

COURS TRAITEMENT DU SIGNAL
LICENCE 3 MPI, SPECIALITE INFORMATIQUE
ANNEE ACADEMIQUE 2021/2022

■ A. FAYE Ingénieur en
Télécommunications spécialisé en
transmission
faye.aladji@gmail.com



PLAN

I. NOTION DE SIGNAL

II. ONDE PROGRESSIVE

III. MODULATIONS NUMERIQUES

I. NOTION DE SIGNAL

1. DEFINITION

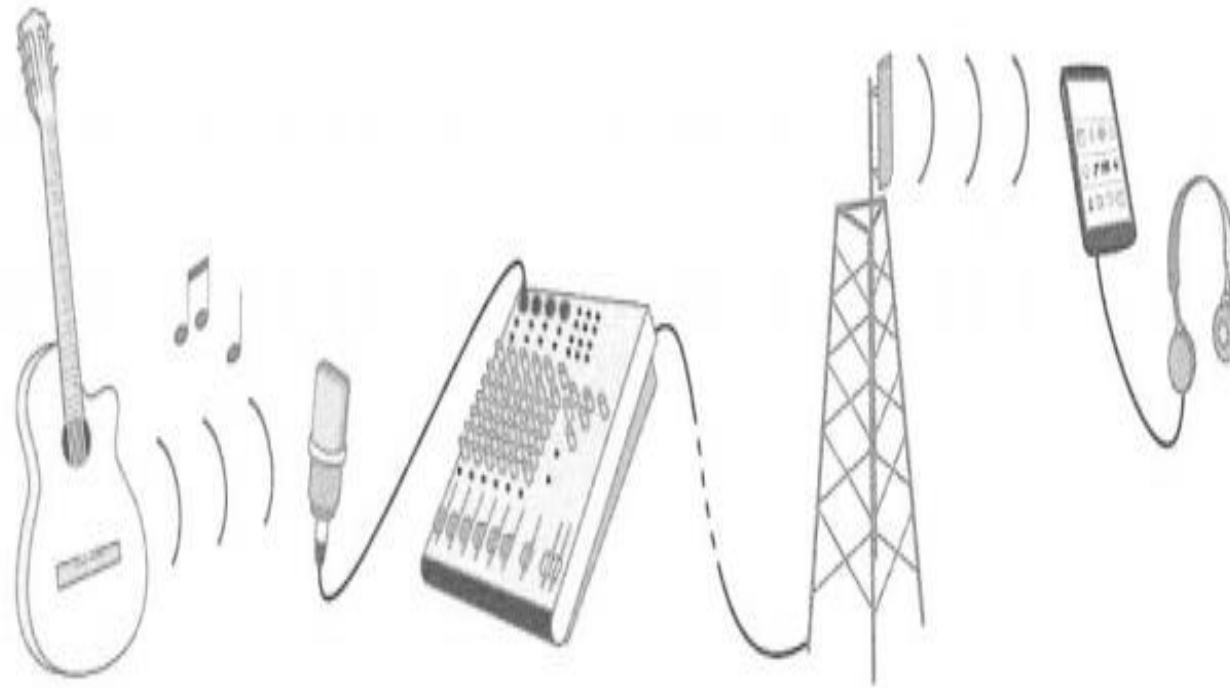
Un signal est une grandeur physique dont la détermination permet d' accéder à une information désirée.

2. GRANDEURS PHYSIQUES : DIFFÉRENTS TYPES – CONVERSION D' UN SIGNAL

On peut classer les signaux suivant leur domaine d'utilisation.

Acoustique	Electricité	Electromagnétisme	Thermodynamique
position vitesse pression Energie	Intensité Tension Energie Résistance	Intensité lumineuse Energie	Température Volume Pression Energie

Conversion d'un signal



Conversion d'un signal

L'acquisition, la mémorisation et la transmission d'une information peut nécessiter l'utilisation de signaux de natures physiques différentes ; nous illustrons ce point par un exemple. Le signal acoustique musical émis par un instrument est transformé en signal électrique dans un microphone le support de l'information passe ainsi d'une onde acoustique à une grandeur électrique.

Le signal est alors amplifié, filtré, éventuellement numérisé et mis dans une mémoire électronique. Il peut être transmis sous forme d'onde électromagnétique modulée, ou via une fibre optique. Il est finalement restitué, dans une forme proche de l'original, dans un écouteur ou un haut-parleur.

Toutes ces opérations modifient la nature du signal, parfois aussi la forme de son évolution temporelle, en préservant au mieux la possibilité de retrouver l'information initiale.

Dans ce sens, le cas des signaux électriques est important, car l'avancée des techniques en électronique et en informatique ouvre un éventail très étendu de possibilités de traitement.

On peut ainsi réaliser efficacement : le stockage, la transmission, la compression et le cryptage de signaux électriques.

La partie des sciences qui permet ces progrès s'appelle d'ailleurs la théorie du signal, c'est un domaine de recherche permanente, source de progrès très visibles dans la vie quotidienne.

3. SIGNAUX PERIODIQUES

- Importance des signaux périodiques

L'information est par définition non connue par avance : si l'on connaît le contenu d'une lettre avant de l'ouvrir, elle ne nous apporte aucune information. Il paraît donc *a priori* peu intéressant de recourir à des signaux périodiques. En effet, ceux ci ne sont inconnus que durant la première période d'observation et se répètent ensuite sans plus de changement, donc sans révéler d'information.

Pourtant, on manipule fréquemment des signaux périodiques :

- Soit lorsqu'ils sont utilisés pour tester des équipements : on applique par exemple un signal sinusoïdal à l'entrée d'un amplificateur pour en mesurer le gain ;
- Soit parce qu'ils sont utilisés pour transporter une information grâce à une variation lente de l'une de leurs propriétés, c'est le cas des *modulations*.
- Soit enfin parce qu'un signal peut généralement être décomposé en une somme de signaux périodiques particuliers, les signaux sinusoïdaux.

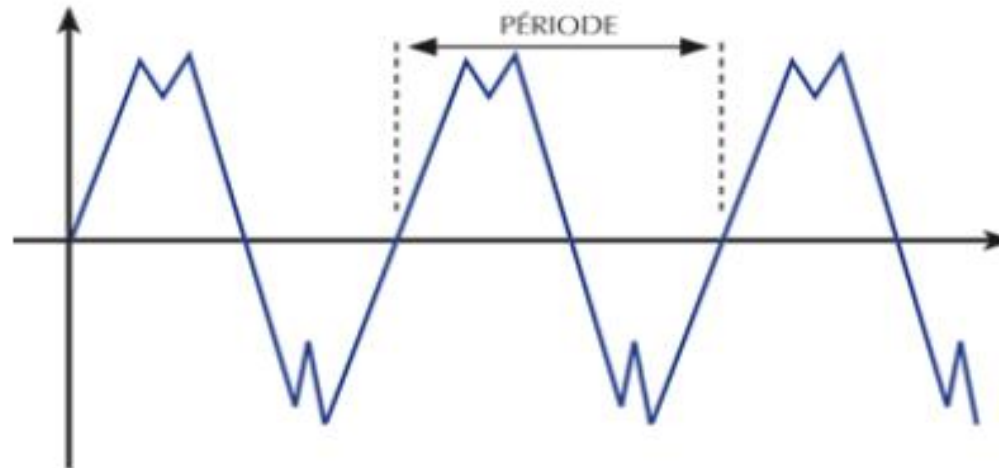
En travaux pratiques notamment, des générateurs de signaux permettent d'obtenir des signaux périodiques du temps, de formes carrées, triangulaire ou sinusoïdale.

Caractéristiques principales

Un signal périodique est caractérisé par plusieurs grandeurs mais les deux principales sont :

- sa période (fréquence ou pulsation).
- les variations d'amplitude au cours de la période.

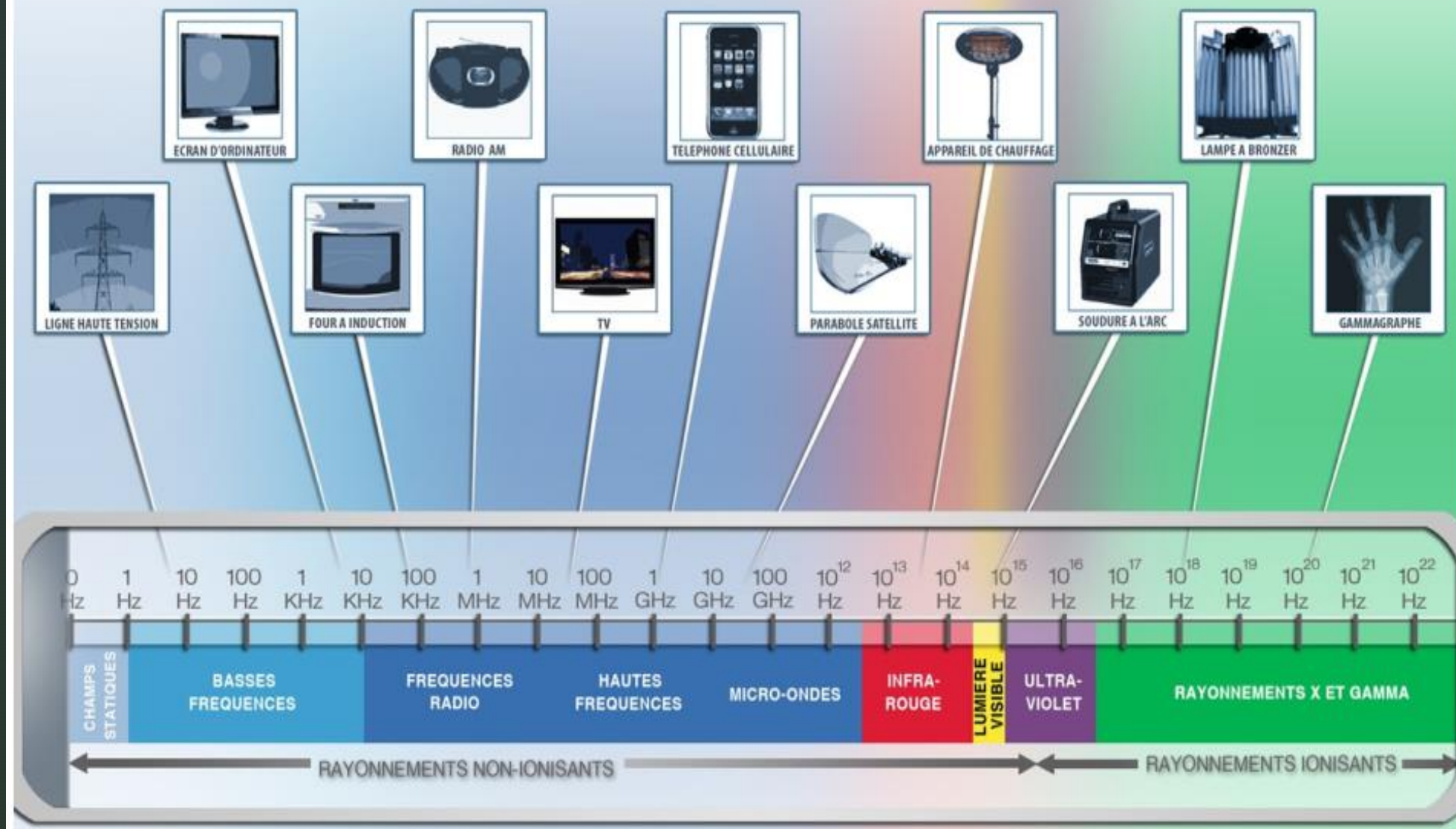
On rappelle que $T = \frac{1}{\nu}$ ou $T = \frac{2\pi}{\omega}$



Ordre de grandeur des fréquences

Acoustique	Electromagnétisme	Optique
Audible : 20Hz à 20kHz Téléphonie : 300Hz à 3400Hz	Electricité (Europe) : 50Hz GBF : 10Hz à 20MHz Bande FM : autour de 100Mhz GSM : 900MHz, 1800MHz, 2100MHz WiFi : 2,4GHz à 5 GHz	Visible : 400THz à 770THz

Illustration des différents rayonnements dans notre quotidien

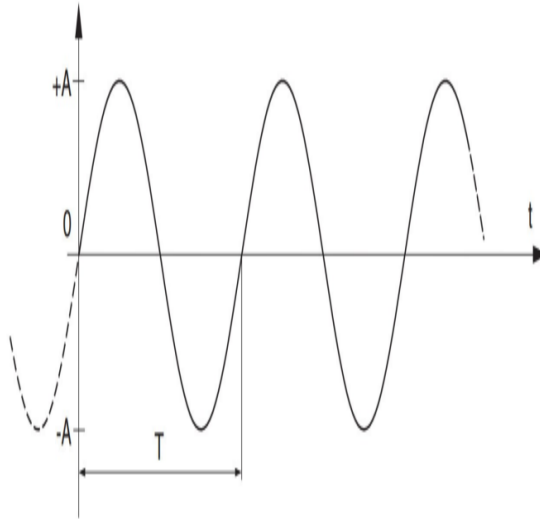


4. CARACTERISTIQUES D' UN SIGNAL

Signal sinusoïdal

Valeur moyenne

valeur efficace



L'expression générale du signal sinusoïdal est : $s(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$ où :

- ω la pulsation
- A l'amplitude et 2A l'amplitude crête à crête
- φ la phase à l'origine des temps

La valeur moyenne d'un signal de période T est définie par :

$$\langle s \rangle = S_{moy} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t) dt \text{ où } t_0 \text{ est quelconque}$$

Pour un signal harmonique cette valeur moyenne est nulle :

$$\begin{aligned} \langle s \rangle = S_{moy} &= \frac{1}{T} \int_0^T A \cos(\omega t + \varphi) dt \\ &= \frac{A}{T} \left[\frac{\sin(\omega t + \varphi)}{\omega} \right]_0^T = A \frac{\sin(2\pi + \varphi) - \sin(\varphi)}{\omega T} = 0 \end{aligned}$$

Ce résultat est évident graphiquement.

Pour un signal s, la grandeur énergétique associée est quadratique : proportionnelles au carré de s(t) :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2, E_{pe} = \frac{1}{2}kx^2, E_{bob} = \frac{1}{2}Li^2 \dots$$

Afin de tenir compte de cet aspect on définit la valeur efficace par :

$$\sqrt{\langle s^2 \rangle} = S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s^2(t) dt} \text{ où } t_0 \text{ est quelconque}$$

Grâce à cette définition, l'amplitude, la valeur moyenne et la valeur efficace ont mêmes dimensions.

RMS)

5. SPECTRE D'UN SIGNAL

Definition

On considère un signal $s(t)$, qui s'écrit comme la somme de signaux sinusoïdaux, dont les fréquences s'étalent de f_{\min} à f_{\max} . On dit alors que le spectre du signal occupe l'intervalle de fréquences $[f_{\min}, f_{\max}]$, ce qui est une information importante pour en déterminer les propriétés.

On peut illustrer ce propos à travers plusieurs exemples, empruntés à la vie courante ou faisant appel aux notions vues dans les classes secondaires.

Décomposition en série de FOURIER

Sous certaines conditions de régularité dont la démonstration relève d'un cours de mathématiques et qui seront toujours satisfaites en physique, une fonction $f(t)$ réelle, périodique de période T et de pulsation $\omega = \frac{2\pi}{T}$ est décomposable en une série de fonctions sinusoïdales de pulsations $n\omega$, avec n entier naturel et d'amplitudes déterminées, sous la forme :

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \text{ avec } a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos n\omega t dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin n\omega t dt \quad \& \quad a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$$

Où $a_0/2$ est la valeur moyenne du signal

Si la fonction $f(t)$ est réelle, alors les coefficients a_n & b_n sont réels. Posons $a_n = A_n \cos \varphi_n$ & $b_n = -A_n \sin \varphi_n$, alors :

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \varphi_n \cos n\omega t - A_n \sin \varphi_n \sin n\omega t) \Rightarrow f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$$

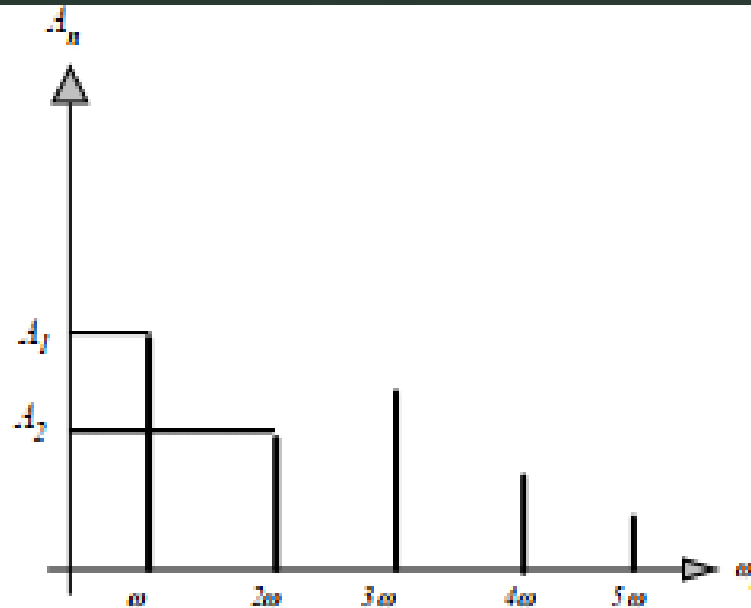
- Ce développement unique est appelé développement en série de Fourier de la fonction f (en abrégé D.S.F.)
- Les coefficients a_n et b_n sont les coefficients de Fourier de la fonction f .
- Le terme $A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ est appelé fondamental.
- Le terme $A_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$ est l'harmonique de degré n . A_n est l'amplitude de l'harmonique de degré n et φ_n est sa phase.

Notion de spectre

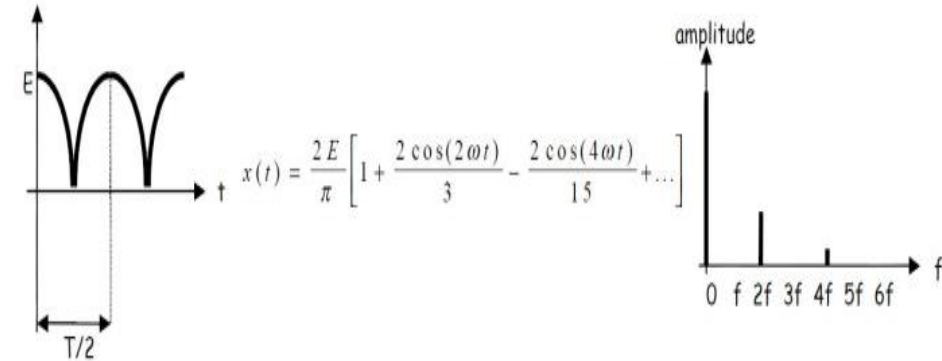
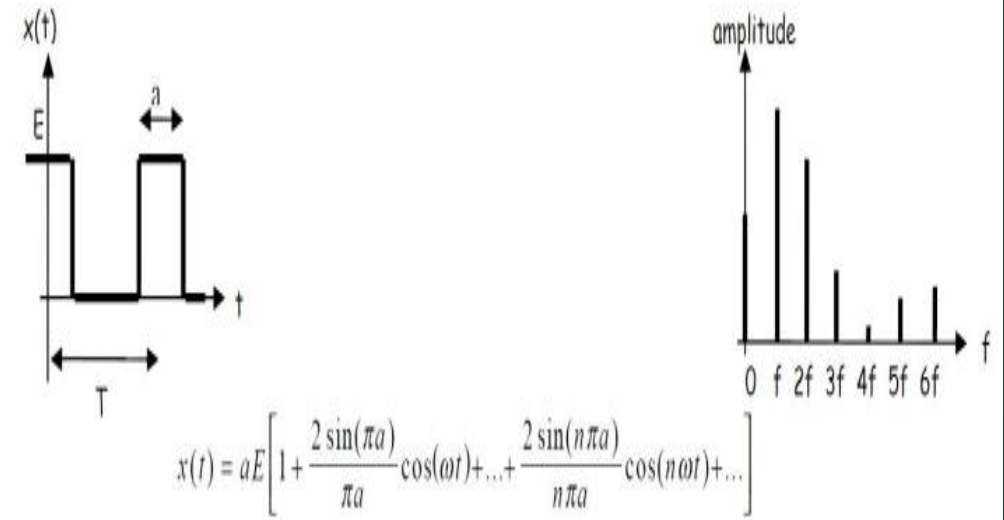
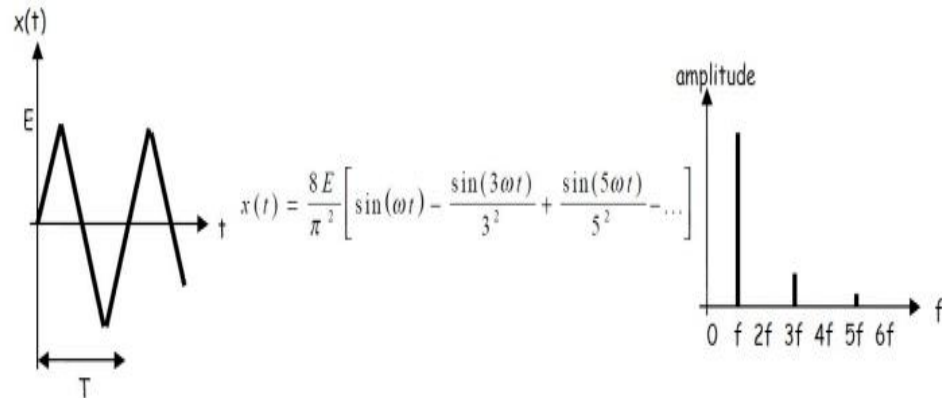
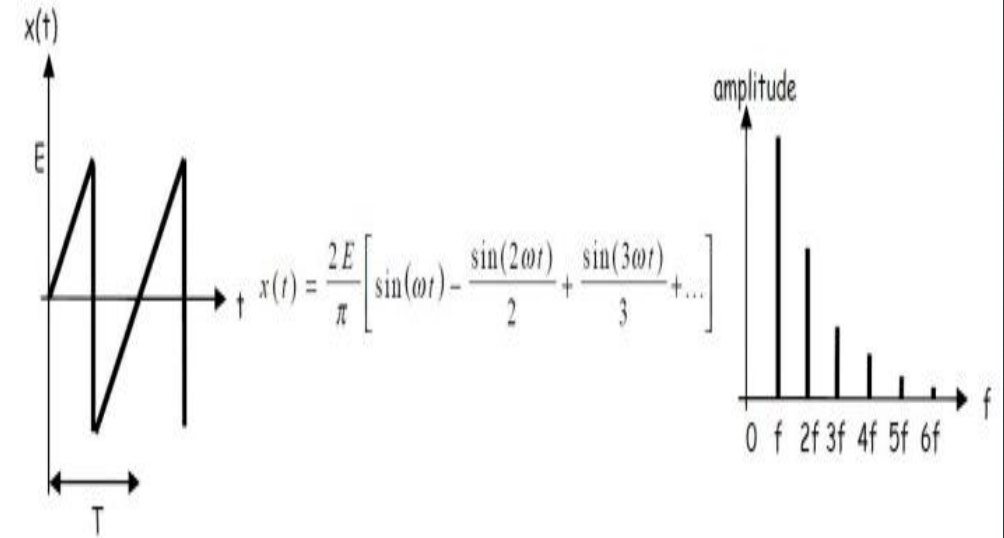
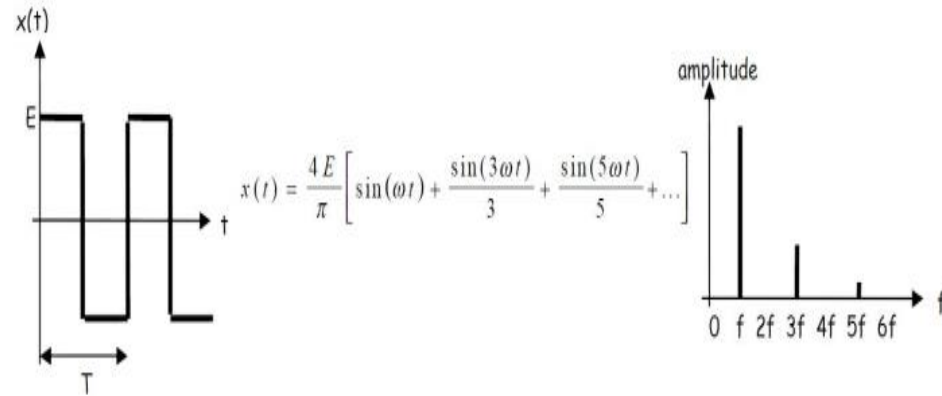


L'ensemble des A_n constitue au même titre que l'ensemble des a_n et b_n le spectre de la fonction f périodique.

Il est commode et utile pour la suite de représenter graphiquement le spectre de la façon ci-après :

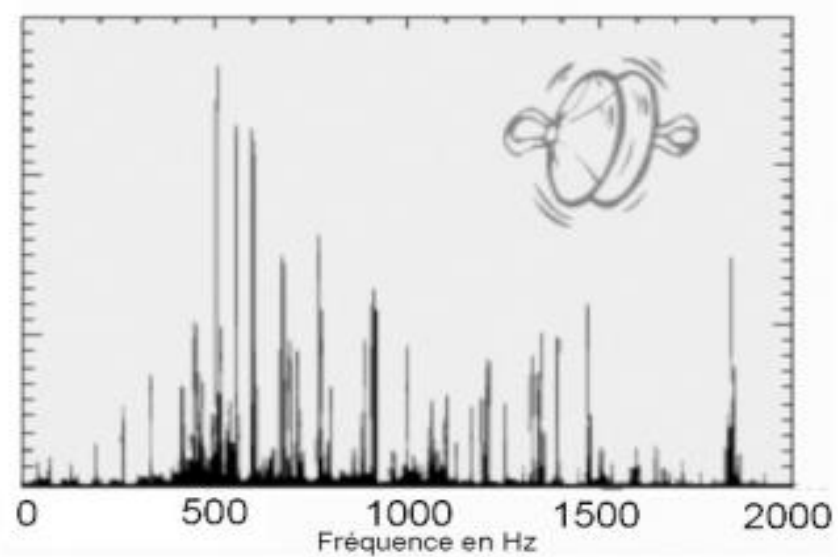
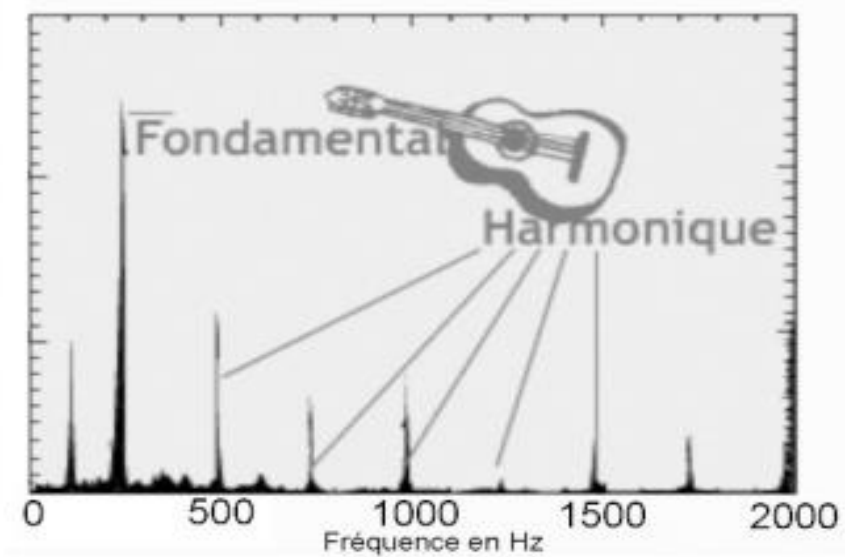
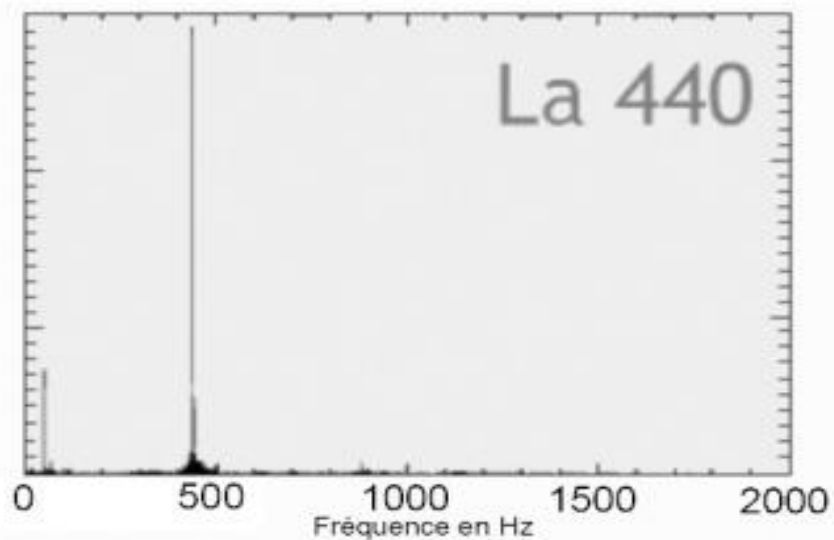


Exemples de spectres



La notion de spectre est très utilisée dans les domaines électriques, optiques et acoustiques.

- Optique : Décomposition de la lumière blanche par les gouttes d'eau de l'air en arc-en-ciel ou par un prisme,
- Electricité : Utilité des spectres pour rejeter ou conserver une certaine bande de fréquence : Filtrage...
- Acoustique : Certains sons sont plus purs que d'autres. Par exemple le son émis par un diapason est un pic situé à 440 Hz alors que le La 440 Hz émis par un violon sera formé de plusieurs pics



II. ONDE PROGRESSIVE

1. Notion d'onde

A la suite d'une perturbation, le phénomène de propagation d'une grandeur physique appelée vibration est appelée une onde. Cette propagation se fait sans transfert de matière.

La vibration peut-être :

La pression dans les ondes acoustiques

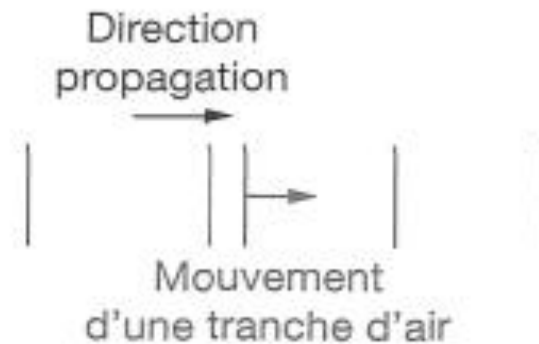
Le champ électromagnétique(\vec{E}, \vec{B}) en électromagnétisme

...

Dans le cas d'une onde sur une corde, la vibration est perpendiculaire à la direction de propagation : l'onde est transverse.

En revanche pour une onde sonore l'origine des variations locales de pression est la compression ou dilatation des tranches d'air le long du parcours de l'onde.

Le déplacement des tranches d'air est colinéaire à la direction de propagation : l'onde est longitudinale.



2. Onde progressive unidirectionnelle

Définition

Imaginons une source sonore émettant au point O la surpression $p(0,t)=f(t)$. Cette onde parvient au point M(x) avec un certain retard temporel Δt tel que :

$$\Delta t = \frac{x}{c} \text{ où } c \text{ est la célérité (vitesse de propagation) de l'onde}$$

Par conséquent :

$$p(x,t) = p(0,t - \Delta t) = f(t - \Delta t) = f\left(t - \frac{x}{c}\right)$$

Conclusion :

Une onde progressive dans le sens de $+\vec{u}_x$ est définie par :

$$p(x,t) = f\left(t - \frac{x}{c}\right) = f(x - ct)$$

Une onde progressive dans le sens de $-\vec{u}_x$ (aussi appelée onde régressive) est définie par :

$$p(x,t) = g\left(t + \frac{x}{c}\right) = g(x + ct)$$

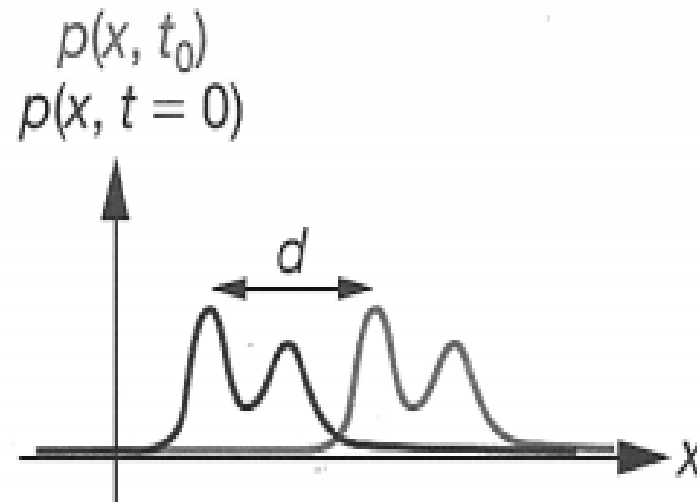
Remarque : les fonctions f et g sont quelconques mais dans ce modèle on n'a pas tenu compte de possibles déformations dues à des phénomènes dissipatifs.

formes à différents instants

A $t=0$, l'onde possède une forme quelconque. A t_0 elle a progressé de la distance $d=ct_0$.

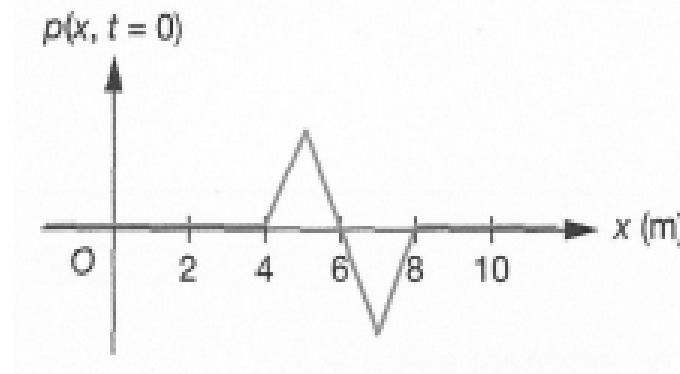
Par conséquent la forme de l'onde en x à t_0 est la même qu'en $x-d$ à $t=0$.

$$\text{En effet : } t_0 - \frac{x}{c} = 0 - \frac{x-ct_0}{c} = 0 - \frac{x-d}{c}$$

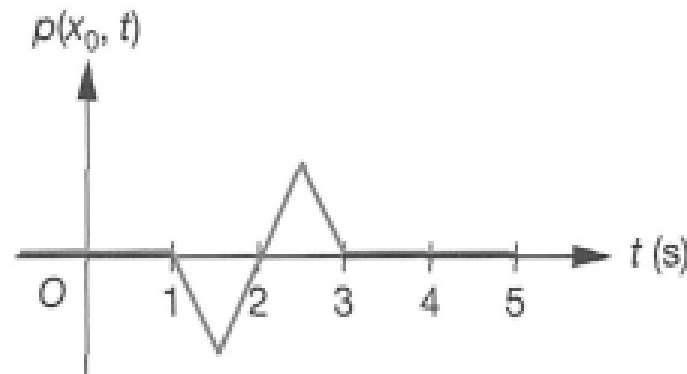


Evolution temporelle

Soit l'onde $p(x, t=0)$ se propageant à la vitesse $c=2\text{m/s}$ selon \vec{u}_x .



Si l'on veut tracer $p(x_0, t)$ pour $x_0=10\text{m}$. Il faut tenir compte de la célérité qui relie x à t . Ainsi la largeur spatiale de l'onde de 4m devient une largeur temporelle de 2s, avec pour déclenchement le temps $t=1\text{s}$.



3. Onde progressive sinusoïdale

Dans ce cas particuliers, l'onde s'écrit :

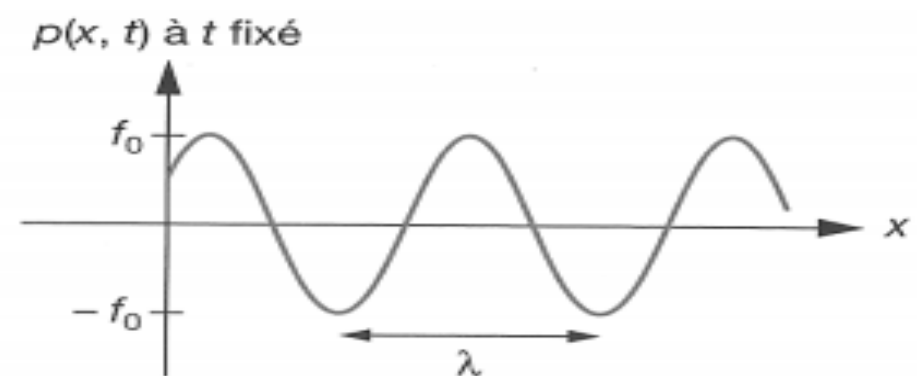
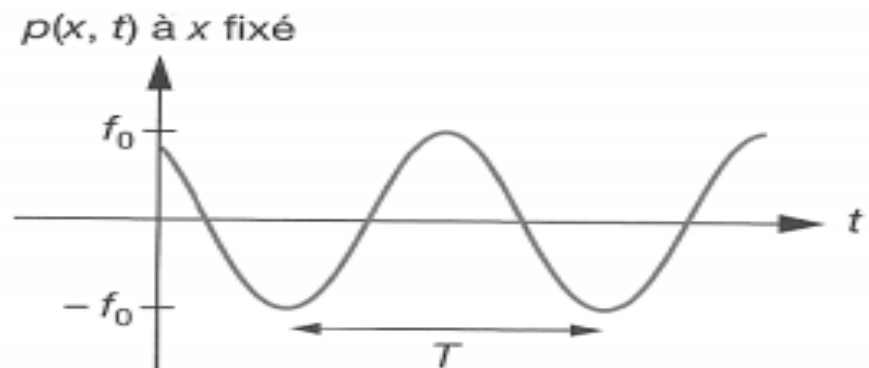
$$p(x, t) = p_0 \cos \left(\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right) = p_0 \cos(\omega t - kx) \text{ où } k = \frac{\omega}{c}$$

Le vecteur d'onde est définie par $\vec{k} = k\vec{u}$ où \vec{u} est la direction de propagation

Ce type d'onde présente deux périodes :

- 1 temporelle $T = \frac{2\pi}{\omega}$
- 1 spatiale λ longueur d'onde : $\lambda = \frac{2\pi}{k}$

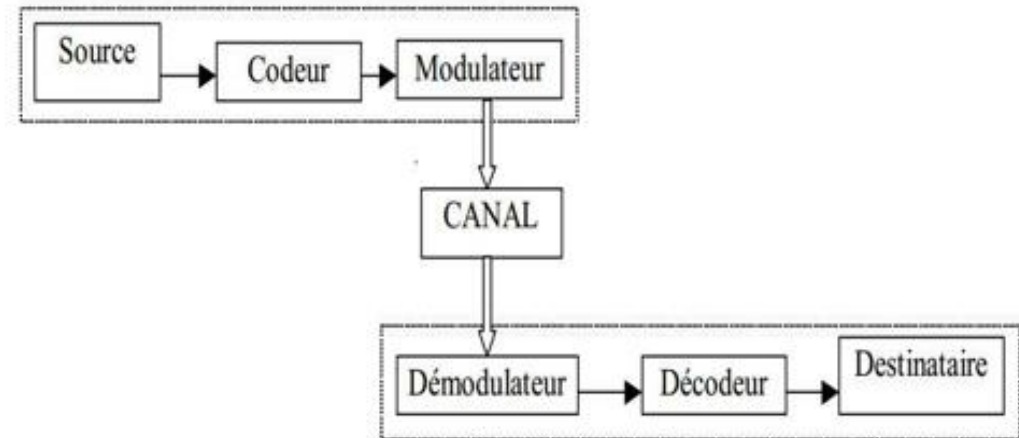
Le lien entre les deux périodes est : $\lambda = cT = \frac{c}{f}$ ou $\frac{c}{\nu}$



III. Modulations Numériques

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

Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique est donné à la figure où l'on se limite aux fonctions de base :



- ✓ La source émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires.
- ✓ Le codeur peut éventuellement supprimer des éléments binaires non significatifs (compression de données ou codage de source), ou au contraire introduire de la redondance dans l'information en vue de la protéger contre le bruit et les perturbations présentes sur le canal de transmission (codage de canal). Le codage de canal n'est possible que si le débit de source est inférieure à la capacité du canal de transmission (la probabilité d'erreur P_e tend dans ce cas vers 0 après les travaux de Hartley - Shannon).
- ✓ La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis.
- ✓ Enfin, du côté récepteur, les fonctions de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur.

■ 1.Principe

La modulation a pour objectif d'adapter le signal à émettre au canal de transmission. Cette opération consiste à modifier un ou plusieurs paramètres d'une onde porteuse centrée sur la bande de fréquence du canal. Cette onde porteuse est de la forme :

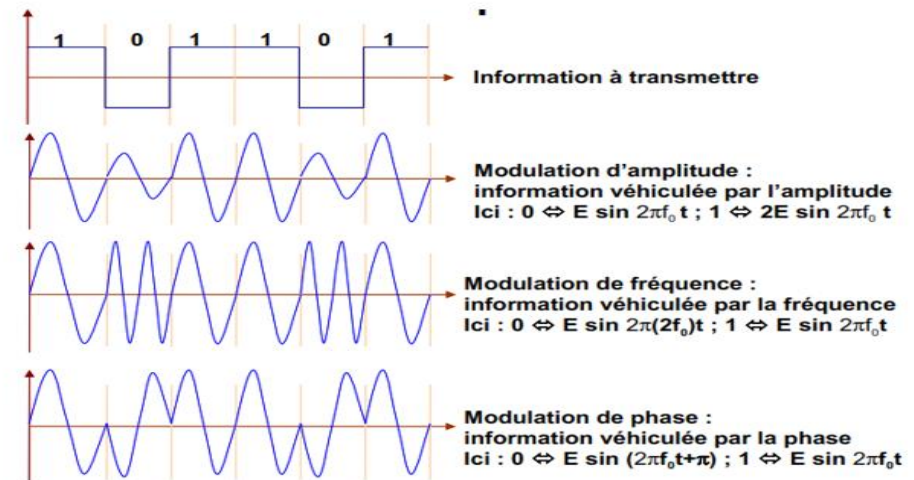
$$E \sin(2\pi f_0 t + \varphi)$$

- f_0 fréquence de la porteuse
- E amplitude
- φ phase

Dans les procédés de modulation binaire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui ne prend que deux valeurs possibles. Dans les procédés de modulation M- aire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui prend M valeurs. Ceci permet d'associer à un état de modulation un mot de n digits binaires. Le nombre d'états est donc $M = 2^n$. Ces n digits proviennent du découpage en paquets de n digits du train binaire issu du codeur. Les types de modulation les plus fréquemment rencontrés sont les suivants :

- ✓ Modulation par Déplacement d'Amplitude MDA.
(*Amplitude Shift Keying ASK*).
- ✓ Modulation par Déplacement de Phase MDP.
(*Phase Shift Keying PSK*).
- ✓ Modulation par Déplacement de Phase Différentielle MDPD.
(*Differential Phase Shift Keying DPSK*).
- ✓ Modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature MAQ.
(*Quadrature Amplitude modulation QAM*).
- ✓ Modulation par Déplacement de Fréquence MDF.
(*Frequency Shift Keying FSK*).

Voici quelques exemples de modulation selon l'information à transmettre :

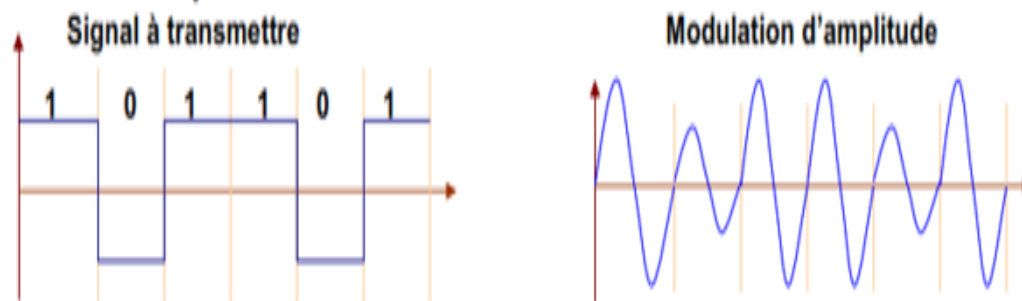


2. Modulation d'amplitude

On module l'amplitude signal électromagnétique. La terminologie anglaise utilisée est : **ASK** (Amplitude Shift Keying).

Exemple 1 : la modulation bivalente (2-ASK) utilise deux amplitudes.

0	E
1	2E



Exemple 2 : la modulation bivalente (4-ASK) utilise 4 amplitudes

00	E
01	2E
10	3E
11	4E

Pour réduire la puissance nécessaire on adopte le tableau de correspondance suivante :

00	-3E
01	-E
10	E
11	3E

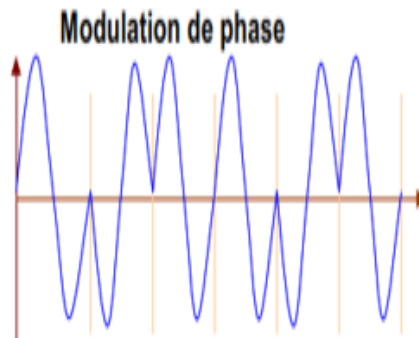
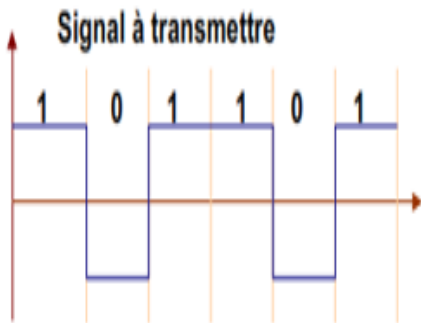
En général une modulation à 2^k états (2^k ASK) permet de transmettre k bits pendant une période.

3.Modulation de phase

On module la phase signal électromagnétique. La terminologie anglaise utilisée est : **PSK** (Phase Shift Keying).

Exemple 1 : la modulation bivalente (2-PSK ou BPSK Binary PSK) utilise deux phases.

0	π
1	0



Exemple 2 : la modulation à 4 états (**4-PSK** ou **QPSK** Quaternary PSK) utilise 4 phases.

Bits à transmettre	00	01	10	11
Phase	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
Signal transmis	$E \sin 2\pi f_0 t$	$E \cos 2\pi f_0 t$	$-E \sin 2\pi f_0 t$	$-E \cos 2\pi f_0 t$

En général une modulation à 2^k états (**2^k -PSK**) permet de transmettre k bits pendant une période.

4. Modulation d' amplitude en quadrature

Ici on module l'amplitude et la phase du signal électromagnétique. La terminologie anglaise utilisée est : QAM (Quadrature Amplitude Modulation).

Pourquoi modulation en Quadrature ?

$$E \sin (2\pi f_0 t + \varphi) =$$

$$= [E \cos \varphi] \sin 2\pi f_0 t + [E \sin \varphi] \cos 2\pi f_0 t$$

$$= [E \cos \varphi] \sin 2\pi f_0 t + [E \sin \varphi] \sin (2\pi f_0 t + \pi/2)$$

Ce qui implique une transmission de 2 porteuses en quadrature (décalées de $\pi/2$).

Exemple : la modulation à 4 états (4-QAM) utilise 2 amplitudes et 2 phases.

Dans ce cas 4-QAM et 4-PSK coïncident.

Bits à transmettre	00	01	10	11
Phase	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
Amplitude	E	E	-E	-E
Signal transmis	$E \sin 2\pi f_0 t$	$E \cos 2\pi f_0 t$	$-E \sin 2\pi f_0 t$	$-E \cos 2\pi f_0 t$

En général une modulation à 2^{2k} états (2^{2k} -QAM) permet de transmettre $2k$ bits pendant une période.

constellation d'une modulation de phase à 8 états

NOTATION EQUIVALENTE

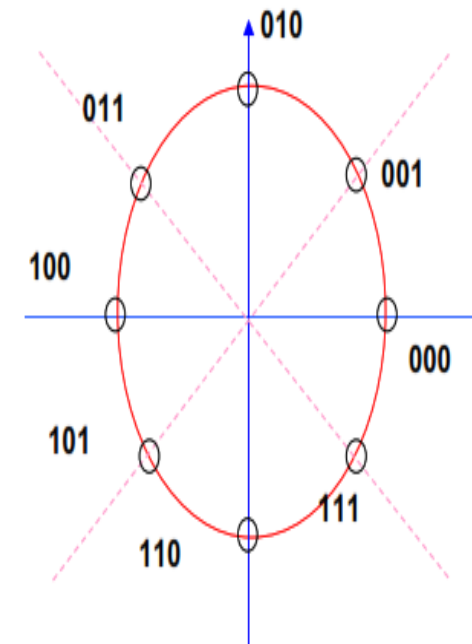
$$E \sin(2\pi f_0 t + \varphi) = a \sin 2\pi f_0 t + b \cos 2\pi f_0 t$$

$$\text{Avec : } a = E \cos \varphi \text{ et } b = E \sin \varphi$$

CONSTELLATION ASSOCIEE A UNE MODULATION

Elle donne la représentation de l'amplitude et de la phase dans le plan complexe.

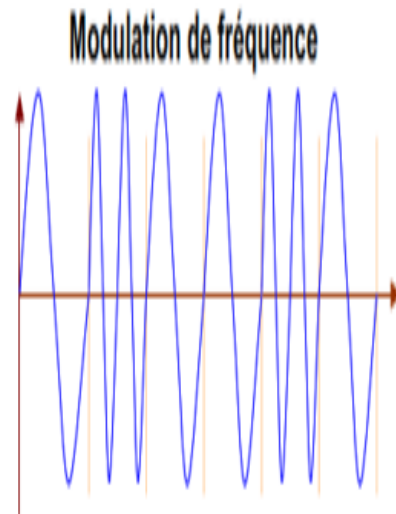
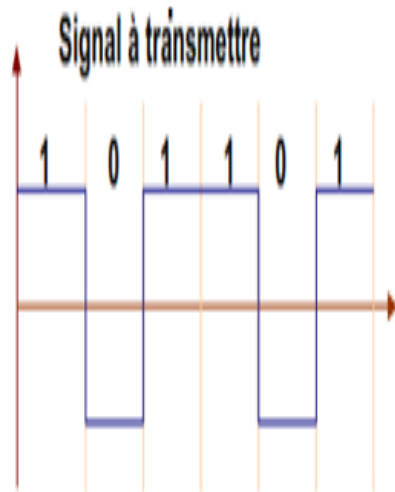
Le symbole complexe transmis est de la forme : $a + jb = \exp(j\varphi)$.



5. Modulation de fréquence

Exemple 1 : la modulation bivalente (2-FSK ou BFSK) utilise 2 fréquences.

0	f_0
1	f_1



Exemple 2 : la modulation à 4 états (4-FSK) utilise 4 fréquences.

Bits à transmettre	00	01	10	11
Fréquence	f_0	f_1	f_2	f_3
Signal transmis	$E \sin f_0 t$	$E \sin f_1 t$	$E \sin f_2 t$	$E \sin f_3 t$

En général une modulation à 2^k états (2^k -FSK) permet de transmettre k bits pendant une période.

Remarque : Pour ce type de modulation on n'a pas de constellation associée.

6. Modulation multiporteuse

Pour ce type de modulation, on utilise plusieurs fréquences porteuses : transmission d'une somme de **QAM**, **PSK** ou **ASK**, avec différentes fréquences porteuses.

La terminologie anglo-saxonne utilisée est : **DMT** (**Discret MultiTone**) sur liaison filaire ; **OFDM** (**Orthogonal Frequency Division Multiplex**) sans fil.

Les modulations multiporteuses ont un intérêt : meilleure utilisation des ressources spectrales.

Remarque :

En pratique on les applique :

➤ A l'ADSL (DMT)

➤ A TNT et Wifi IEEE 802.11a/g (OFDM).

7. APPLICATIONS

1. Les Modems téléphoniques

La transmission de données sur le canal téléphonique a été pendant les années 60 et 70 à l'origine du développement d'un grand nombre de techniques de traitement du signal en télécommunications. La transmission d'un grand débit sur le canal téléphonique (sur une bande de fréquence de 3500 Hz environ) a nécessité la mise en œuvre de modulations à grand nombre d'états comme la MAQ-16, la MAQ-32 et la MAQ-128. On pensait que le débit ne pourrait pas dépasser les 9,6 kbit/s à cause du rapport S/B limité des liaisons. En fait certaines techniques de codage, de filtrage et l'utilisation de constellations de type treillis ont permis de franchir un saut spectaculaire en matière de qualité et de débit que l'on peut atteindre. On assiste aujourd'hui au développement de modems "VFast" dont le débit atteint 28 kbit/s voir 56 kbit/s sur des liaisons de bonne qualité.

2. Les faisceaux hertziens

Au début de la numérisation, les faisceaux hertziens faisaient usage de modulations simples comme la MDP-4 mais l'utilisation efficace du spectre radioélectrique disponible a nécessité le développement de faisceaux hertziens utilisant des modulations à grand nombre d'états comme la MAQ-16 et la MAQ-64. C'est la modulation MAQ-16 qui a permis la transmission d'un débit de 140 Mbit/s dans la bande 6,4-7,1 GHz pour des canaux espacés de 40 MHz.

Aujourd'hui, des faisceaux hertziens utilisent la modulation MAQ-256 qui offre un débit de 280 Mbit/s pour des canaux espacés de 30 MHz. Notons que l'émetteur doit avoir une bonne linéarité pour transmettre ce type de modulations. Le problème principal dans les faisceaux hertziens numériques est la propagation par trajets multiples qui dégrade sérieusement la qualité et limite la possibilité de liaisons à grande capacité. Ce phénomène s'accroît lorsque le nombre d'états de la modulation augmente. A l'opposé des faisceaux hertziens à grande capacité se trouvent les faisceaux à faible débit (2 Mbit/s) et à faible coût dans lesquels l'efficacité spectrale n'est pas primordiale. Les modulations utilisées sont en général des MDF-PC à deux ou à quatre états qui permettent d'utiliser une amplification non linéaire dans l'émetteur.

3. Les transmissions par satellites

Les transmissions par satellite sont caractérisées par une forte atténuation de l'espace et une puissance limitée de l'émetteur à bord du satellite. Ces considérations privilégient l'efficacité en puissance (l'immunité au bruit) contre l'efficacité spectrale des liaisons. Les modulations les plus souvent utilisées sont la MDP-2, la MDP-4 et la MDP-8.

Avec ces modulations, l'amplificateur de puissance à bord du satellite peut être utilisé proche de sa saturation, ce qui permet d'employer efficacement la puissance disponible. Toutefois, on assiste aujourd'hui à un intérêt croissant à utiliser les modulations MDP-16 et MAQ-16 associées à un codage puissant. Le standard en Europe pour la radiodiffusion de la télévision numérique par satellite est basé sur une MDP-4.

4. Les radiocommunications avec les mobiles

Les systèmes de radiocommunications numériques se répandent très rapidement dans le monde entier. Les systèmes cellulaires américains et japonais utilisent une modulation différente de celle employée dans le système européen. La modulation utilisée aux Etats-Unis et au Japon est la $\pi/4$ -DQPSK qui est une MDP-4 dont on tourne les axes d'un angle de $\pi/4$ d'un symbole au suivant. Les rotations de phase de π qui se produisent en π sont ainsi interdites dans cette modulation. Cela élimine les passages par zéro de l'enveloppe du signal et réduit considérablement les fluctuations temporelles de celle-ci.

La modulation utilisée dans le système cellulaire européen, appelé GSM (Groupe Spécial Mobile), est une modulation à enveloppe constante connue sous le nom GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). C'est une variante de la modulation MSK dont les impulsions à l'entrée du modulateur sont de forme gaussienne. Cette mise en forme temporelle et spectrale lisse la trajectoire de phase du signal et réduit son occupation spectrale par rapport à la modulation MSK d'origine. Le critère de Nyquist est aussi respecté. Le train de données émis dans une bande de 200 kHz est un multiplex de 8 canaux téléphoniques. Compte tenu du codage correcteur d'erreurs, des bits de synchronisation et d'identification du canal ainsi que des autres données auxiliaires, le débit global est de 270 kbit/s environ.

5. La radiodiffusion

La technique retenue pour la radiodiffusion numérique sonore est le **COFDM** (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) qui est une technique de transmission multiporteuse associée à du codage de canal et à de l'entrelacement. Elle permettra par exemple d'offrir 16 canaux stéréo dans une bande de fréquence radioélectrique de 4 MHz environ. La radiodiffusion de la télévision numérique par voie terrestre est basée sur la technique COFDM. Elle nécessite une modulation à grande efficacité spectrale comme la MAQ-64 pour diffuser une chaîne de télévision haute définition ou 3 à 4 chaînes de télévision standards dans une bande de fréquence de 8 MHz.

L'extraordinaire variété des applications que nous venons d'exposer met en évidence l'importance capitale des différentes techniques de transmission numérique sur porteuse. Un intérêt majeur des transmissions numériques réside dans la possibilité de leur insertion harmonieuse dans les réseaux intégrés numériques qui se développent de jour en jour. Un autre avantage réside dans la possibilité de conserver l'intégrité de l'information à transmettre, ce qui est tout à fait impossible avec une transmission analogique. Cependant, la simplicité d'utilisation des modulations analogiques traditionnelles fait qu'elles ne sont pas encore reléguées au musée des techniques désuètes. Les systèmes modernes de communication numérique sont complexes et requièrent des circuits de modulation et de démodulation de plus en plus sophistiqués. Nous avons examiné un certain nombre de modulations qui sont aujourd'hui utilisées. Il s'avère que le choix d'un type de modulation est toujours déterminé par les contraintes de l'application. Le développement des transmissions numériques s'est appuyé sur les progrès rapides réalisés dans le domaine des circuits intégrés de traitement des signaux. Ainsi, l'utilisation de solutions intégrées devient indispensable au fur et à mesure que le niveau de complexité des systèmes s'accroît et que le prix consenti par le consommateur diminue.

ANNEXE

1. DEFINITIONS ET APPELLATIONS

- ✓ Un **symbole** est un élément d'un alphabet. Si M est la taille de l'alphabet, le symbole est alors dit M-aire. Lorsque $M=2$, le symbole est dit binaire. En groupant, sous forme d'un bloc, n symboles binaires indépendants, on obtient un alphabet de $M = 2^n$ symboles M-aires. Ainsi un symbole M-aire véhicule l'équivalent de $n = \log_2 M$ bits.
- ✓ La **rapidité de modulation** R se définit comme étant le nombre de changements d'états par seconde d'un ou de plusieurs paramètres modifiés simultanément. Un changement de phase du signal porteur, une excursion de fréquence ou une variation d'amplitude sont par définition des changements d'états.

La « rapidité de modulation » notée R s'exprime en « bauds » et est donnée par la formule suivante.

/

$$R = \frac{1}{T}$$

- ✓ Le **débit binaire** D se définit comme étant le nombre de bits transmis par seconde. Il sera égal ou supérieur à la rapidité de modulation selon qu'un changement d'état représentera un bit ou un groupement de bits.

- ✓ Le « débit binaire » notée D s'exprime en « bits par seconde » et est donnée par la formule suivante.

$$D = \frac{1}{T_b}$$

Pour un alphabet M-aire, on a la relation fondamentale : $T = nT_b$ soit $D = n R$. Il y a égalité entre débit de source et rapidité de modulation uniquement dans le cas d'une source binaire (alphabet binaire).

La qualité d'une liaison est liée au *taux d'erreur par bit* notée *T.E.B*:

$$T.E.B = \frac{\text{nombre de bits faux}}{\text{nombre de bits transmis}}$$

On notera la différence entre P_e et T.E.B. Au sens statistique, on a P_e = E(TEB). T.E.B tend vers P_e si le nombre de bits transmis tend vers l'infini.

➤ *L'efficacité spectrale* d'une modulation se définit par le paramètre η s'exprime en "bit/seconde/Hz". La valeur D est le "débit binaire" et B est la largeur de la bande occupée par le signal modulé.

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

Pour un signal utilisant des symboles M-aires, on aura :

$$\eta = \frac{1}{T.B} \log_2 M \text{ bit/sec/Hz.}$$

Remarquons que pour B et T donnés, l'efficacité spectrale augmente, comme on pouvait s'y attendre, avec le nombre de bit/symbole $n = \log_2 M$. C'est en effet la raison d'être de la modulation M-aire.



MERCI DE VOTRE AIMABLE ATTENTION