

# **Cours de Traitement du Signal**

## **Filière SMP S6**

### **Option : Licence Electronique Informatique Industrielle (EII)**

**M. El Amraoui**

**2019 - 2020**

---

## **Contenu du Module: Traitement du signal:**

Chapitre 1 : Introduction générale à la théorie et traitement du signal

Chapitre 2 : Analyse de Fourier : transformées et séries de Fourier

Chapitre 3 : Energie et puissance d'un signal, DSP

Chapitre 4 : Convolution et filtrage des signaux

Chapitre 5 : Echantillonnage et numérisation des signaux

Chapitre 6 : Traitement numérique des signaux discrets,

Chapitre 7 : Signaux et processus aléatoires

## **Travaux pratiques :**

1- Prise en main de Matlab/Simulink

2- Analyse spectrale des signaux : transformées de Fourier

3- Convolution, corrélation et échantillonnage de signaux (partie1 :simulation)

4- Echantillonnage de signaux (partie 2 : Expérimentation sur maquette)

## **Bibliographie**

[1] F. de Coulon, Théorie et traitement des signaux, Dunod, Paris, 1985.

[2] F. Cottet, Traitement des signaux et acquisition des données, Dunod

[3] Y. Duroc, L'essentiel en théorie et traitement du signal, Ellipses, Paris, 2011.

[4] J. Max, Méthodes et techniques de traitement du signal, 2 Tomes; Editions Masson

[5] J. Max et J.-L. Lacoume, Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques, Masson, Paris, 1996.

[6] M. Bellanger, Traitement numériques des signaux, Masson, Paris, 1991

[7] J.P. Delmas, Eléments de théorie du signal : les signaux déterministes, Ellipses, Paris 1991

[8] B. Picinbono, Théorie des signaux et des systèmes, 1989, 260 pages, Dunod Université.

[9] M. Kunt, Traitement numériques des signaux, Dunod, Paris, 1991.

[10]A. Papoulis, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, McGraw-Hill,1984

---

[11] Polycopie du cours de traitement du signal du Pr. El Hassani, Département de Physique, Faculté des Sciences Meknès.

### **Cours sur le Web :**

- Introduction au traitement du signal, Télécom Physique Strasbourg, Fabrice HEITZ, 2015
- Cours de traitement du signal, J. Scorletti, Science et Technologie de l'Information, Département Electronique Electrotechnique Automatique, Ecole centrale Lyon, 2011-2012
- Cours de traitement de signal, C. Jutten, Université Joseph Fourier, Polytech Grenoble, 2009
- Cours de traitement du signal, Signaux déterministes et signaux aléatoires, S. Dos Santos, 2015-2016
- Cours de traitement des signaux, F. Mudry, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
- Cours de traitement du signal, parties 1 et 2, Zarader J. L. 2008-2009
- Cours de traitement de signal, J. L. Crowley INSA Lyon

### **Prérequis du module**

Le cours du traitement du signal nécessite des pré-requis en mathématiques: analyse complexe, algèbre linéaire, Intégration, distributions et probabilités-statistiques.

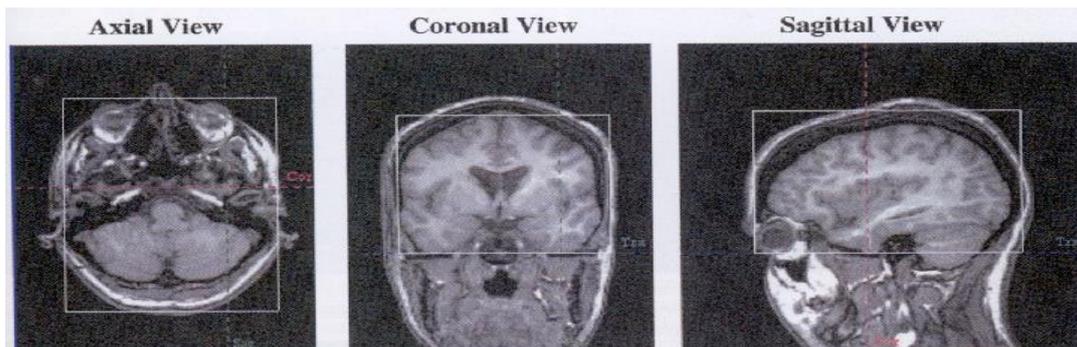
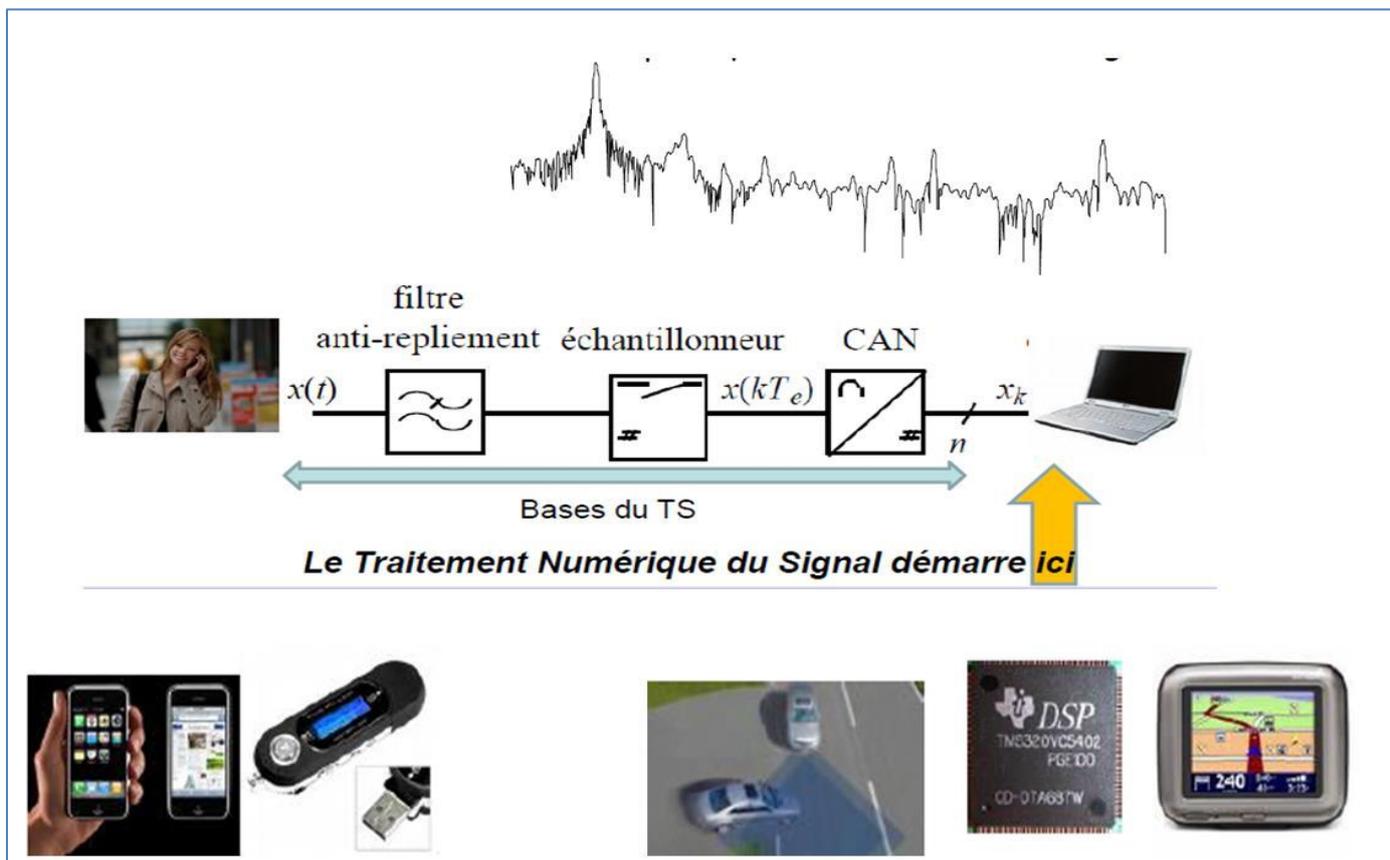
## Chapitre 1

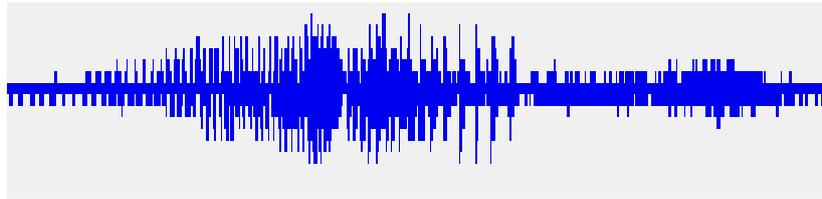
### Introduction générale au traitement et théorie et du signal

#### Objectifs :

Acquérir les notions de base de traitement du signal pour :

- Modéliser et représenter les signaux
- Manipuler des signaux analogiques et numériques
- Effectuer des opérations simples de traitement du signal





## I- Introduction

Traitement du signal (TDS) : discipline née au XIX<sup>ème</sup> siècle (télégraphe, téléphone)

Mais vrai démarrage du TDS moderne pendant la deuxième guerre mondiale (radar)

TDS : discipline autonome qui allie mathématiques, physique, électronique et informatique

TDS = séparer un message du bruit (?)

Vues les différentes applications, le TDS est interdisciplinaire, et repose sur les mathématiques appliquées, les statistiques, l'électronique analogique ou numérique, ...(fig. 1)

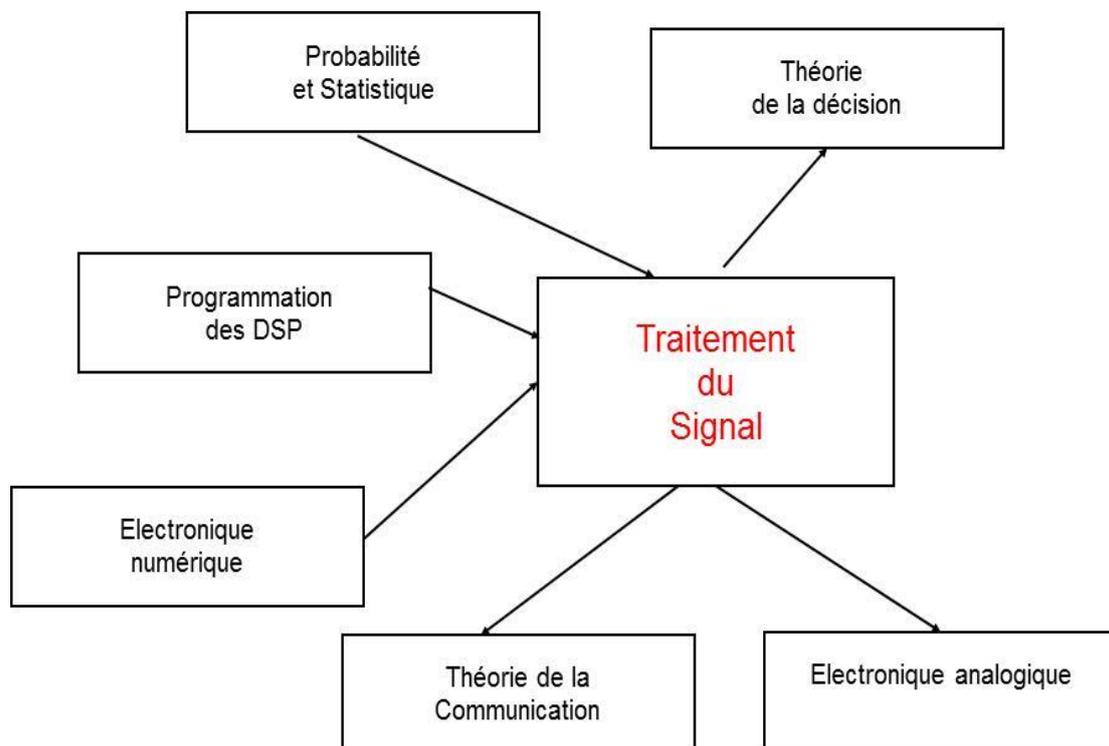


Figure 1

Le traitement du signal est devenu actuellement une discipline intéressante qui rend des services considérables dans divers champs d'application tels que les télécommunications, le multimédia, la médecine, l'automobile, l'aéronautique, le spatial, l'astrophysique, la sismique,

la prospection pétrolière, l'agriculture, etc. Le besoin et la demande en savoir-faire en traitement du signal témoignent de l'enjeu crucial de cette discipline dans le cursus et la formation scientifique du chercheur d'emploi. C'est ainsi que les formations scientifiques de l'enseignement supérieur technique surtout les écoles d'ingénieurs, BTS, le second cycle des universités (parcours techniques) présentent les éléments de base du traitement du signal.

Historiquement, le traitement du signal apparaît au début du 20<sup>ème</sup> siècle en même temps que l'électronique (détection et amplification des signaux faibles). Mais on peut cependant noter les premiers travaux de l'invention des télégraphes électriques (Morse, Cooke Wheatstone, 1830), du téléphone (Bell, 1876) et de la radio (Marconi Popov 1895) au 19<sup>ème</sup> siècle.

Hormis, la contribution apportée par Fourier (1822, travaux sur la propagation de la chaleur), la théorie du signal apparaît en 1930 avec les travaux de Wiener et Kintchinesur les processus aléatoires et ceux de Nyquistet Hartleysur la quantité d'information transmise sur une voie télégraphique.

Les contributions essentielles au traitement du signal (TDS) et à la théorie du signal n'interviennent qu'après la seconde guerre mondiale. Invention du transistor en 1948, travaux de Shannon sur la communication, de Wiener sur le filtrage optimal et de Schwartz sur les distributions.

Les applications du traitement du signal sont nombreuses : télécommunications, géophysique, reconnaissance des formes , biomédical, acoustique, etc...

## II- Définitions

### II-1 Signal

Signal vient du latin signum : signe ; variation d'une grandeur physique de nature quelconque porteuse d'information. Le signal peut être aussi défini comme le support physique de l'information qu'il transporte de sa source à son destinataire. Il sert de vecteur à une information. Il constitue la manifestation physique d'une grandeur mesurable (courant, tension, force, température, pression, etc.).

Toutes les grandeurs physiques susceptibles de variations et obtenues à l'aide de capteurs sont des signaux.

#### Exemples ▫

- 
- Signaux optiques, magnétiques, radioélectriques. . .
  - Onde acoustique : courant délivré par un microphone (parole, musique, ...)
  - Signaux biologiques : activité électrique du cerveau, activité musculaire du cœur,
  - Tension aux bornes d'un condensateur en charge
  - Signaux géophysiques : vibrations sismiques
  - Images, Vidéos □ etc.

## II-2. Bruit

Le bruit peut être défini comme tout phénomène perturbateur gênant la perception ou l'interprétation d'un signal.

## II-3. Rapport signal à bruit

Le rapport signal à bruit mesure la quantité de bruit contenue dans le signal. C'est le rapport des puissances qui chiffre le degré de contamination du signal utile par du bruit. Il s'exprime par le rapport des puissances du signal ( $P_S$ ) et du bruit ( $P_B$ )

$$\xi = \frac{P_S}{P_B}$$

Il est souvent donné en décibels (dB) :  $\frac{S}{B} = 10 \log \frac{P_S}{P_B}$

## II-4. Système

Un système est un dispositif représenté par un modèle mathématique de type Entrée/Sortie qui apporte une déformation au signal (Ex: modulateur, filtre, etc...).

**Facteur de bruit d'un système** : il est défini par  $\mathbf{F} = \frac{\xi_{\text{entrée}}}{\xi_{\text{sortie}}}$

C'est un facteur qui chiffre la détérioration d'un système.

La différenciation entre le signal et le bruit est artificielle et dépend de l'intérêt de l'utilisateur: les ondes électromagnétiques d'origine galactique sont du bruit pour un ingénieur des télécommunications par satellites et un signal utile pour les radioastronomes.

---

## II- 5 Traitement du signal

Le traitement du signal est la discipline technique qui, s'appuyant sur les ressources de l'électronique, de l'informatique et de la physique appliquée, a pour objet l'élaboration et l'interprétation des signaux. Il permet de créer, d'analyser et de transformer les signaux en vue de leur exploitation. Son champ d'application se situe donc dans tous les domaines concernés par la perception, la transmission ou l'exploitation des informations véhiculées par ces signaux. Le TDS s'applique à tous les signaux physiques (onde acoustique, signal optique, signal magnétique, signal radioélectrique, etc.) indépendamment de leur nature.

## II-6 Traitement d'image

Le traitement d'images peut être considéré comme une extension du traitement du signal aux signaux bidimensionnels (images).

## II-7 Théorie du signal

La théorie du signal a pour objectif fondamental la "description mathématique" des signaux. Cette représentation commode du signal permet de mettre en évidence ses principales caractéristiques (distribution fréquentielle, énergie, etc.) et d'analyser les modifications subies lors de la transmission ou du traitement de ces signaux.

## II-8 Traitement de l'information

Le traitement de l'information fournit un ensemble de concepts permettant d'évaluer les performances des systèmes de transfert d'informations, en particulier lorsque le signal porteur de message est "bruité". Cela inclut les méthodes de "**codage de l'information**" dans le but de la réduction de redondance, de la correction des erreurs, de la confidentialité (**cryptage**).

L'ensemble des concepts et méthodes développés dans le traitement de l'information et du signal forme **la théorie de la communication**.

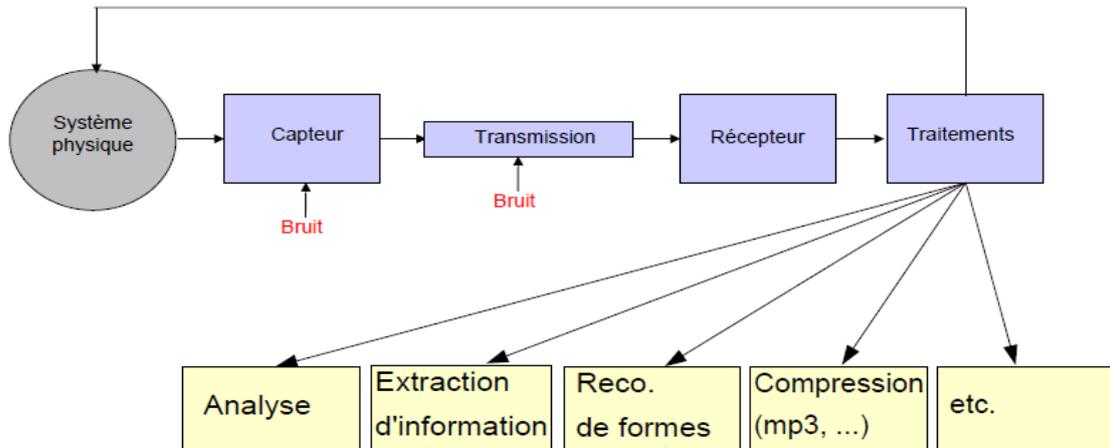


Figure 2 : Chaîne de traitement de l'information et le TDS

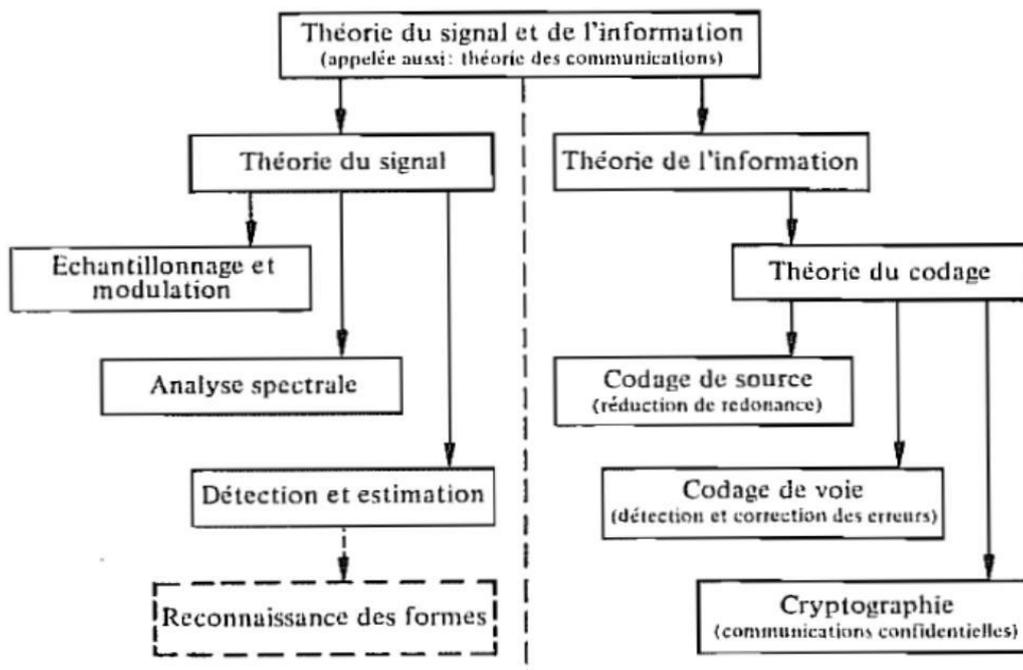


Figure 3

### III- Principales fonctions du traitement du signal

Les fonctions du traitement du signal peuvent se diviser en deux catégories : **l'élaboration des signaux** (incorporation des informations) et **l'interprétation des signaux** (extraction des informations). Les principales fonctions intégrées dans ces deux parties sont les suivantes :

---

### III-1 Élaboration des signaux:

- Synthèse : création de signaux de forme appropriée en procédant par exemple à une combinaison de signaux élémentaires
- Modulation : changement de fréquence : moyen permettant d'adapter un signal aux caractéristiques fréquentielles d'une voie de transmission.
- Codage : traduction en code binaire (quantification), etc.

### III-2 Interprétation des signaux:

- Filtrage : élimination de certaines composantes indésirables
- Détection : extraction du signal d'un bruit de fond (corrélation)
- Identification : classement d'un signal dans des catégories préalablement définies
- Analyse : isolement des composantes et des caractéristiques essentielles ou utiles d'un signal de forme complexe (transformée de Fourier) pour mieux en comprendre la nature,
- Mesure : estimation de la valeur d'une grandeur caractéristique associée au un signal avec un certain degré de confiance (valeur moyenne, etc.).
- Régénération : opération par laquelle on tente de redonner sa forme initiale à un signal ayant subi diverses distorsions.

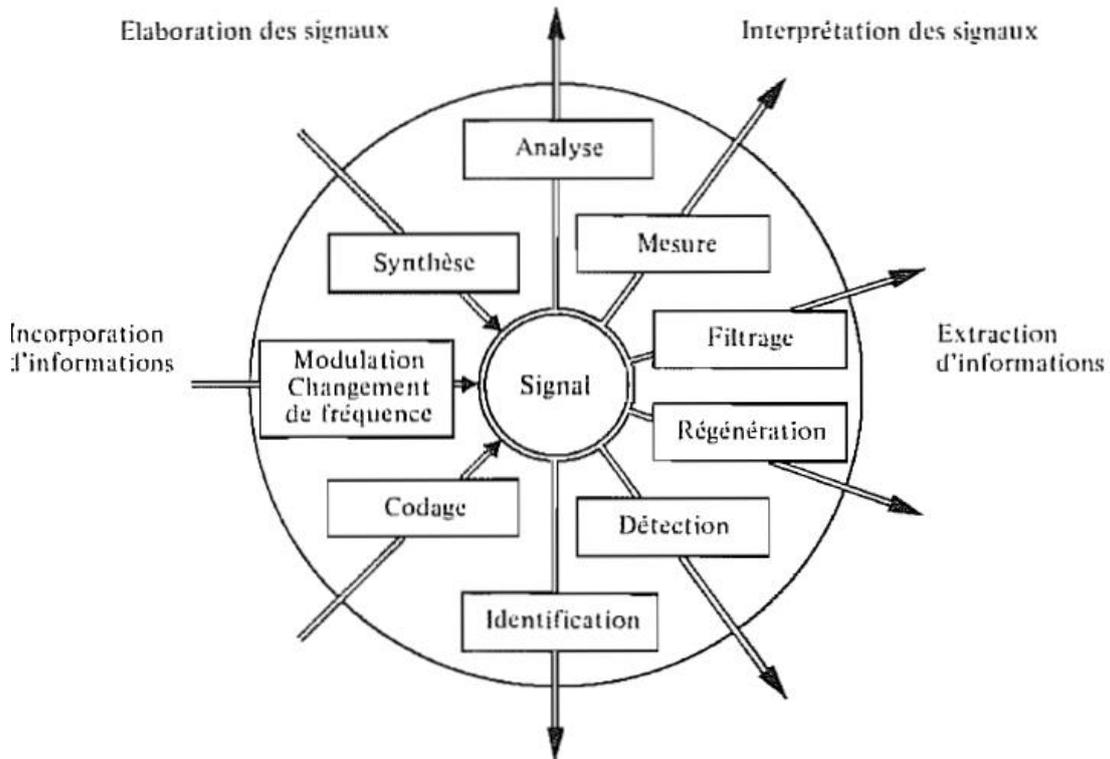


Figure4: Principales fonctions du traitement du signal

#### IV- Domaines d'application du traitement du signal

Les domaines d'application du traitement du signal sont nombreux :

Télécommunications	Géophysique, prospection minière
Analyses biomédicales	Sismologie
Automobile	Astronomie
Téledétection	Radar, sonar
Aéronautique	Technique demesure
Surveillance de processus industriels	etc ...
Reconnaissance de formes	
Traitement d'images	

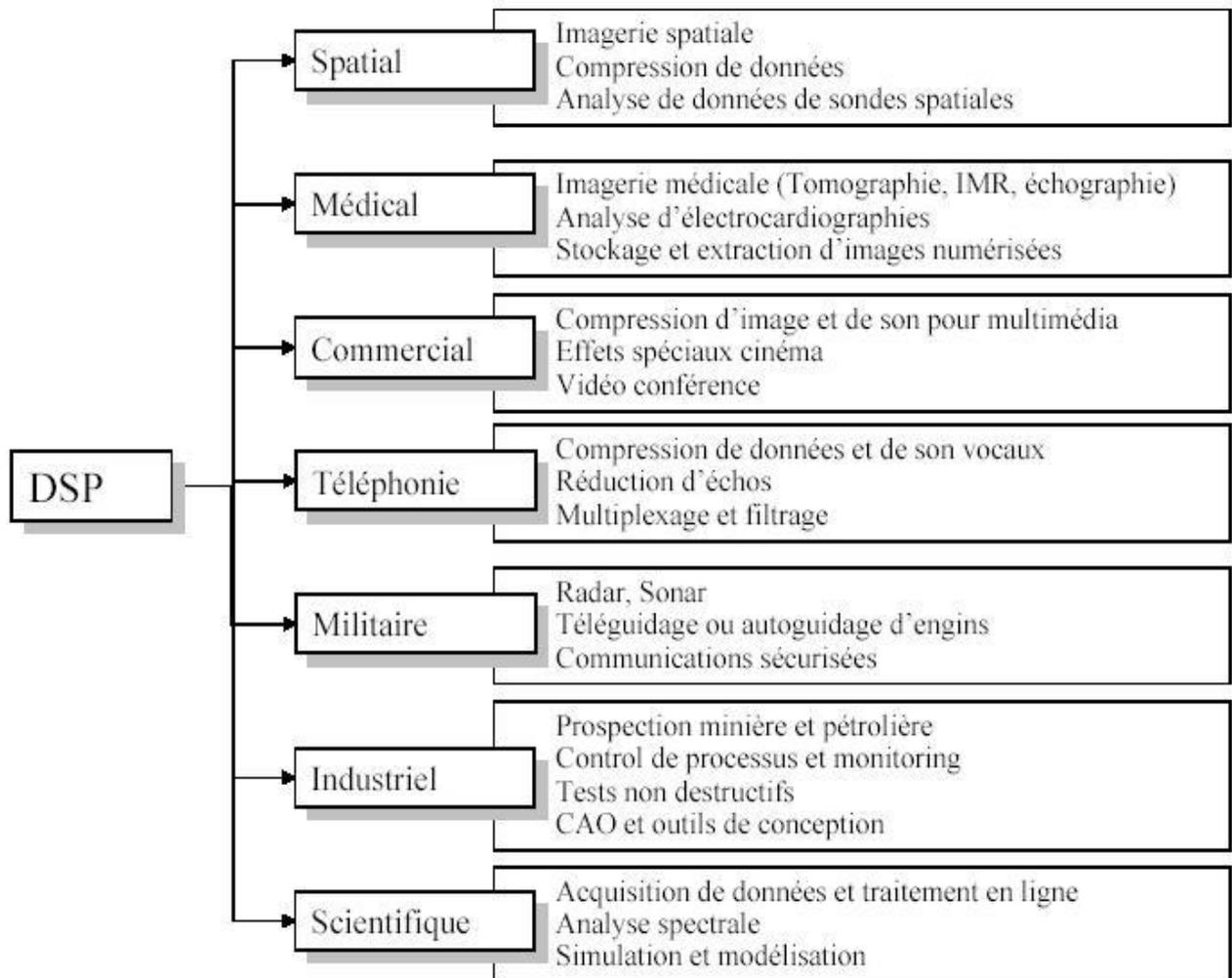


Figure 5 : Domaines d'application du TDS

## V- Classification des signaux

On peut envisager plusieurs modes de classification pour les signaux suivant leurs propriétés : classification phénoménologique, morphologique, spectrale, énergétique, dimensionnelle ...

### V-1 Classification phénoménologique

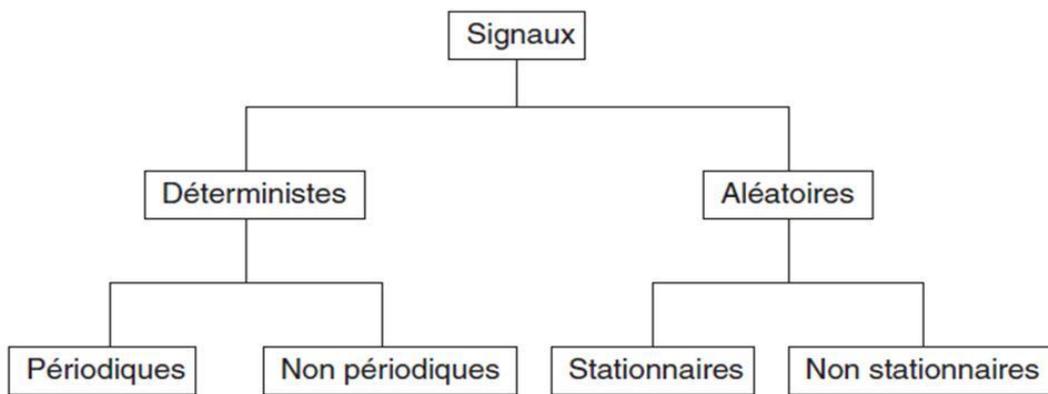
On considère la nature de l'évolution du signal en fonction du temps. Il apparaît deux types de signaux :

#### V-1-1 Signaux déterministes (certains) :

Leur évolution en fonction du temps peut être parfaitement modélisée par une fonction mathématique. On retrouve dans cette classe les signaux périodiques, les signaux transitoires, les signaux pseudo-aléatoires, etc...

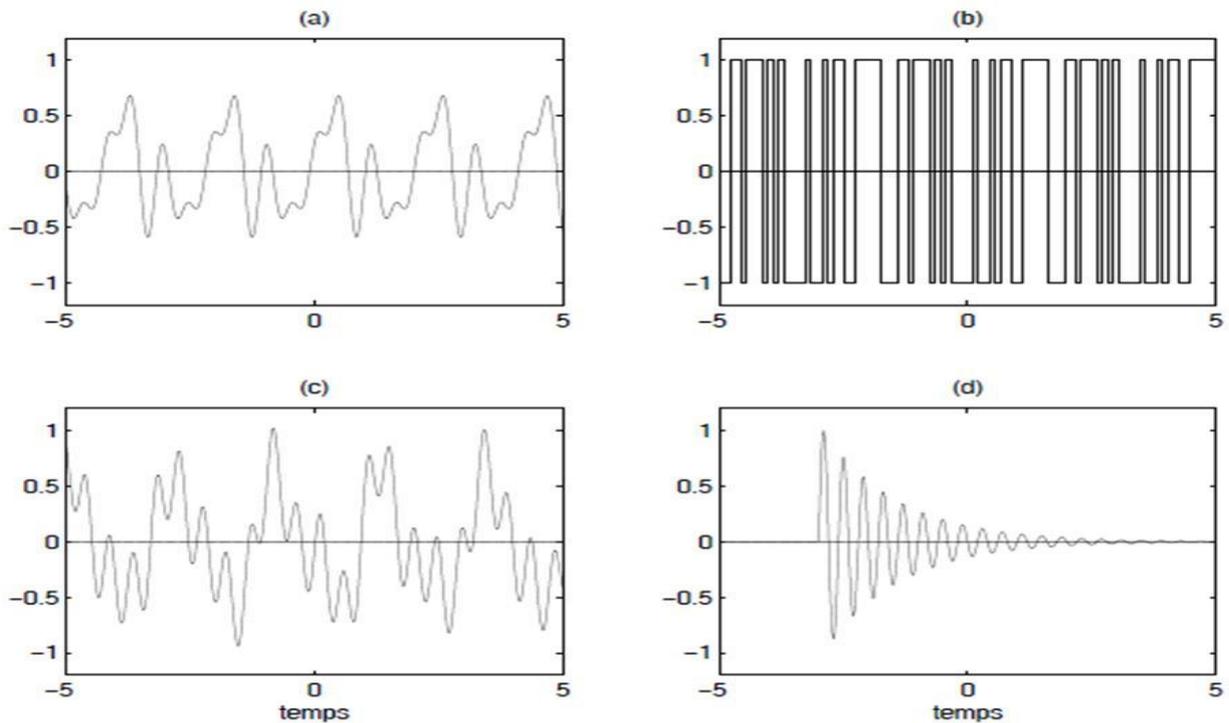
### V-1-2 Signaux aléatoires (stochastiques) :

Leur comportement temporel est imprévisible. Il faut faire appel à leurs propriétés statistiques pour les décrire. Si leurs propriétés statistiques sont invariantes dans le temps, on dit qu'ils sont **stationnaires**.



**Classification phénoménologique des signaux**

Figure 6 : Classification phénoménologique



1) Quatre signaux déterministes : (a) périodique, (b) pseudo-aléatoire, (c) quasi-périodique, (d) non-permanent.

2) Trois signaux aléatoires : (a) bruit blanc (spectre infiniment large et constant), (b) bruit large bande (spectre de largeur finie), (c) bruit non-stationnaire.

Figure 7 : Classification phénoménologique des signaux

#### IV-2 Classification morphologique (continu ou discret).

Le temps est un paramètre important de classification. Le traitement numérique des signaux conduit à faire la distinction entre les signaux dits à temps continus (signaux continus) et les signaux dits à temps discrets (signaux discrets ou échantillonnés). Un autre paramètre des signaux traités est à prendre en compte, c'est l'amplitude qui peut aussi être continue ou discrète (quantifiée). Ainsi quatre formes de signaux, qui se retrouvent dans un système numérique de contrôle d'un processus physique, peuvent être distinguées (cf figure 5) :

1- Signaux continus en temps et en amplitude :  $x(t)$ . On les appelle également signaux analogiques (Fig a) ; ils proviennent généralement de processus physiques.

---

2. Signaux discrets en temps, continus en amplitude :  $x_e(t = nT_e)$ . Ce sont les signaux échantillonnés (fig. b). Ils ne sont définis qu'à des instants déterminés multiples de la période d'échantillonnage  $T_e$ , mais leur amplitude peut varier de manière continue.

3. Signaux discrets en temps et en amplitude :  $x_q[n]$ . De tels signaux sont quantifiés en amplitude ; ils ne peuvent prendre que des valeurs déterminées, généralement, multiples d'un pas de quantification. Ce sont les valeurs numériques fournies par les convertisseurs analogiques-numériques (CAN). Ils ne sont définis qu'aux instants d'échantillonnage et correspondent aux signaux numériques (fig. c).

4. Signaux continus en temps, discrets en amplitude :  $x_q(t)$ . Ce sont des signaux quantifiés similaires à ceux décrits en 3, dont la valeur est maintenue par un bloqueur d'ordre zéro entre 2 périodes d'échantillonnage (fig. d). Ces signaux correspondent à ceux fournis par les convertisseurs numériques analogiques (CNA).

- **La numérisation d'un signal** est l'opération qui consiste à faire passer un signal de la représentation dans le domaine des temps et des amplitudes continus au domaine des temps et des amplitudes discrets. Cette **opération de numérisation d'un signal** peut être décomposée en deux étapes principales : **échantillonnage et quantification**.

- **La restitution** (ou l'interpolation) constitue le processus inverse qui intervient lors du passage du signal numérique au signal analogique : commande d'un actionneur. Ces trois étapes sont indissociables. En effet, le signal, étant le support physique d'une information, doit conserver au cours de ces modifications tout le contenu informatif initial.

Cette condition, ajoutée à la notion de coût limite d'un système, va être à la base de la numérisation des signaux et de l'étude du traitement numérique.

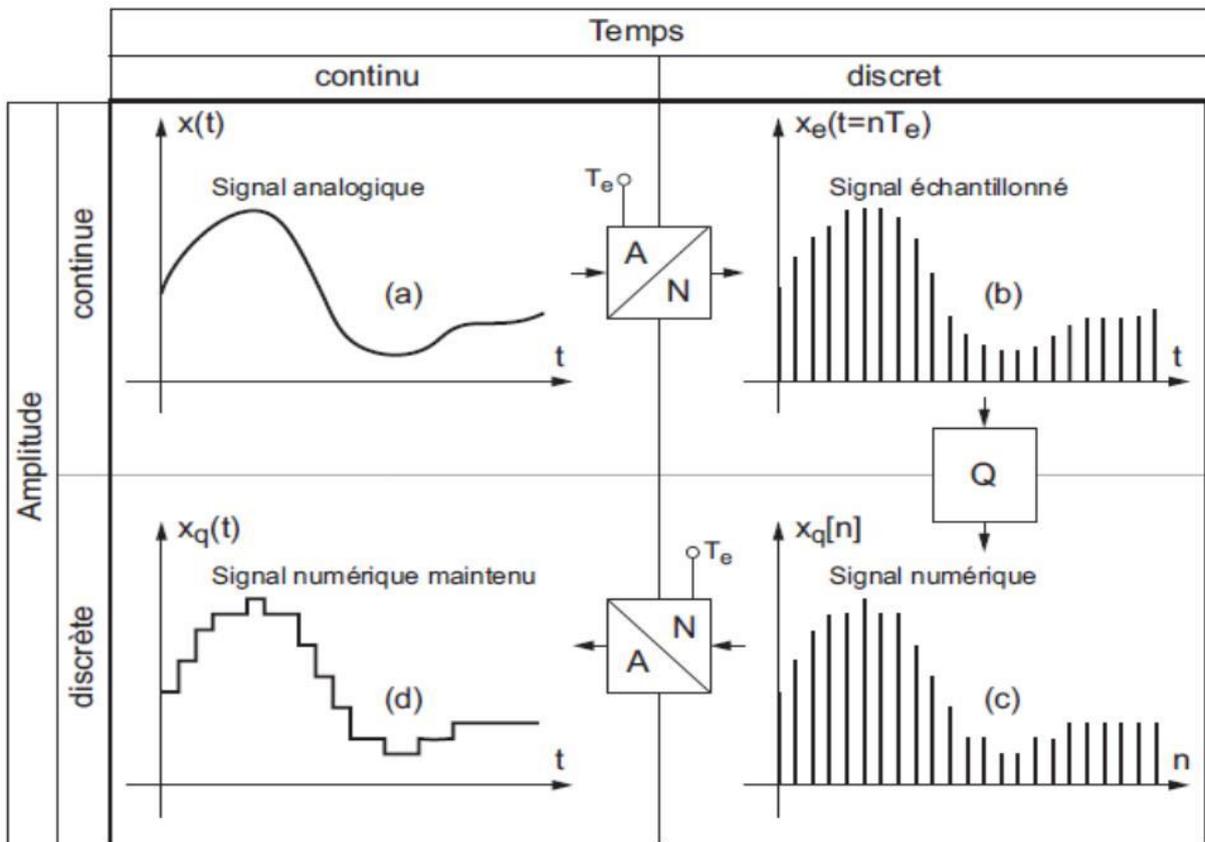
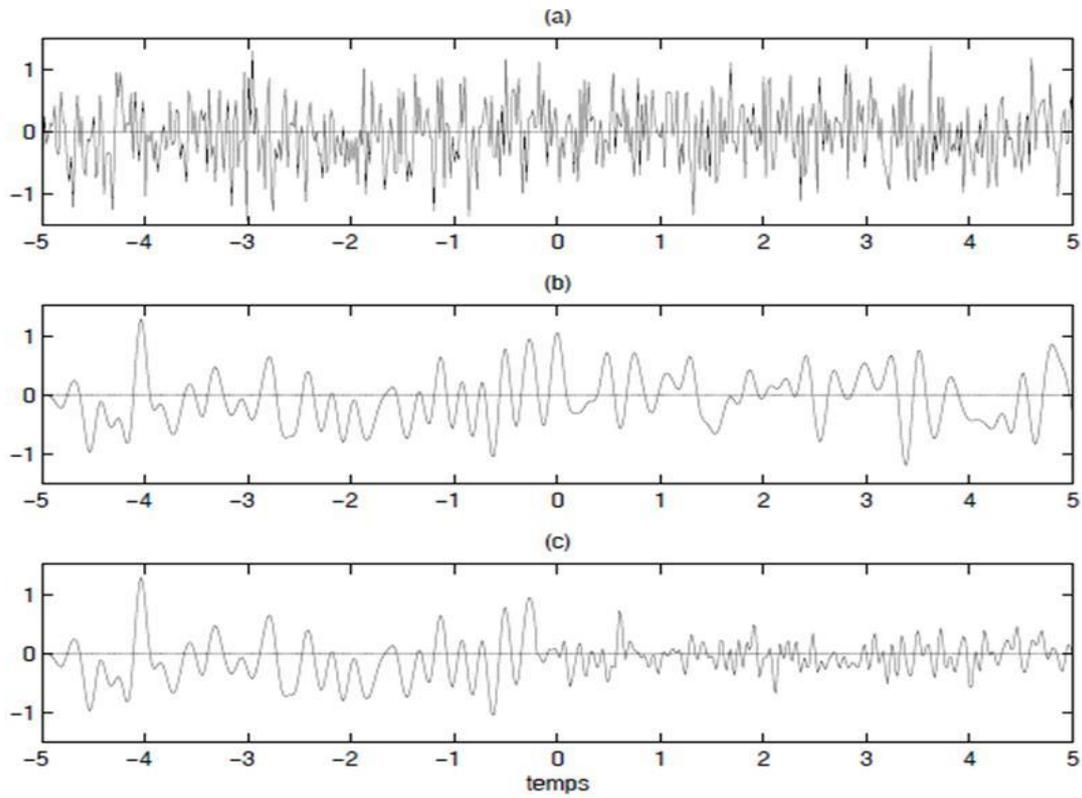


Figure8 : Les quatre types de signaux classés suivant leur morphologie (continu ou discret)

**D'un signal continu (analogique) à un signal discret (numérique):  
3 étapes**

**Chaîne de numérisation d'un signal temporel (1-D)**

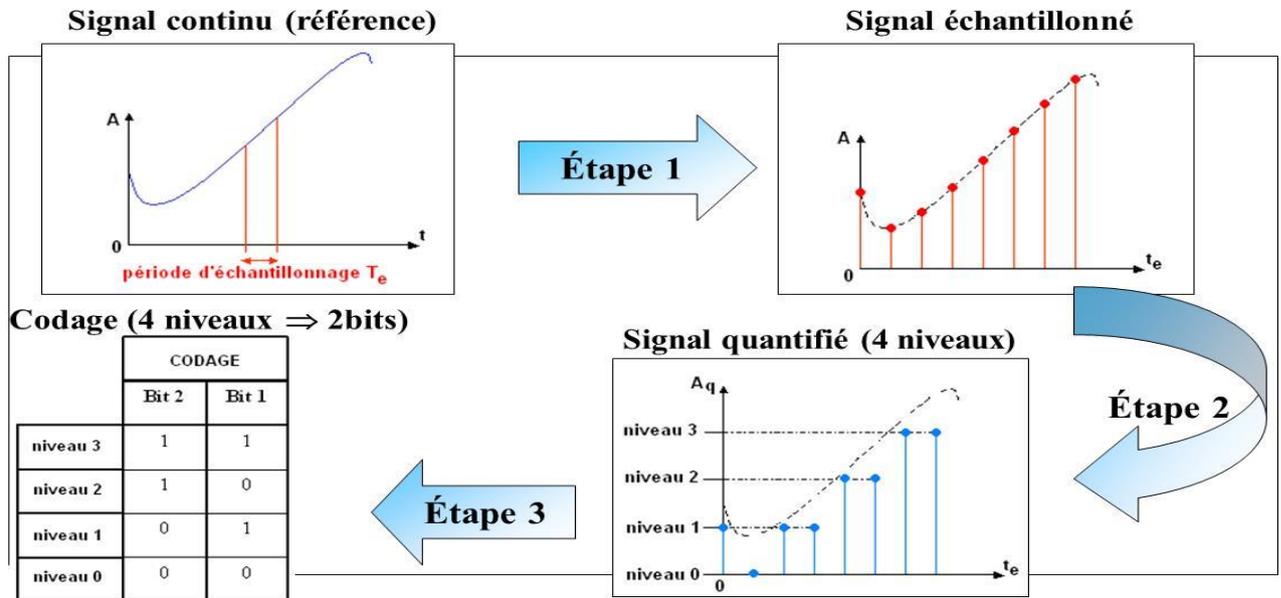


Figure9 :Etapes de numérisation d'un signal

**IV-3 Classification énergétique**

Dans ce cas on considère l'énergie des signaux comme critère de classification. On distingue les signaux à énergie finie et les signaux à puissance moyenne finie.

## □ Energie et Puissance des signaux

Soit un signal  $x(t)$  défini sur  $]-\infty, +\infty[$ , et  $T_0$  un intervalle de temps

### ◆ Energie de $x(t)$

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \quad \text{ou} \quad E = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} |x(t)|^2 dt$$

### ◆ Puissance moyenne de $x(t)$

$$P = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} |x(t)|^2 dt$$

➤ Homogène à E/t

Cas des signaux périodiques de période  $T$   $P = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt$

dS

.**Signaux à énergie finie** : possèdent une puissance moyenne nulle et une énergie finie.

. **Signaux à puissance moyenne finie** : possèdent une énergie infinie et sont donc physiquement irréalisables.

## IV-4 Classification spectrale

Le signal est classé par le domaine de variation de la fréquence moyenne Df :

- Df < 250 KHz : signaux basses fréquences (BF)
- 250 KHz < Df < 30 MHz : signaux hautes fréquences (HF)
- 30 MHz < Df < 300 MHz : signaux très hautes fréquences (VHF)
- 300 MHz < Df < 3 GHz : signaux ultra hautes fréquences (UHF)
- Df > 3 GHz : signaux super hautes fréquences (SHF)

Lorsque la fréquence du signal devient très grande, pratiquement supérieure à quelques térahertz (1 THz =  $10^{12}$  Hz), la longueur d'onde  $\lambda$  est le paramètre de référence ( $\lambda = c/F$  avec c

: vitesse de la lumière  $3 \cdot 10^8$  m/s) :

- 700 nm <  $\lambda$  < 0, 1 mm signal lumineux infrarouge

---

–  $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$  signal lumineux visible

–  $10 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$  signal lumineux ultraviolet

#### **IV-5 Classification suivant la parité**

Un signal est paire si  $s(-t) = s(t)$

Un signal est impaire si  $s(-t) = -s(t)$

#### **IV-6 Classification dimensionnelle**

Les signaux sont classés suivant leur dimension.

Tension électrique  $v(t)$  = signal unidimensionnel

Image statique niveaux de gris  $\Leftrightarrow$  luminance  $I(x,y)$  = signal bidimensionnel

Séquence d'images  $\Leftrightarrow I(x,y,t)$  = signal tridimensionnel

## V- Signaux élémentaires types

Afin de simplifier les opérations ainsi que les formules, certains signaux fréquemment rencontrés en traitement du signal disposent d'une modélisation propre. Il s'agit de :

Signal échelon unité ou Heaviside, le signal Porte, impulsion de Dirac, le signal sinusoidal et l'exponentielle complexe, l'exponentielle réelle, le signal rampe.

### V-1 Signal échelon unité ou fonction de Heaviside

Echelon unité noté  $u(t)$  ou  $\Gamma(t)$  est défini comme la primitive de impulsion de Dirac. Il permet l'étude des régimes transitoires des filtres.

$$u(t) = \Gamma(t) = \int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = \begin{cases} 1 & \text{si } t \geq 0 \\ 0 & \text{si } t < 0 \end{cases}$$

$$\frac{d\Gamma(t)}{dt} = \delta(t)$$

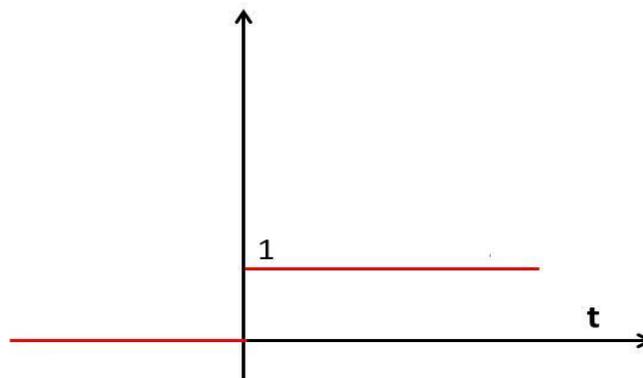


Figure 10

$u(t)$  permet aussi de rendre causal un signal  $s(t)$  [  $u(t).s(t)$  est nul si  $t < 0$  ]

### V-2 Signal Porte ou rectangle

- Le signal Porte ou rectangle noté  $\Pi_T(t)$  ou  $\text{Rect}_T(t)$  est un signal transitoire de durée  $T$  défini par:

$$\Pi_T(t) = \text{Rect}_T(t) = u\left(t + \frac{T}{2}\right) - u\left(t - \frac{T}{2}\right) = \begin{cases} 1 & \text{si } |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0 & \text{si } |t| > \frac{T}{2} \end{cases}$$

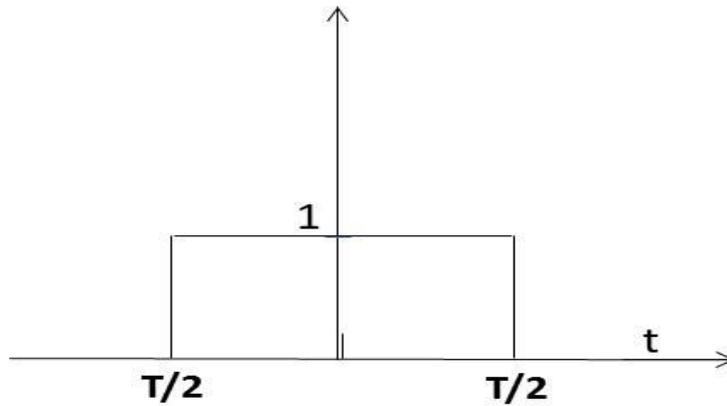


Figure 11

**Remarque :**

$S(t) = A\text{Rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right)$  : signal rectangulaire ou porte de durée  $T$  d'amplitude  $A$  et centrée en  $\tau$ .

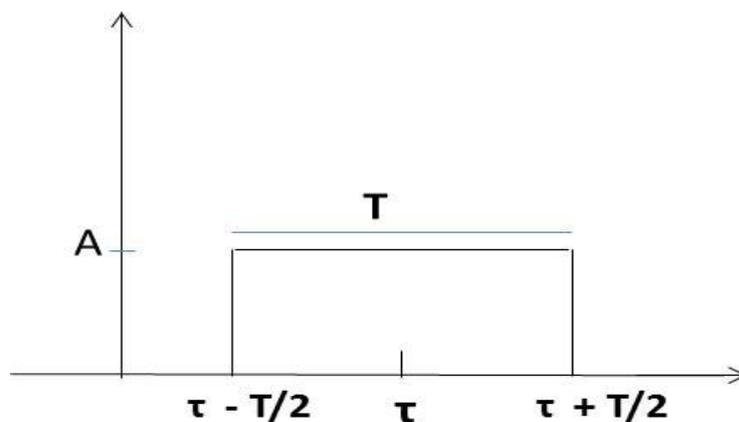


Figure 12

### V- 3 Impulsion ou pic de Dirac

- L'impulsion de Dirac notée  $\delta(t)$  est une limite de fonction. Elle est à manier avec beaucoup de précautions. Elle servira pour l'étude des spectres des signaux à énergie infinie. Elle correspond à une fonction porte dont la largeur  $T$  tend vers 0 et dont l'aire est égal à 1.

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{1}{\alpha} \Pi_{\frac{\alpha}{2}}(t) = 0 \quad t \neq 0$$

$$= \infty \quad t = 0$$

$$\delta(t) = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{1}{\alpha} \Pi_{\frac{\alpha}{2}}(t)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\alpha} \Pi_{\frac{\alpha}{2}}(t) dt = 1$$

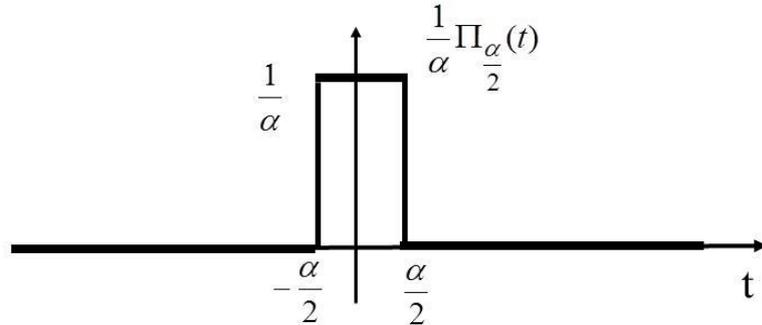


Figure 13

#### V-4 Signal sinusoïdal et l'exponentielle complexe

Le signal sinusoïdal est le signal de base des signaux mathématiques périodiques. Il représente la partie réelle ou imaginaire de l'exponentielle complexe.

$$x(t) = Ae^{j2\pi F_0 t + \varphi}$$

$$s(t) = A \cos(2\pi F_0 t + \varphi)$$

$$v(t) = A \sin(2\pi F_0 t + \varphi)$$

$$s(t) = \text{Re}(x(t))$$

$$v(t) = \text{Im}(x(t))$$

#### V-5 Signal exponentielle réelle décroissante :

Il s'exprime en utilisant  
l'échelon unité par:

$$s(t) = A u(t) e^{-a t}$$

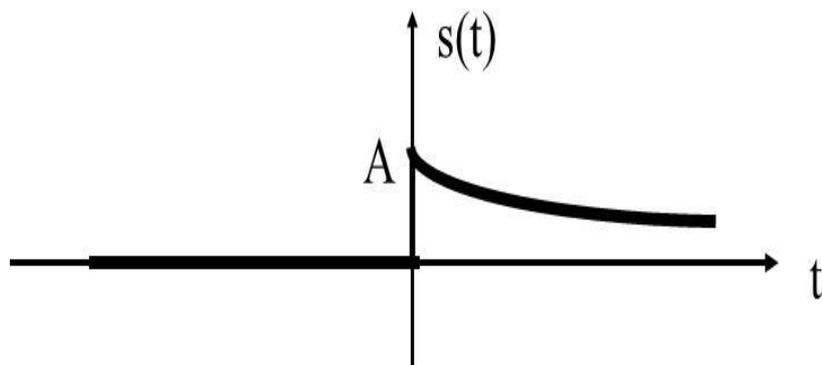


Figure 14

### V-6 Signal rampe

Le signal rampe unitaire noté  $r(t)$  est défini comme la primitive de l'échelon unitaire.

$$r(t) = \int_{-\infty}^t u(v) dv = \begin{cases} t & \text{si } t > 0 \\ 0 & \text{si } t \leq 0 \end{cases}$$

$$u(t) = \Gamma(t) = \int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = \begin{cases} 1 & \text{si } t \geq 0 \\ 0 & \text{si } t < 0 \end{cases}$$

$$\frac{dr(t)}{dt} = u(t) \text{ pour } t \neq 0$$



Figure 15

### V-7 Signal triangulaire

Il est défini par :

$$\text{tri}(t) = \begin{cases} 1 - |t| & \text{si } |t| < 1 \\ 0 & \text{si } |t| > 1 \end{cases}$$

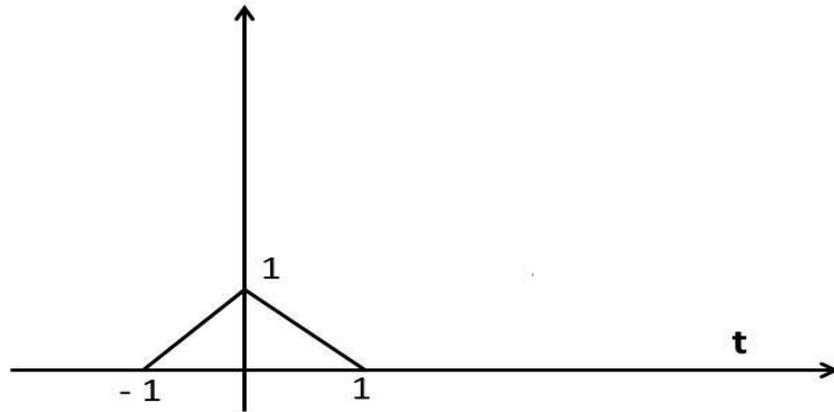


Figure 16

### V- 8 Peigne de Dirac

On définit le peigne de Dirac par la fonction « shah : lettre de l'alphabet russe » :

$$\text{III}_T(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT)$$

Il s'agit d'une distribution infinie de Dirac de période T (intéressante pour l'échantillonnage des signaux).

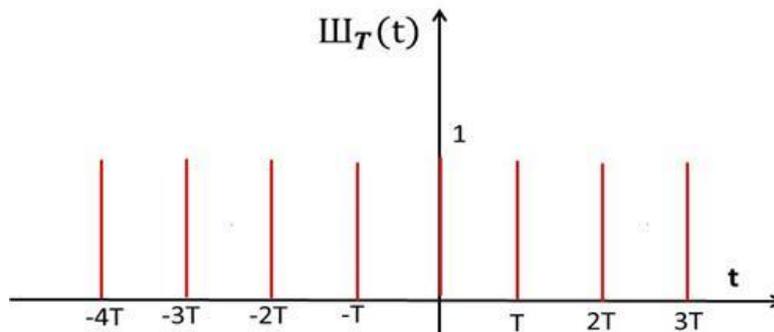


Figure 17

### V-9 La fonction signe

$$\forall x \in \mathbb{R}, \text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x < 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \\ 1 & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

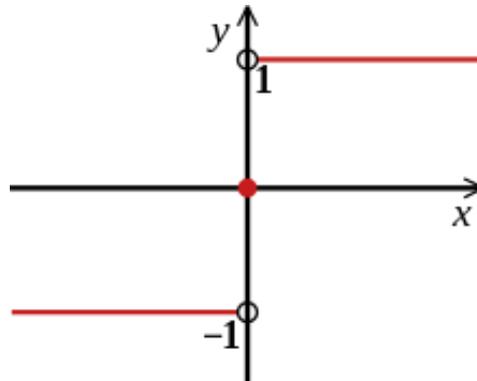
La fonction signe peut également s'écrire :

$$\forall x \in \mathbb{R}, \operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x = 0 \\ \frac{x}{|x|} \text{ ou } \frac{|x|}{x} & \text{si } x \neq 0 \end{cases}$$

Elle présente une discontinuité en 0, à la fois à gauche

(puisque  $\lim_{x \rightarrow 0^-} \operatorname{sgn}(x) = -1 \neq \operatorname{sgn}(0)$ ) et à droite

(puisque  $\lim_{x \rightarrow 0^+} \operatorname{sgn}(x) = 1 \neq \operatorname{sgn}(0)$ ).



**Figure 18**

## VI- Systèmes linéaires invariants dans le temps

- Un système est dit linéaire si : pour une entrée  $x_1(t)$ , on obtient une sortie  $y_1(t)$  et pour une entrée  $x_2(t)$ , on obtient une sortie  $y_2(t)$  alors pour une entrée  $a_1.x_1(t) + a_2.x_2(t)$ , on obtient en sortie  $a_1.y_1(t) + a_2.y_2(t)$

- Un système est invariant dans le temps si son comportement se reproduit de façon identique au cours du temps càd: si à une entrée  $x(t)$ , on obtient en sortie  $y(t)$  alors à l'instant  $(t-\tau)$ , on obtient la sortie  $y(t-\tau)$ .

- Un système est stable si à une entrée bornée correspond une sortie bornée.

### Exemples :

Les filtres sont des systèmes linéaires invariants dans le temps.