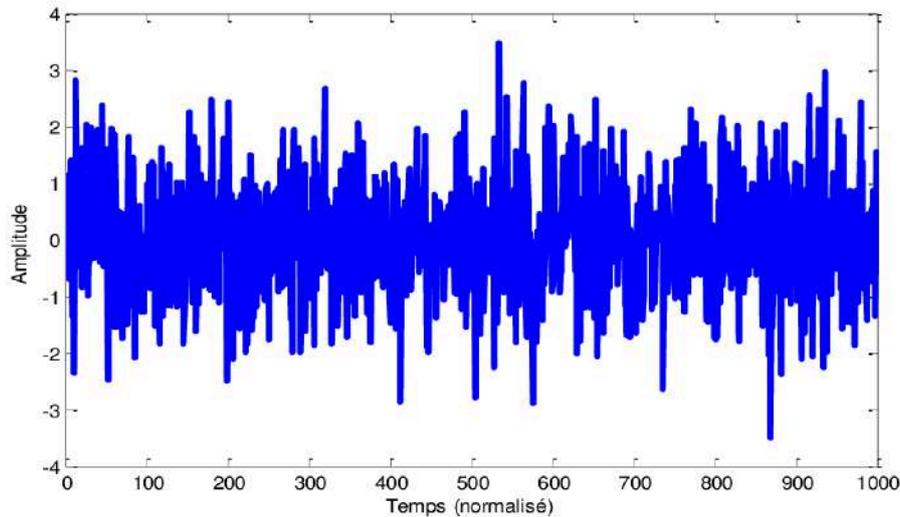


Figure.5. Fonction échantillon d'un bruit blanc gaussien additif (AWGN)

Dans une bande de fréquences considérées, ce bruit a une densité spectrale de puissance (DSP) constante. Il a une densité de probabilité gaussienne. Sa DSP est donnée par :

$$N(f) = N_0 \quad \text{Avec :} \\ N_0 = \frac{1}{2} kT. \tag{12}$$

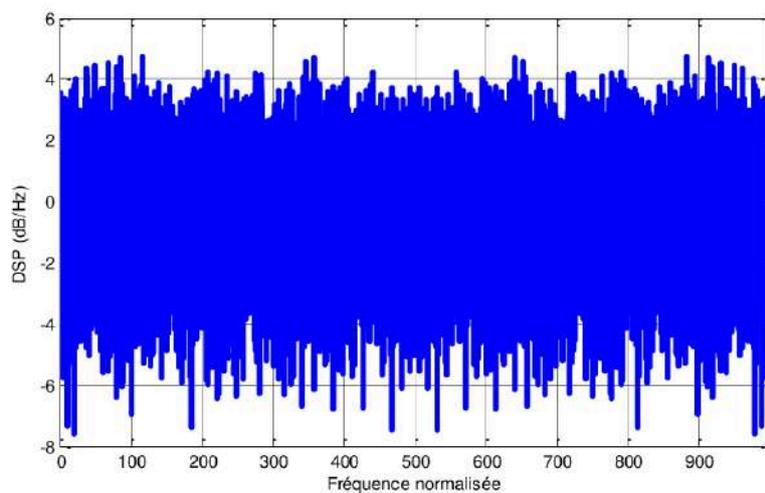


Figure.6. DSP d'un bruit blanc gaussien additif (AWGN)

La figure suivante montre un signal sinusoïdal affecté par un bruit.

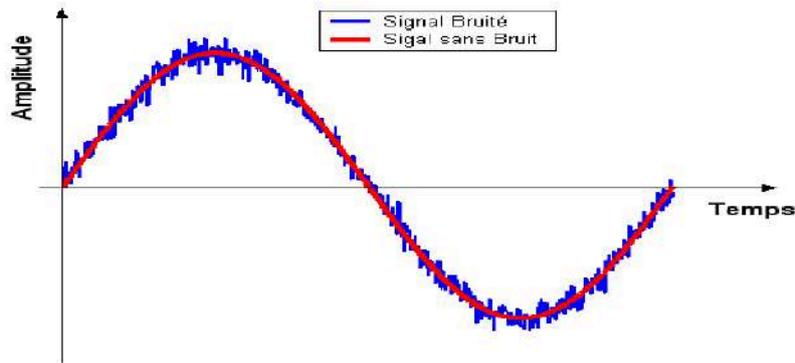


Figure.7. Fonction échantillon d'un bruit

### Bruit Bande Etroite (Passe-bande)

Soit  $X(t)$  un processus aléatoire stationnaire au sens large de moyenne nulle et de DSP  $S_{XX}(f)$  qui est non nulle sur une largeur étroite  $2F_B$  du spectre, très faible comparée à la fréquence centrale  $f_c$ , comme le montre la figure (8).  $X(t)$  est appelé processus aléatoire bande étroite.

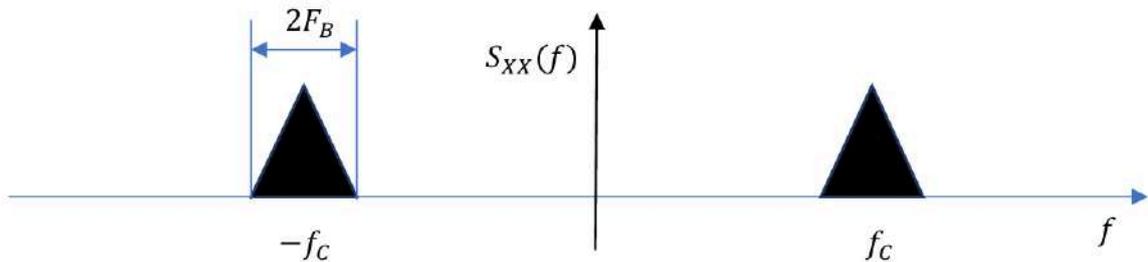


Figure.8. DSP d'un processus aléatoire bande étroite

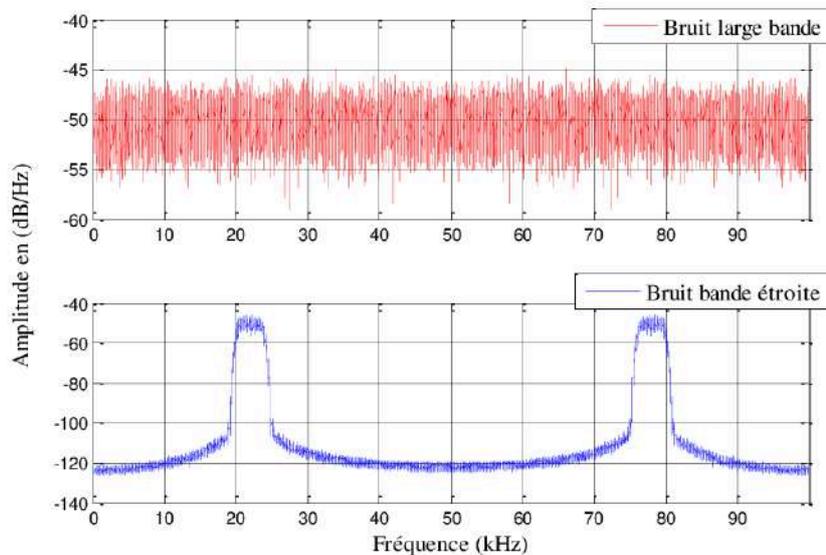


Figure.9. DSP du bruit avant et après filtrage passe-bande

### Rapport signal sur Bruit SNR

C'est le rapport entre la puissance du signal  $P_s$  et celle du bruit  $P_b$ .

Ce rapport est souvent donné en décibels (dB).

En dB, le SNR est donné par :

$$SNR_{dB} = \left[ \frac{P_s}{P_b} \right] dB = 10 \cdot \log \left( \frac{P_s}{P_b} \right) \quad (13)$$

### Ondes électromagnétiques

- ⇒ Les ondes électromagnétiques (OEM) sont des ondes créées à la suite de vibrations entre un champ électrique et un champ magnétique. En d'autres termes, les OEM sont composées de champs magnétiques et électriques oscillants.
- ⇒ Elles peuvent se propager dans un milieu matériel ou immatériel.
- ⇒ Une OEM est caractérisée par sa fréquence et sa longueur d'onde.
- ⇒ La relation entre ces deux caractéristiques est donnée par :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (14)$$

$v$  : est la vitesse de l'onde dans le milieu considéré.

Dans le vide,  $v$  caractérise la vitesse de lumière  $c$ .

D'après cette équation, la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence.

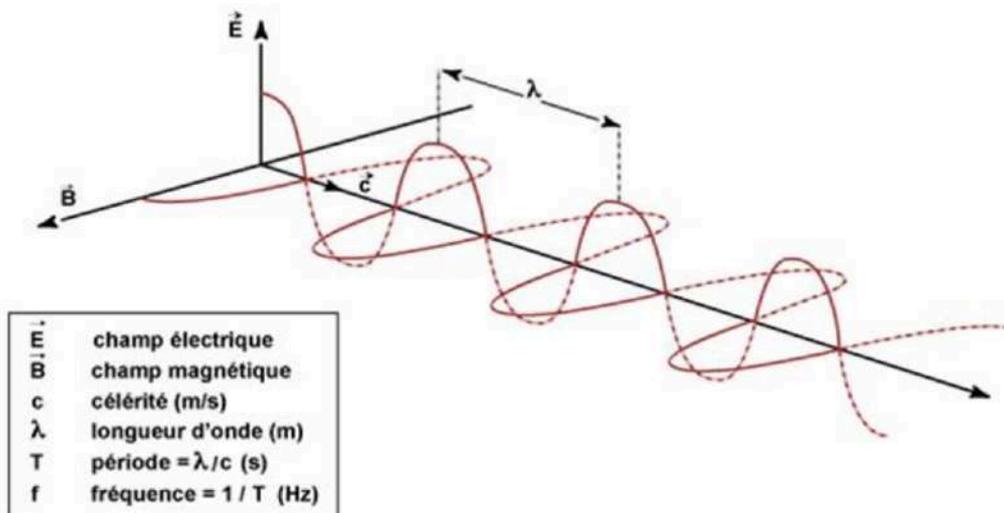


Figure.10. Onde Electromagnétique

<https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/1-2-les-ondes-electromagnetiques.html>

## Spectre électromagnétique

⇒ Il décrit l'arrangement des OEM en fonction de la fréquence ou en fonction de la longueur d'OEM. La figure (1) montre ce spectre.

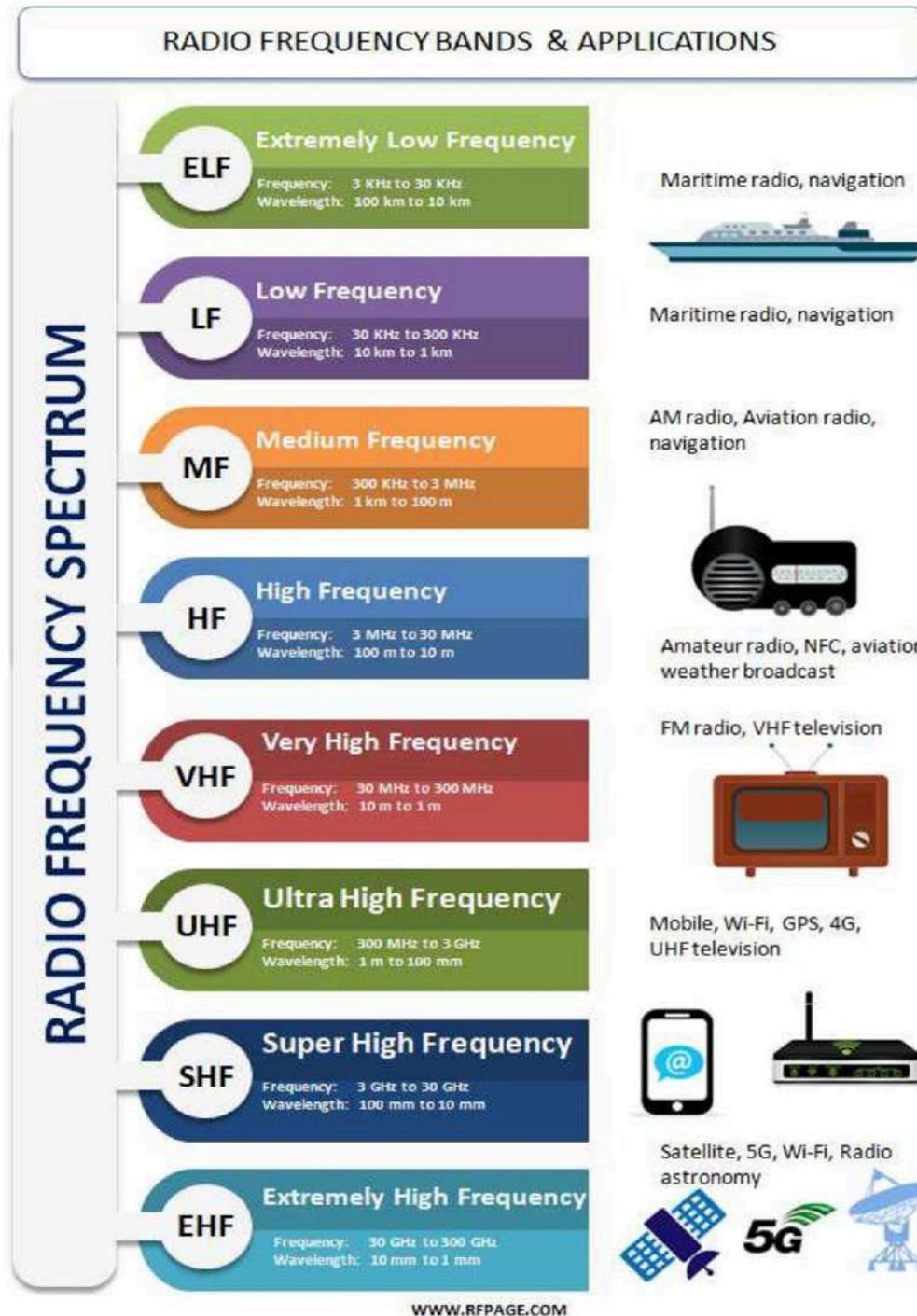


Figure.11. Différents domaines du spectre électromagnétique  
[1] <https://www.gplohaghat.org.in/download/file/aW31PLank6.pdf>

## Systèmes de communication

Un système de communication est un système permettant la transmission d'un signal entre un Emetteur et un Récepteur à travers un support ou un canal de transmission (matériel ou immatériel).

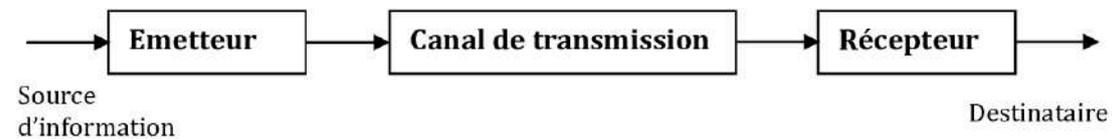


Figure.12. Système de communication

## Système de communication Numérique

Une chaîne de transmission numérique comporte plusieurs éléments : une source, des codeurs, des filtres, des amplificateurs, un canal de transmission qui est un procédé physique, un récepteur avec les opérations inverses.

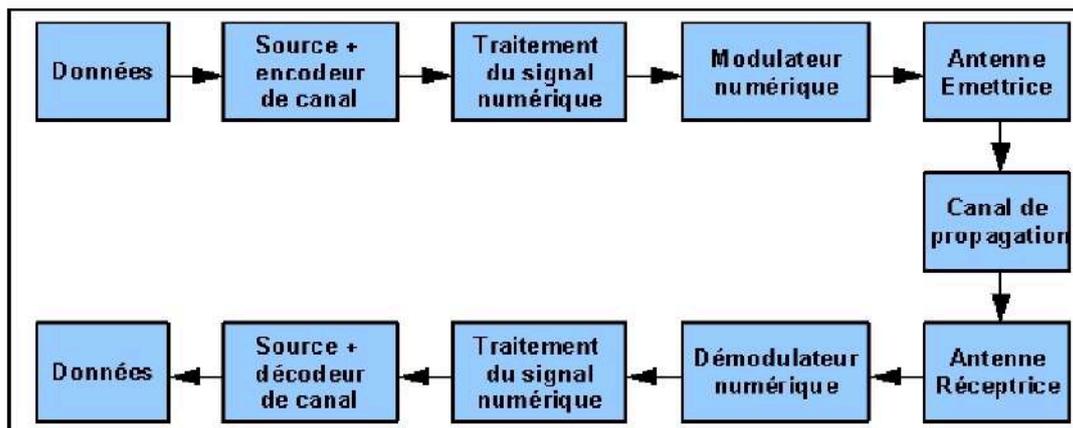


Figure.13. Système de communication Numérique

[https://www.researchgate.net/publication/41308589\\_Systemes\\_multi-antennes\\_pour\\_diversite\\_et\\_MIMO](https://www.researchgate.net/publication/41308589_Systemes_multi-antennes_pour_diversite_et_MIMO)

## Représentation de l'information dans les systèmes de Communication.

### Flux de données

- ⇒ Le rôle d'un système de communication est la transmission des données sans avoir de connaissance sur le type d'information transmise ;
- ⇒ L'acheminement, dans le même réseau de communication, des différentes données d'informations, que ce soit les données informatiques, la voix ou la vidéo, nécessite la transformation de chacune de ces catégories d'information à une représentation identique vis-à-vis du système de transmission.
- ⇒ Ceci va permettre au réseau de prendre en compte les contraintes spécifiques à chaque type de flux d'information (Voir Figure 14).

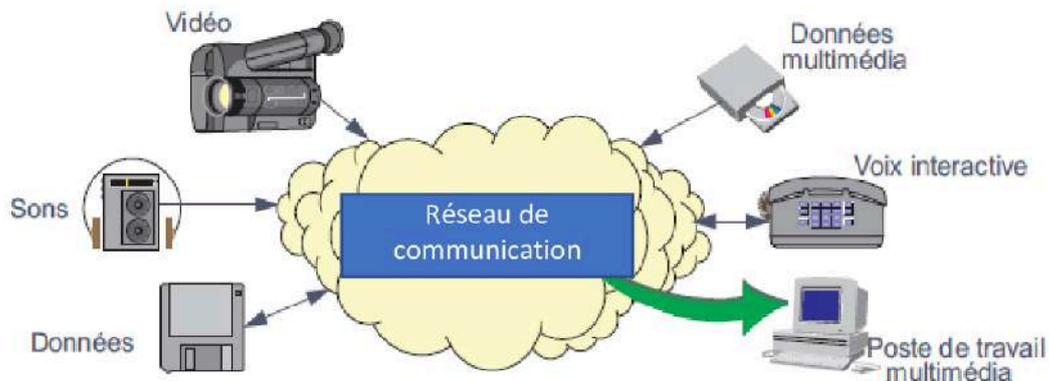


Figure.14. Transmission des différents flux d'information par un même réseau.

⇒ Il est nécessaire de mettre toutes ces informations sous une forme appropriée qui peut être supportée par un support physique spécifique. Cette forme peut être :

- Une onde électromagnétique ;
- Un signal électrique ;
- La lumière ;
- Une onde acoustique.

### Notion de débit binaire

- ⇒ Les systèmes de traitement de l'information emploient une logique à deux états binaires (le « 0 » et le « 1 ») ;
- ⇒ L'opération qui consiste à transformer les données en éléments binaires s'appelle le codage ou numérisation selon le type d'information à transformer ;
- ⇒ Le débit binaire est le nombre d'éléments binaires transmis par unité de temps ;
- ⇒ Si l'intervalle de temps séparant l'émission de deux éléments binaires consécutifs est constant et égal à  $T_b$ , alors le débit est donné par :

$$D = \frac{1}{T_b} \left( \frac{\text{bits}}{s} \right) \quad (15)$$

### Le bit

- ⇒ Le terme bit (b avec une minuscule dans les notations) signifie « binary digit », c'est-à-dire 0 ou 1 en numérotation binaire ;
- ⇒ C'est la plus petite unité d'information manipulable par un système numérique.

## L'octet

- ⇒ Dans la plupart des systèmes informatiques, un octet (en anglais byte ou B avec une majuscule dans des notations) est une unité de données composée de huit bits.
- ⇒ Un octet est l'unité que la plupart des ordinateurs utilisent pour représenter un caractère tel qu'une lettre, un chiffre ou un symbole typographique.
- ⇒ Chaque octet peut contenir une chaîne de bits qui doivent être utilisés dans une unité plus grande à des fins d'application.

## Transmission des données à travers un canal de Communication.

- ⇒ Pour transmettre un message numérique, il est nécessaire de lui associer une représentation physique, sous forme d'un signal électrique ;
- ⇒ Associer à chaque mot de « n » bits issu du message, un signal  $s_i(t)$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, M$  de durée  $T = nT_b$  ;
- ⇒  $s_i(t)$  est choisi parmi  $M = 2^n$  signaux, en fonction de la réalisation (à n éléments binaires) ;
- ⇒ Le message binaire est représenté par un signal dont on définit la rapidité de modulation  $R$  (bauds) donnée par:  $R = \frac{1}{T}$  (bauds) ;
- ⇒ Elle représente le nombre de signaux émis par le modulateur par unité de temps ;
- ⇒ C'est la transmission M-aires ;
- ⇒  $R$  peut s'exprimer en fonction du débit  $D$ , par :

$$R = \frac{D}{\log_2(M)} \quad (16)$$

- ⇒ Le choix du type des signaux dépend des propriétés physiques du canal de transmission ;
- ⇒ L'émetteur assure l'adaptation du signal au canal de transmission ;
- ⇒ L'augmentation du débit dépend de la capacité du canal donnée par :

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (17)$$

B: la bande passante en Hz ;

$\frac{S}{N}$ : le rapport signal sur bruit ;

Pour augmenter le débit, on peut soit:

- 1- Augmenter  $B$  ;
- 2- Augmenter  $\frac{S}{N}$ .

$C$  caractérise le nombre max de bits/s qu'il est possible de transmettre avec une erreur aussi faible que possible.

⇒ Rappelons qu'en binaire, le codage en ligne consiste à associer à chaque élément binaire  $\alpha_k$  d'un message, un signal  $s_i(t)$  de durée  $T_b$  choisi parmi un ensemble de deux signaux.

$$s_i(t) = 0, \forall t \notin [0, T_b], i = 0, 1.$$

⇒ L'opération réalisée par le codeur en ligne est la suivante:

Si  $\alpha_k = 0$ , dans ce cas nous avons une émission du signal  $s_0(t - kT_b)$ ,

Si  $\alpha_k = 1$ , dans ce cas nous avons une émission du signal  $s_1(t - kT_b)$ .

⇒ Ainsi, à la suite des éléments binaires  $\{\alpha_k\}$ , le codeur associe le signal  $e(t)$  donné par:  $e(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} s_k(t - kT_b)$ .

$s_i(t)$  peut être une fonction rectangulaire ou autre forme d'onde.

⇒ L'opération de codage peut être généralisée en associant à chaque mot de « n » bits un signal  $s_i(t)$  de durée  $T = nT_b$  choisit parmi  $M = 2^n$  signaux.

⇒ Ces signaux sont fonction de la valeur de la suite de bits.

⇒ Dans ce cas,  $e(t)$  est donné par:  $e(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k h(t - kT_b)$

⇒  $a_k$  sont les symboles M-aires qui prennent leurs valeurs dans l'alphabet à M éléments donné par:  $\{A_0, A_1, A_2, \dots, A_{M-2}, A_{M-1}\}$

T est l'intervalle de transmission des « n » bits. Il est donné par :  $T = nT_b$ .

## Caractéristiques énergétiques

L'énergie émise par symbole peut être exprimée par :

$$E_k = \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} A^2 a_k^2 h^2(t - kT_s) dt = A^2 a_k^2 E_p \quad (18)$$

Où  $E_p$  est l'énergie de la forme d'onde  $h(t)$ .

L'énergie moyenne s'exprime :

$$E_m = E[E_k] = \sum_{k=0}^{M-1} p_k E_k \quad (19)$$

Où  $p_k$  indique la probabilité du  $k^{\text{ième}}$  symbole (probabilité du message).

Dans le cas des symboles équiprobables,  $p_k = 1/M$ , et par conséquent,

$$E_m = \sum_{k=0}^{M-1} \frac{1}{M} E_k = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} E_k \quad (20)$$

L'énergie moyenne par bit, lorsque les symboles sont équiprobables est donnée par :

$$E_{mb} = \frac{E_m}{n} = \frac{E_m}{\log_2(M)} \quad (21)$$

Si un système de communication transmet une énergie moyenne par bit  $E_{mb}$  pendant l'intervalle  $T_b$ , alors la puissance moyenne envoyée par l'émetteur est :

$$P_m = \frac{E_{mb}}{T_b} = DE_{mb} = RE_m \quad (22)$$

## Taux d'erreur bit

⇒ Les perturbations propres au système de communication (bruit, distorsion, interférences, ...etc) peuvent provoquer des erreurs dans les

informations transmises (apparition de bits erronés au niveau du récepteur).

- ⇒ Une liaison de communication peut être donc qualifiée par son taux d'erreurs bit ( $TEB$ ) qui est défini par le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits total. Le  $TEB$  est donné par :

$$TEB = \frac{nb - bits - erronés}{nb - bits - transmis} \quad (23)$$

- ⇒ Pratiquement, ce  $TEB$  varie de  $10^{-4}$  pour une liaison de Réseau Téléphonique Commuté (RTC) à  $10^{-9}$  pour un réseau local.
- ⇒ Si  $P_e$  est la probabilité pour qu'un bit reçu soit erroné, alors la probabilité de recevoir un bit correct est égale à  $1 - P_e$ .
- ⇒ Dans le cas d'un bloc de  $n$  bits reçus, la probabilité d'une réception correcte est égale à  $(1 - P_e)^n$ .

### Temps de transfert

- ⇒ Le temps de transfert, appelé aussi temps de transit ou temps de latence (pause), mesure le temps entre l'émission d'un bit, à l'entrée du réseau et sa réception en sortie du réseau.
- ⇒ Il prend en compte le temps de propagation sur le canal et le temps de traitement par les éléments actifs du réseau (nœuds).
- ⇒ C'est un paramètre important à prendre en compte lorsque la source et la destination ont des échanges interactifs.
- ⇒ Pour un réseau donné, le temps de transfert n'est généralement pas une constante,
- ⇒ Il varie en fonction de la charge du réseau.

### Quelques notions sur les modulations numériques

- ⇒ La transmission d'un signal porteur d'information (signal informatif ou signal message) sur un canal de transmission, défini par sa bande passante, utilise généralement un décalage des fréquences contenues dans le signal vers d'autres fréquences plus adaptées à la transmission.
- ⇒ Ce déplacement de fréquences est obtenu par modulation.
- ⇒ La modulation est définie comme la méthode permettant de faire varier les caractéristiques du signal porteur au rythme du signal modulant.
- ⇒ Le signal informatif ou signal message est appelé signal modulant.
- ⇒ Le résultat de la modulation est appelé signal modulé.

- ⇒ Dans la modulation, un signal sinusoïdal de la forme  $A\cos(2\pi f_p t + \varphi)$  est utilisé pour transporter l'information.
- ⇒ C'est l'onde porteuse. Dans cette équation :  $A(t)$  et  $\varphi(t)$  sont appelés respectivement amplitude et phase instantanées.
- ⇒ Si  $A(t)$  est une fonction linéaire du signal informatif  $m(t)$ , nous sommes en présence de la modulation d'amplitude.
- ⇒ Si  $\varphi(t)$  est une fonction linéaire du signal informatif  $m(t)$ , nous avons une modulation de phase ou de fréquence.

### **Propriétés des modulations**

- ⇒ Dans la modulation binaire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui ne prend que deux valeurs possibles ;
- ⇒ Dans la modulation M-aire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui prend  $M$  valeurs distinctes.
- ⇒ Les types de modulation numérique les plus généralement rencontrés sont les suivants :
  - Modulation par Déplacement d'Amplitude MDA (Amplitude Shift Keying ASK en Anglais) ;
  - Modulation par Déplacement de Phase MDP (Phase Shift Keying PSK en Anglais);
  - Modulation par Déplacement de Phase Différentiel MDPD (Differential Phase Shift Keying DPSK en Anglais);
  - Modulation par Déplacement de Fréquence MDF (Frequency Shift Keying FSK en Anglais) ;
  - Modulation d'Amplitude de deux porteuses en Quadrature MAQ (Quadrature Amplitude Modulation QAM en Anglais).
  - La modulation minimum-shift keying (MSK) ;
  - la modulation GMSK modulation GMSK (Gaussian minimum-shift keying) ou modulation à déplacement minimum gaussien.

### **Modulation par déplacement d'amplitude (MDA)**

- ⇒ Dans la MDA, la modulation ne s'effectue que sur la porteuse en phase → Pas de porteuse en quadrature → Modulation monodimensionnelle.
- ⇒ Le signal modulé est de la forme :  $m(t) = \sum_K a_k g(t - kT) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .
- ⇒ Le symbole  $a_k$  prend sa valeur dans l'alphabet  $\{A_1, A_2, \dots, A_M\}$  → On est en présence de  $M = 2^n$  amplitudes possibles du signal ( $n$  le nombre de bits groupés pour construire un symbole).
- ⇒ Un exemple de la MDA est la modulation binaire par tout ou rien (OOK pour "On Off Keying en anglais).
- ⇒ Dans cette modulation, un seul bit est transmis par période  $T$  →  $n = 1$  et  $M = 2$ .
- ⇒  $a_k$  prend sa valeur dans l'alphabet  $\{0,1\}$ .
- ⇒ La MDA-M est une modulation d'amplitude M-aire. Elle emploie un ensemble de  $M = 2^n$  signaux élémentaires pour représenter les symboles distincts. Ces derniers sont donnés comme suit:  $a_i = (2k - M - 1)$  pour :  $k = 1,2,3, \dots, M$ .

- ⇒ Dans ce type de modulations, on utilise la représentation symétrique des symboles.
- ⇒ Chaque symbole représente  $n$  bits ( $d_{n-1} d_{n-2} d_{n-3} d_{n-4} \dots d_0$ ).
- ⇒ Ces bits sont codés en Gray pour minimiser le nombre de bits erronés (Ici, les erreurs sont provoquées par le bruit de la transmission).
- ⇒ Le signal modulé en MDA-M, est donné par:  $m(t) = \sum_k a_k g(t - kT) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

### **Modulation par déplacement de fréquence (MDF)**

- ⇒ Dans la MDF, le signal modulé est à enveloppe constante.
- ⇒ Il est donné comme suit :  $m(t) = \text{Re}[\exp(j\phi(t))\exp(j(\omega_0 t + \varphi_0))]$  ou pour la forme réelle :  $m(t) = \cos(\omega_0 t + \phi(t) + \varphi_0)$ .
- ⇒ La fréquence instantanée est donnée comme suit :  $f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\omega_0 t + \phi(t) + \varphi_0)}{dt} = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d(\phi(t))}{dt}$ ,  $f_0$  est la fréquence centrale et  $\frac{1}{2\pi} \frac{d(\phi(t))}{dt}$  est la déviation de la fréquence.
- ⇒ En fonction de la variation de phase, on distingue deux types de modulation MDF qui sont:
  - La MDF à phase discontinue;
  - La MDF à phase continue.

### **Modulation à saut minimal (MSK)**

- ⇒ La modulation MSK est un cas particulier de la MDF binaire.
- ⇒ Elle est obtenue pour un intervalle spécifique entre les fréquences  $f_1$  et  $f_2$ . En effet, en dessous de cet intervalle, la détection du signal ne sera plus possible.

### **Modulation par déplacement de phase (MDP)**

- ⇒ Dans la MDP, les signaux élémentaires  $a_k(t)$  et  $b_k(t)$ , utilisent la même forme d'impulsion  $g(t)$ .
  - ⇒ Rappelons que ces deux signaux sont donnés comme suit:  $a_k(t) = a_k g(t - kT)$  et  $b_k(t) = b_k g(t - kT)$ .
  - ⇒ Le signal élémentaire  $c_k(t)$  est donné par :  $c_k(t) = (a_k + j b_k) g(t - kT) = c_k g(t - kT)$ .
  - ⇒ Dans la modulation MDP, les symboles  $c_k$  sont répartis sur un cercle ce qui nous donne:  $c_k = a_k + j b_k = e^{j\varphi_k}$ .
  - ⇒ Dans ce cas, les symboles  $a_k$  et  $b_k$  sont donnés par:  $a_k = \cos(\varphi_k)$  et  $b_k = \sin(\varphi_k)$ .
  - ⇒ Pour la même valeur de  $M$ , les symboles  $c_k$  peuvent être disposés de façon quelconque sur le cercle.
  - ⇒ Pour améliorer les performances par rapport au bruit, on exige aux symboles d'être distribués régulièrement sur le cercle.
  - ⇒ Dans la MDP-M, l'ensemble des phases possibles de  $\varphi_k$  sont données comme suit : 
$$\varphi_k = \begin{cases} \frac{\pi}{M} + k \frac{2\pi}{M} & \text{pour le cas M - aire } (M > 2) \\ 0 \text{ ou } \pi & \text{pour le cas binaire } (M = 2) \end{cases}$$
.
- $k = 0, 1, \dots, M - 1$ .

## Modulation d'Amplitude de deux porteuses en Quadrature

### MAQ

- ⇒ Le signal modulé s'écrit :  $m(t) = a(t)\cos(w_0t + \varphi_0) - b(t)\sin(w_0t + \varphi_0)$ .
- ⇒  $a(t) = \sum_K a_k g(t - kT)$  et  $b(t) = \sum_K b_k g(t - kT)$ .
- ⇒ Similairement à la modulation MDA et la modulation MDP, les signaux élémentaires  $a_k(t)$  et  $b_k(t)$ , dans la MAQ, utilisent la même forme d'impulsion  $g(t)$ .
- ⇒ Les signaux  $a_k(t)$  et  $b_k(t)$  sont donnés comme suit:
- ⇒  $a_k(t) = a_k g(t - kT)$  et  $b_k(t) = b_k g(t - kT)$ .
- ⇒ Le signal élémentaire  $c_k(t)$  est donné par :  $c_k(t) = (a_k + bk)g(t - kT) = c_k g(t - kT)$ .
- ⇒ Les symboles  $a_k$  et  $b_k$  prennent leurs valeurs dans deux alphabets à  $M$  éléments. Ces derniers sont:  $\{A_1, A_2, A_3, \dots, A_M\}$  et  $\{B_1, B_2, B_3, \dots, B_M\}$ .
- ⇒ Les symboles  $a_k$  et  $b_k$  peuvent prendre leurs valeurs dans un même alphabet à  $M$  éléments donné par:  $\{\pm d, \pm 3d, \pm 5d, \dots\}$ .
- ⇒ Dans la modulation MAQ, nous avons au total  $M^2$  états.
- ⇒ Couramment, les tailles des alphabets sont identiques et donnent lieu à une modulation à  $E = 2^{2n}$  états.
- ⇒ Dans le cas particulier mais très fréquent où  $M$  peut s'écrire «  $M = 2^n$  », alors les  $a_k$  et les  $b_k$  représentent aussi des mots de  $n$  bits chacun. Le symbole complexe  $c_k$  représente par conséquent un mot de  $2n$  bits. L'intérêt de cette configuration est que le signal  $m(t)$  est alors obtenu par une combinaison de deux porteuses en quadrature modulées en amplitude par des symboles  $a_k$  et  $b_k$  indépendants.

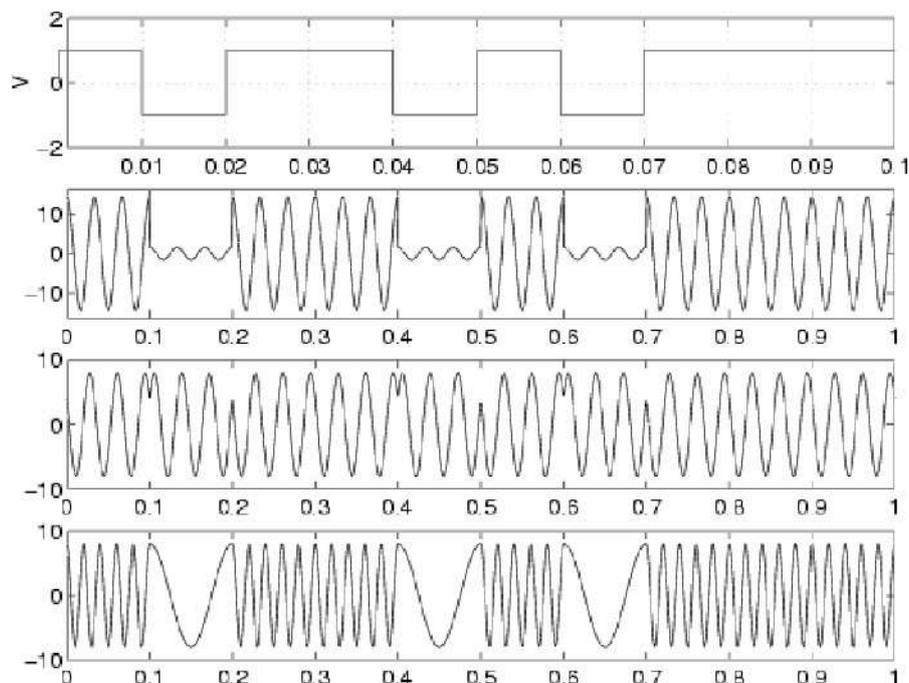


Figure. 15. Signal modulant numérique et signaux modulés par différents types de modulations.  
[http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/total1/elen008/node49\\_ct.html](http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/total1/elen008/node49_ct.html)

## Communication sans fil

- ⇒ Le principal avantage de la communication sans fil est la mobilité ;
- ⇒ La téléphonie mobile peut être mise en œuvre à tout moment et en tout lieu grâce à des débits significativement élevés ;
- ⇒ Un autre point est son infrastructure. En effet, contrairement aux systèmes de communication filaires où l'installation de l'infrastructure est une tâche coûteuse et longue, l'installation d'une infrastructure de communication sans fil est très simple et moins coûteuse ;
- ⇒ Dans les zones éloignées ainsi que dans des situations d'urgence, la configuration de la communication filaire n'est pas facile. Dans ce cas, la communication sans fil reste un choix possible ;
- ⇒ Il existe de nombreuses autres raisons d'utiliser la communication sans fil comme la couverture mondiale, la flexibilité et le fait de rester connecté.

## Différents types de communication sans fil

- ⇒ Il existe différents types de systèmes de communication sans fil qui sont développés en fonction de l'application. Certains d'entre eux sont discutés dans les sections suivantes.
- ⇒ Les modes de transmission sont classés comme Simplex, half-duplex et full-duplex.
- ⇒ Pour chaque mode de transmissions, il existe un émetteur et un récepteur.
- ⇒ Le mode simplex caractérise une liaison dans laquelle les données circulent dans un seul sens, c'est-à-dire de l'émetteur vers le récepteur (les données n'ont pas besoin de circuler dans les deux sens (exemple de l'ordinateur vers l'imprimante).
- ⇒ Le mode half-duplex caractérise une liaison dans laquelle les données circulent dans un sens ou l'autre, mais pas les deux simultanément (chaque extrémité de la liaison émet à son tour). Un bon exemple est le réseau Internet dans lequel un ordinateur envoie une demande pour une page Web. Le serveur Web, après réception de la demande, traite l'application et renvoie les informations.
- ⇒ La liaison full-duplex caractérise une liaison dans laquelle les données circulent de façon bidirectionnelle et simultanément. Ainsi, chaque extrémité peut émettre et recevoir en même temps.
- ⇒ Dans la transmission sans fil, la région entourée par ce type de système de communication est un facteur essentiel. En effet, c'est cette région qui détermine les différents types de communication sans fil. Les plus essentiels d'entre eux discutés brièvement dans les sections suivantes.

## *Liaisons hertziennes*

- ⇒ Dans ce type de liaison, une antenne émettrice rayonne une énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Cette dernière sera ensuite recueillie par une autre antenne de réception est transformée en un courant

électrique similaire à celui utilisée pour l'excitation de l'antenne d'émission (Voir figure (15)).

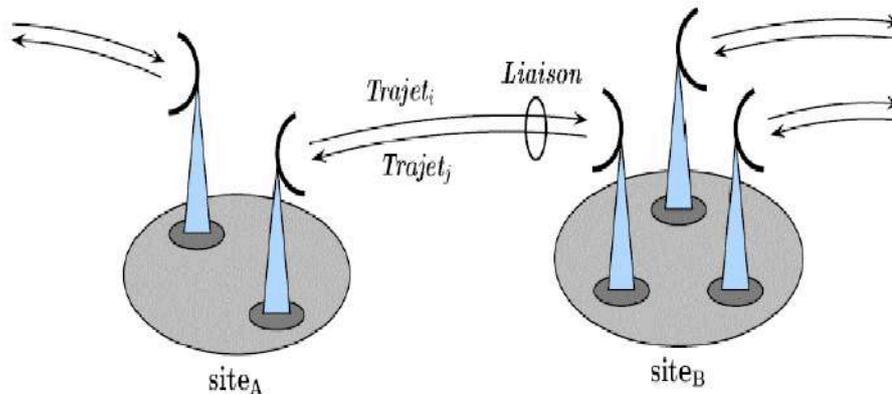


Figure.16. Liaison hertzienne entre 2 sites

file:///C:/Users/hp/Downloads/Tabu-NG\_hybridization\_of\_constraint\_programming\_an.pdf

- ⇒ Les OEM se propagent dans le vide avec la vitesse de la lumière.
- ⇒ En fonction du type d'antennes, on peut avoir différents types de diagrammes de rayonnement. Par exemple, le rayonnement d'une source isotrope est omnidirectionnel et l'énergie se diffuse selon une sphère.
- ⇒ Le rayonnement d'un conducteur rectiligne s'effectue selon un demi-tore.
- ⇒ Lors de la traversée du canal, les OEM subissent un affaiblissement.
- ⇒ Les transmissions par OEM sont utilisées dans les cas suivants :
  - La nécessité de diffuser une même information vers plusieurs utilisateurs,
  - La nécessité de mettre en relation des stations mobiles,
  - La nécessité de relier, à haut débit, deux entités éloignées (faisceaux hertziens),
  - La nécessité de relier, à haut débit, deux entités très éloignées (satellites de communication).
- ⇒ Dans chaque type d'application, on utilise des bandes de fréquences différentes.
- ⇒ L'espace de fréquences utilisables est limité.

### Faisceaux hertziens

- ⇒ Dans ce type de transmission, la communication peut être analogique ou numérique.
- ⇒ Les débits peuvent atteindre des centaines de Mbit/s.
- ⇒ Ces canaux sont principalement utilisés pour des réseaux :
  - de téléphonie (multiplexage fréquentiel ou temporel),
  - de transmission de données,
  - de diffusion d'émissions télévisées.
  
- ⇒ Les antennes utilisées sont des antennes très directives.
- ⇒ Les distances franchissables peuvent atteindre 100 km.
- ⇒ Pour couvrir des distances plus importantes, il faut disposer des relais.

- ⇒ Les relais peuvent être passifs ou actifs.
- ⇒ Les faisceaux hertziens utilisent les bandes de 2 à 15 GHz et autorisent des débits de 155 Mbit/s.
- ⇒ Les faisceaux hertziens sont sensibles aux perturbations atmosphériques et aux interférences électromagnétiques.
- ⇒ L'infrarouge et le laser, utilisées pour interconnecter deux réseaux sur de courtes distances (quelques centaines de mètres), constituent un cas particulier des liaisons hertziennes.

### Liaisons satellitaires

- ⇒ On s'est orienté vers l'utilisation de satellites relais dès les années 1960.
- ⇒ Une station terrestre émet vers le satellite un flux d'information (voie montante).
- ⇒ Le satellite régénère les signaux reçus et les réémet en direction de la Terre (voie descendante).
- ⇒ On distingue 3 types de satellites, selon leur orbite : les orbites stationnaires (GEO), moyennes (MEO) et basses (LEO).
- ⇒ La figure (suivante) représente les trois modes orbitales des systèmes de satellites.

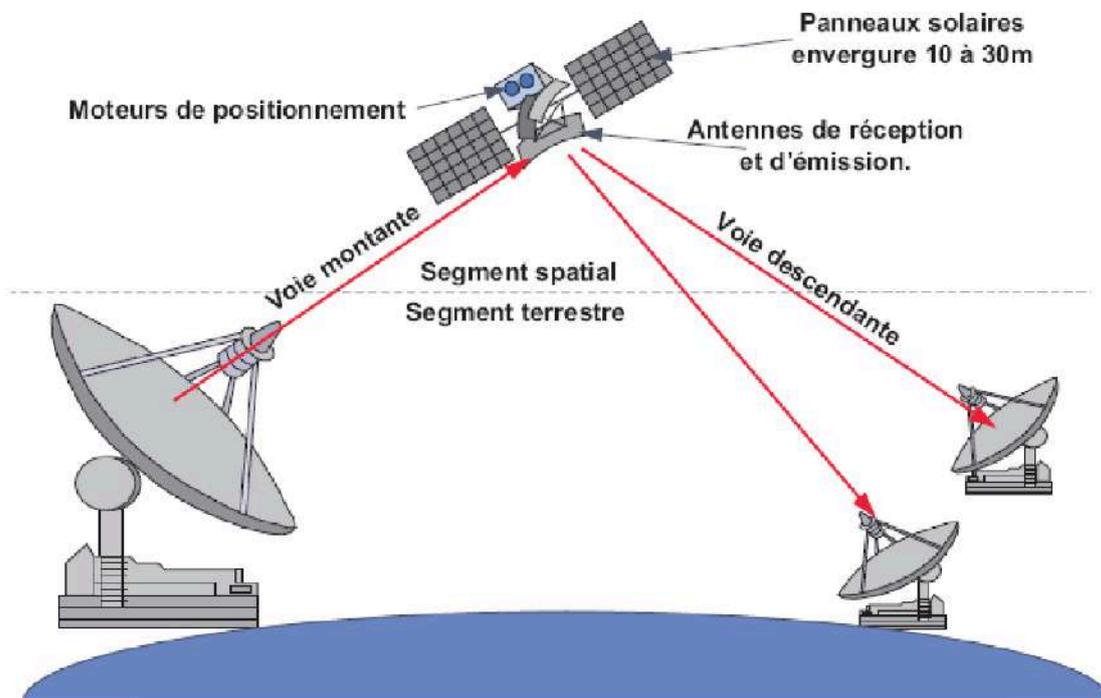


Figure.17. Principe d'une liaison satellitaire.

- ⇒ Les satellites géostationnaires permettent de réaliser :
  - des réseaux de diffusion (radiodiffusion, télévision) ;
  - des liaisons point à point ;

- des liaisons à haut débit (bande passante de 500 MHz).

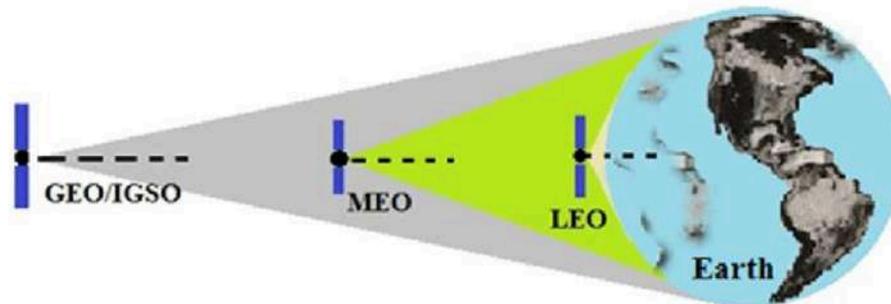


Figure.18. Satellites géostationnaires (GEO) et constellation de satellites (MEO et LEO)  
[2] B. Li et al., "LEO enhanced Global Navigation Satellite System (LeGNSS) for real-time precise positioning services," *Advances in Space Research*, vol. 63, no. 1, pp. 73-93, ISSN 0273-1177, 2019.

## Différents Types de systèmes de communication sans fil

Aujourd'hui, les téléphones portables sont largement utilisés pour la voix, l'Internet, le multimédia, etc. Tous ces services doivent être mis à la disposition des utilisateurs fixes et mobiles. Actuellement, l'utilisation des systèmes de communication sans fil a permis de prendre en charge cette contrainte par le transfert de la voix, des données, des vidéos, des images, etc. Elle a permis également de fournir d'autres services tels que la vidéoconférence, la téléphonie cellulaire, la messagerie, la télévision, la radio, etc. En raison de la nécessité d'une variété de services de communication, différents types de systèmes de communication sans fil sont développés. Certains des systèmes de communication sans fil importants disponibles aujourd'hui sont donnés comme suit :

- La Télévision et la Radiodiffusion ;
  - Le Radar ;
  - Le Système de téléphonie mobile (communication cellulaire) ;
  - Le Système de positionnement mondial GPS ;
  - La communication infrarouge ;
  - Le WLAN (Wi-Fi) ;
  - Le Bluetooth ;
  - Le ZigBee ;
  - Les Téléphones sans fil ;
  - L'Identification RFID.
- ⇒ En fonction du type du système de communication, les appareils utilisés pour la communication sans fil peuvent avoir différents tailles, formes, débits de données et coûts.
- ⇒ La zone couverte par un système de communication sans fil est également un facteur important.

- ⇒ Les réseaux sans fil peuvent être limités à un bâtiment, un ensemble de bureaux, une ville, une petite zone régionale (plus grande qu'une ville) ou peuvent avoir une couverture mondiale.

Quelques systèmes de communication sans fil, les plus importants disponibles aujourd'hui, seront présentés dans ce qui suit.

### ***Télévision et Radiodiffusion***

- ⇒ C'est le premier service sans fil à être diffusé ;
- ⇒ C'est un exemple concret du système de communication Simplex. En effet, tous les utilisateurs reçoivent les mêmes données.



*Figure.19. Équipement dans le fourgon de radiodiffusion*

### ***Système de communication de téléphonie mobile***

- ⇒ C'est le système de communication sans fil le plus couramment utilisé ;
- ⇒ Le développement de cette technologie a changé complètement le monde ;
- ⇒ Aujourd'hui, cette technologie n'est pas limitée uniquement aux appels. En effet, elle est intégrée à de nombreuses autres fonctionnalités telles que le Bluetooth, le Wi-Fi, le GPS et radio FM...etc.
- ⇒ La dernière génération de technologie de communication mobile est la 5G ;
- ⇒ La 5G revendique des débits de données de l'ordre du Gbps ;
- ⇒ Les réseaux 5G visent également les applications liées à l'Internet des objets les futures automobiles.



Figure.20. Téléphonie mobile

### **Systeme de Positionnement par Satellite GNSS**

Les GNSS pour Global Navigation Satellite Systems, englobent le système GPS américain, le système russe GLONASS, le système BeiDou Chinois et le nouveau système Européen Galileo. C'est l'une des sous-catégories de communication par satellite. Les GNSS fournissent différents services sans fil tels que la navigation, le positionnement, la localisation, la vitesse, etc. à l'aide de récepteurs GNSS et de satellites dédiés.

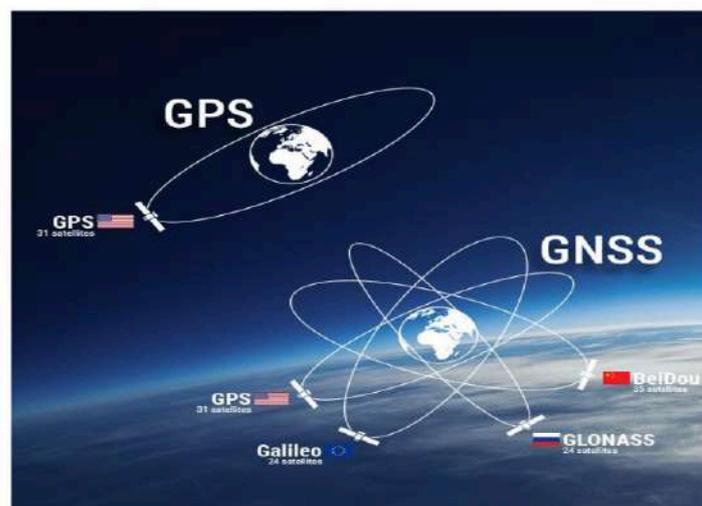


Figure.21 Systemes GNSS.

<https://www.mobatime.com/article/difference-between-gnss-gps/>

### **Systeme Bluetooth**

- ⇒ C'est est autre importante technologie de communication sans fil à faible portée (10 mètres).
- ⇒ Ce système assure la transmission des données, de la voix et de l'audio ;
- ⇒ La majorité des téléphones portables, tablettes et ordinateurs portables sont actuellement équipés d'appareils Bluetooth.

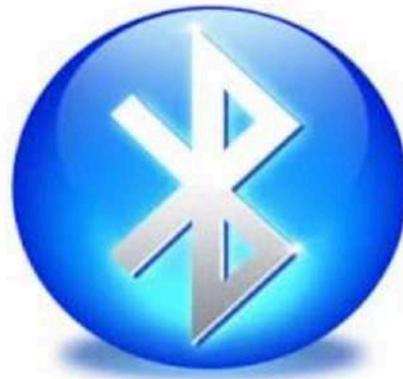


Figure 22 Signe du Bluetooth  
<https://www.mobatime.com/article/difference-between-gnss-gps/>

### **Systeme Wi-Fi**

- ⇒ Le Wi-Fi est un service sans fil lié à Internet ;
- ⇒ Différents appareils comme les ordinateurs portables et les téléphones portables peuvent se connecter à un point d'accès (comme un routeur Wi-Fi) et accéder par conséquent à Internet ;
- ⇒ Le Wi-Fi est l'un des réseaux sans fil les plus utilisés, généralement pour l'accès à Internet (mais parfois pour le transfert de données au sein du réseau local).



Figure.23. Modem Wi-Fi.  
<https://www.tp-link.com/fr/blog/95/10-fa%C3%A7ons-de-booster-votre-wifi-pour-un-internet-plus-rapide/>

Dans le cas où il est nécessaire d'admettre plusieurs voies montantes, il faut utiliser des techniques permettant l'accès multiple. Plusieurs techniques peuvent être utilisées. Ces dernières sont données comme suit :

- FDMA : L'**AMRF en français** (Accès Multiple par Répartition de Fréquences), consiste à diviser la bande de fréquence utilisée en sous-bandes, chacune réservée à une voie de communication.
- TDMA : L'**AMRT en français** (Accès Multiple par Répartition de Temps), la porteuse est commune à tous les canaux de communication, mais chaque canal n'en dispose que durant un intervalle de temps limité.
- CDMA : L'**AMRC** (Accès Multiple par Répartition de Code), dans cette technique on attribue à chaque voie de communication un code. Les informations codées sont envoyées simultanément, elles sont extraites du flux par décodage.