DOCUMENT RESSOURCE

Chaîne de traitement numérique du signal
—Chaîne d'information—

Lycée du Hainaut
Deuxième année – Filière TSI (2TSI)
2022-2023

Plan

Introduction

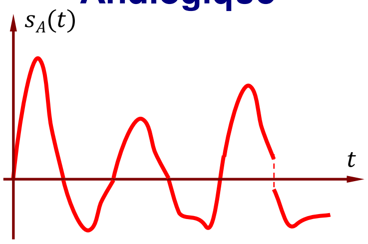
Introduction
Conversion analogique–numérique
Conversion numérique-analogique
Annexe - Précisions sur certains outils

Du continu au discret

Les informations sont portées par des signaux...

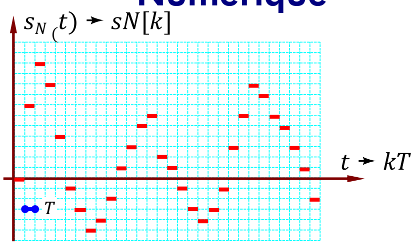
Ces signaux peuvent être caractérisés par leur nature

Analogique



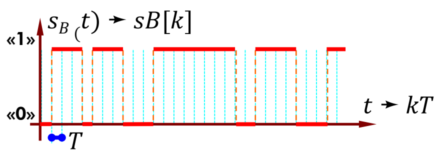
Le temps évolue continûment,
Comme les valeurs du signal :
C'est une fonction « classique »

Numérique



Le temps est discrêt (évolue par sauts),
comme les valeurs du signal :
temps et signaux sont des suites

Binaire



Cas particulier des signaux
numériques : le signal prends
deux valeurs, « 0 » ou « 1 »

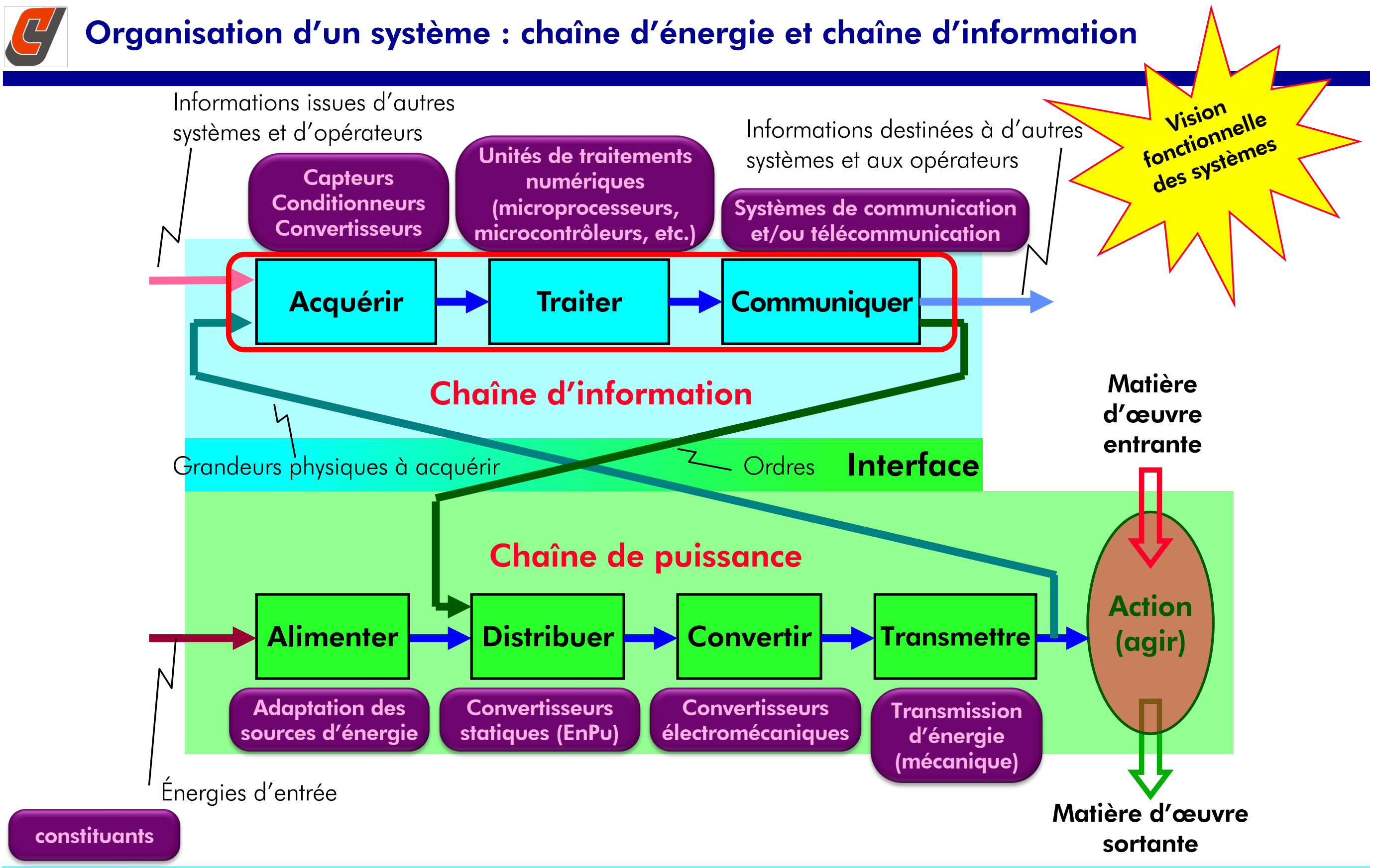
Il est est souvent nécessaire de passer d'une forme de signal à l'autre

Conversion analogique numérique (CAN) →

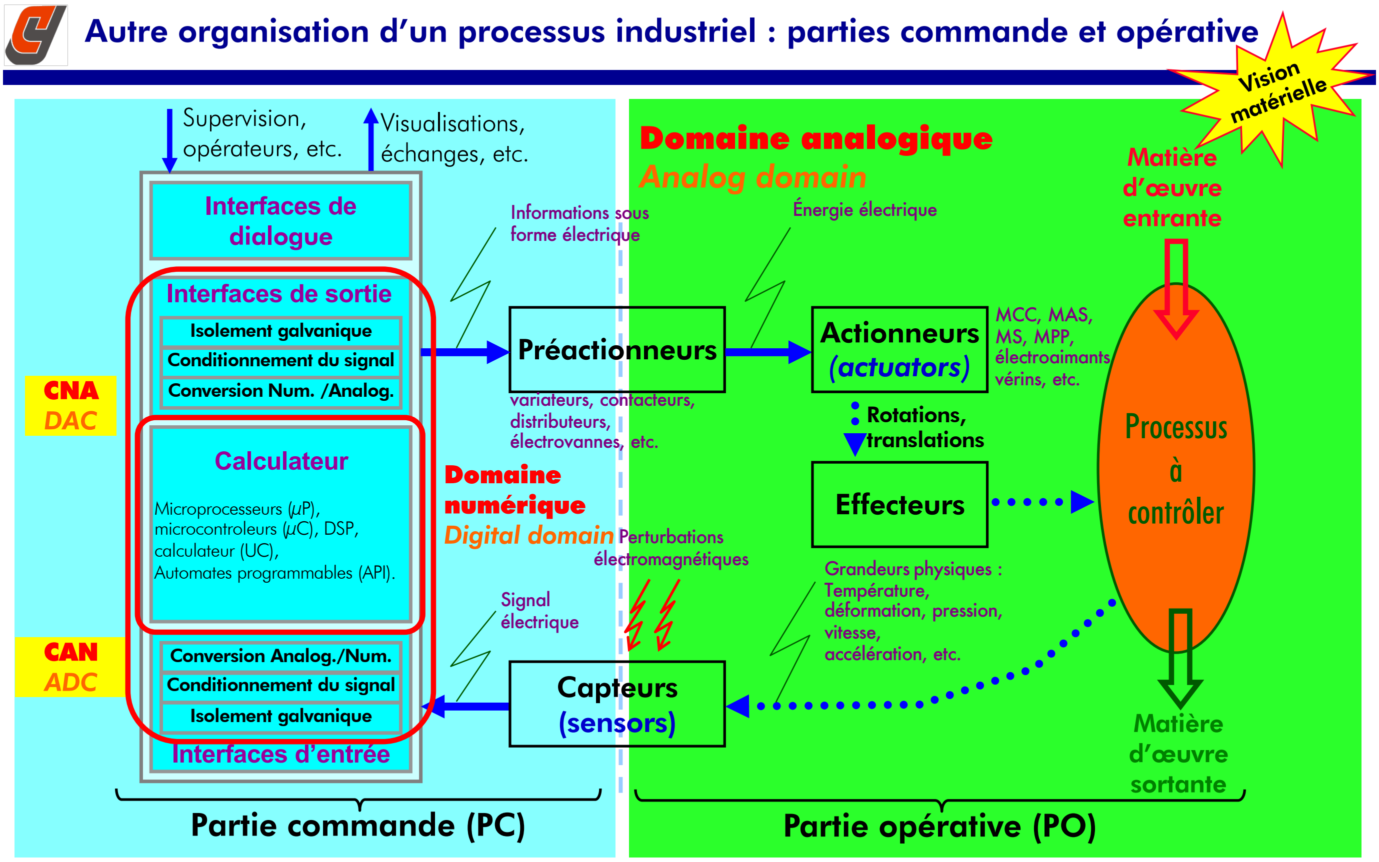
← **Conversion numérique analogique (CNA)**

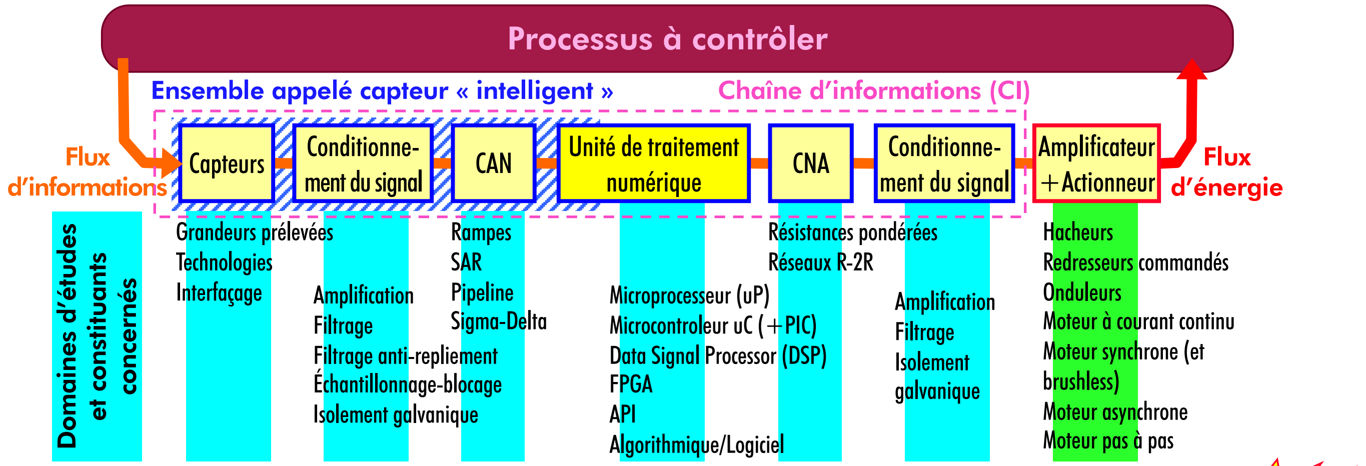
L'étude concerne des chaînes d'information utilisant ces deux formes des signaux

Organisation d'un système : chaîne d'énergie et chaîne d'information



Autre organisation d'un processus industriel : parties commande et opérative





Démarche assurant le passage du domaine analogique au domaine numérique

Vue globale

- Préparer le signal : conditionnement analogique par filtrage fréquentiel
- Assurer le découpage temporel du signal (discrétisation) : échantillonnage
- Maintenir le signal constant pendant la conversion : blocage
- Utiliser un format numérique adapté (taille des données) : quantification

Le retour dans le domaine analogique est moins contraignant

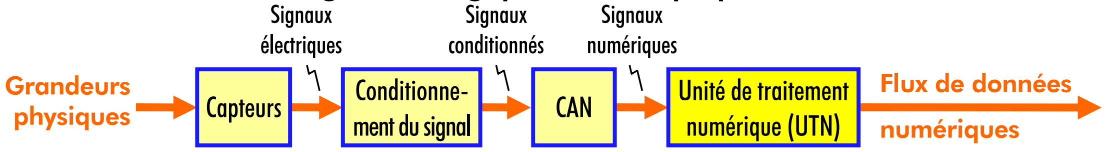
- La procédure est plus simple : conversion directe et conditionnement (filtrage le + souvent)

Conversion analogique-numérique

Chaîne de pré-traitement : la préparation du signal avant la conversion A→N

La chaîne de pré-traitement numérique

- **Passer du domaine analogique au domaine numérique**
  - Le convertisseur analogique-numérique (CAN) assure cette modification
- **Avant la conversion, le signal analogique doit être préparé**



Aperçu des trois étapes de conditionnement du signal analogique

- **Adapter le signal en fréquence (filtrage) et en niveau (amplification)**
- **Échantillonner le signal : discrétisation temporelle consistant à prélever sa valeur à intervalles réguliers sous l'action d'une horloge d'échantillonnage à fréquence f_e fixée**
- **Maintien du niveau du signal constant durant la conversion en entrée du CAN**

Après cela, le CAN permet de passer du domaine analogique au domaine numérique

- **Discrétisation du niveau du signal à une valeur numérique entière**
- **En imposant la taille de représentation de cette valeur numérique (quantification)**

Au delà, des traitements complémentaires sont effectués numériquement (hors CAN)

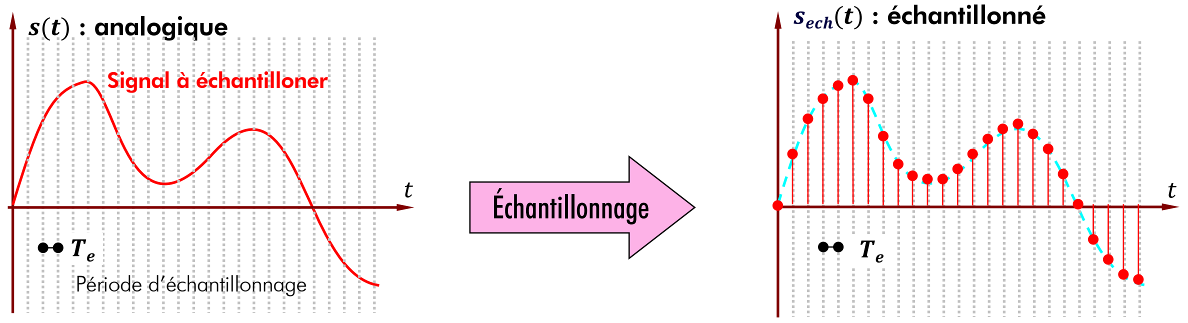
- **L'unité de traitement peut effectuer des calculs et des évaluations supplémentaires**

Étape 1 – Prélever le signal : échantillonnage

Objectif : prélever la valeur « instantanée » du signal

- **Tout en s'affranchissant des défauts de l'opération**

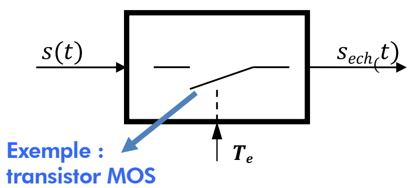
Illustration de l'échantillonnage (to sample=échantillonner)



- **En pratique : la durée d'échantillonnage τ est non nulle et $\tau \ll Te = 1/f_e$**

Représentation de l'échantillonneur (*sampler* en anglo-américain)

D33



D32

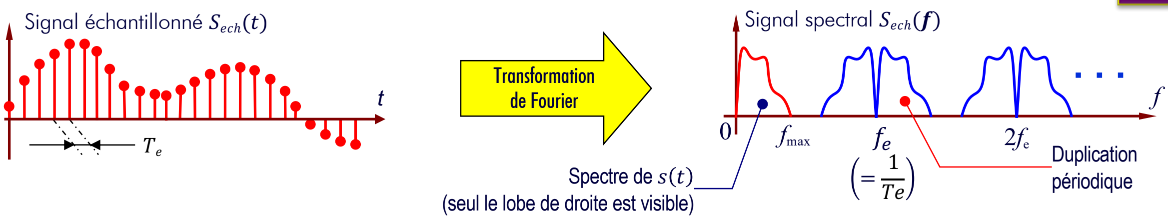
Remarque

L'échantillonnage dans le domaine temporel est le résultat du produit la fonction $s(t)$ par le peigne de Dirac $\delta_{Te(t)}$: c'est **une modulation d'amplitude**

Spectre du signal échantillonné

- **L'opération d'échantillonnage est une modulation**
  - $s(t)$ est le signal modulant ; la porteuse est le peigne de Dirac δ_{Te}
- **Illustration de l'échantillonnage**

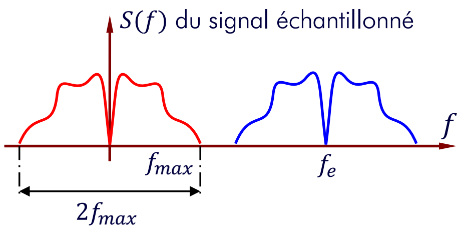
D30



- **Le spectre du signal échantillonné est composé :**
  - Du spectre de $s(t)$ tronqué de 0 à f_{max} (lobe de droite) et du spectre miroir (lobe de gauche)
  - De la duplication de ces spectres (entre $-f_{max}$àf_{max}) aux multiples de $f_e = 1/T_e$
  - Le premier spectre a donc pour largeur $2f_{max}$
  - Le spectre complet de $s_{ech}(t)$ est périodique de période f_e

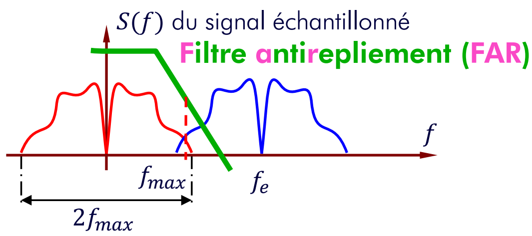
À fréquence d'échantillonnage f_e donnée

- **Cas 1 : spectres sans chevauchement**



- **Situation quand la fréquence d'échantillonnage est suffisante**

- **Cas 2 : spectres se chevauchant**



- **Fréquence d'échantillonnage trop faible**
- **CSQ : le spectre est trop étendu**

Conclusion

- **La fréquence d'échantillonnage est satisfaisante si :**

$$f_e - f_{max} > f_{max} \text{ ie } f_e > 2f_{max}$$

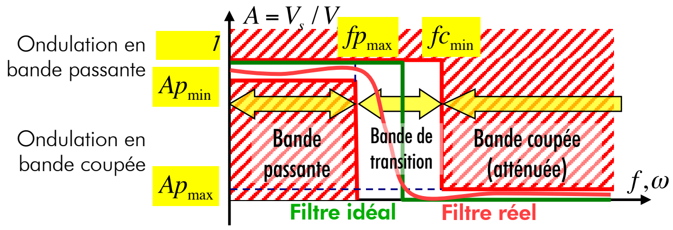
Résultat connu sous le nom de condition de Nyquist-Shannon

Remède

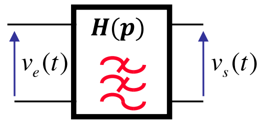
- **Limiter f_{max} pour éviter le chevauchement**
- **Placer un filtre passe-bas avant l'échantillonneur : filtre anti repliement (ou FAR)**
  - Antialiasing filter or AA-filter in english
- **Ex : filtres de Butterworth (D suivante)**

Quelques éléments sur les filtres passe bas de Butterworth [Biblio D35]

Gabarit du filtre



Notations



Fonction de transfert

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{\underline{V}_s(j\omega)}{\underline{V}_e(j\omega)}$$

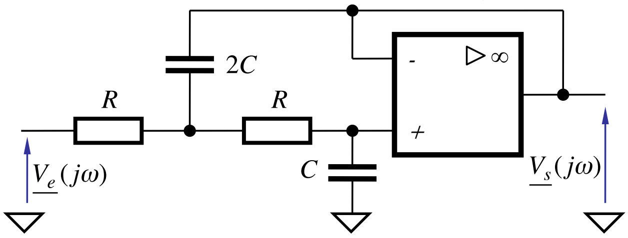
Propriétés des filtres de Butterworth : filtres linéaires dont le gain est le plus constant dans la bande passante (propriété associée : « maximalement plat »)

FT des filtres passe bas de Butterworth

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{1}{\underline{B}_n(j\omega)} \text{ tel que } |\underline{H}(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}}$$

- **Exemples** : $u = j\omega/\omega_c$ $\quad \underline{H}_1(u) = 1 + u$ $\quad \underline{H}_2(u) = u^2 + \sqrt{2}u + 1$ $\quad \underline{H}_3(u) = (u+1)(u^2 + u + 1)$

Exemple : structure de filtre d'ordre 2 (ordres plus élevés en associant ces cellules)



$$\text{gain : } H_0 = 1$$

$$\text{coefficient d'amotissement : } z = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

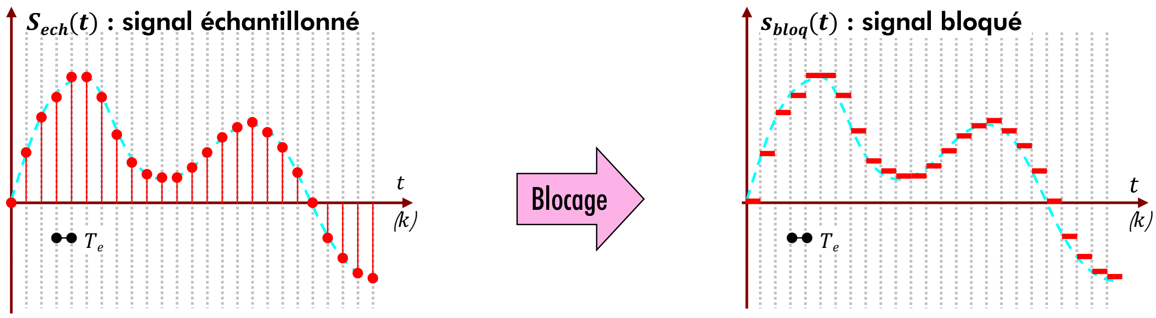
$$\text{pulsation de coupure: } \omega_c = \frac{1}{\sqrt{2}RC}$$

Étape 2 – Blocage (de la valeur prélevée) du signal

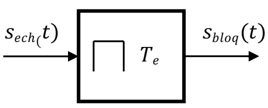
Objectif : maintenir constante la valeur échantillonnée du signal

- **Le signal constant permet au CAN d'effectuer la conversion en numérique**

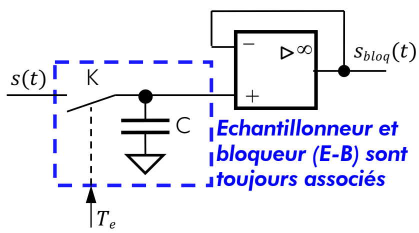
Illustration du blocage



Fonction de blocage (to hold)

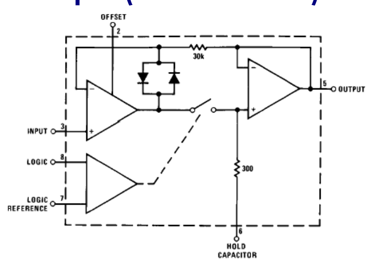


Structure de principe

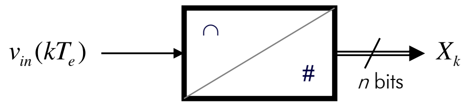


Echantillonneur et bloqueur (E-B) sont toujours associés

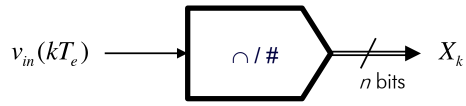
Exemple (circuit LF 198)



Symboles fonctionnels du CAN

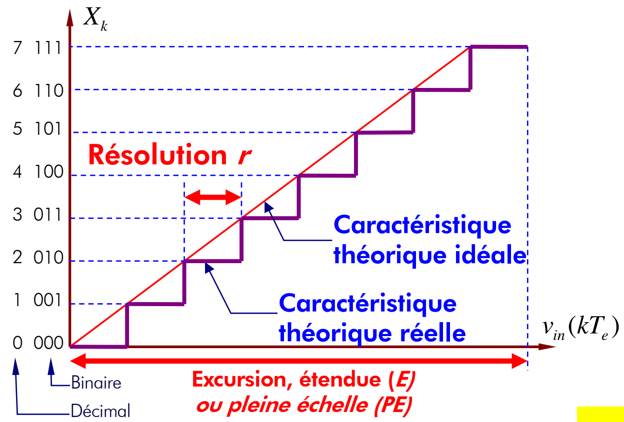


ou



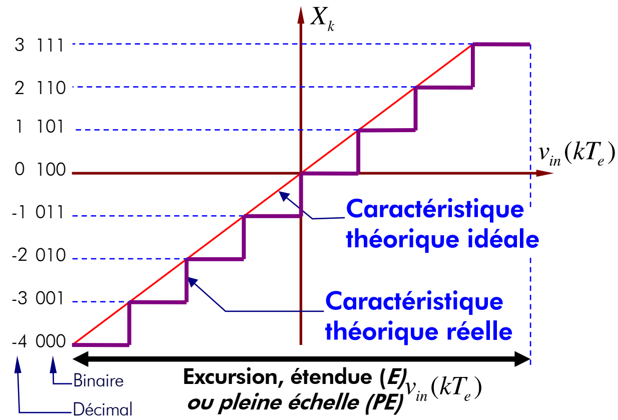
Couramment : n=8, 12, 14, 16, 18, 22, 24, (26) bits

Caractéristiques de transfert



CAN unipolaire

$$r = \frac{E}{2^n}$$



CAN bipolaire

Contrainte : associer à l'échantillon une valeur (souvent entière) dans un ensemble discret

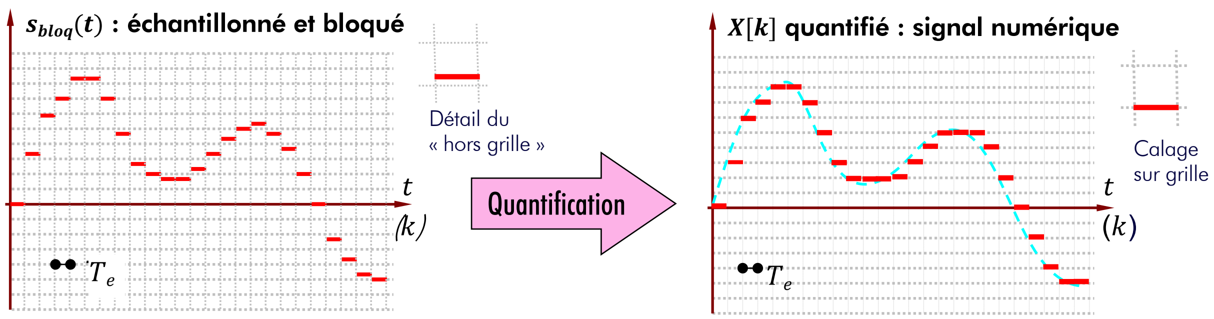
- **Le nombre de valeurs que le CAN peut représenter est fini (2^n valeurs)**
- **L'association d'une valeur réelle à une valeur discrète est appelée « quantification »**

Remarques

D28

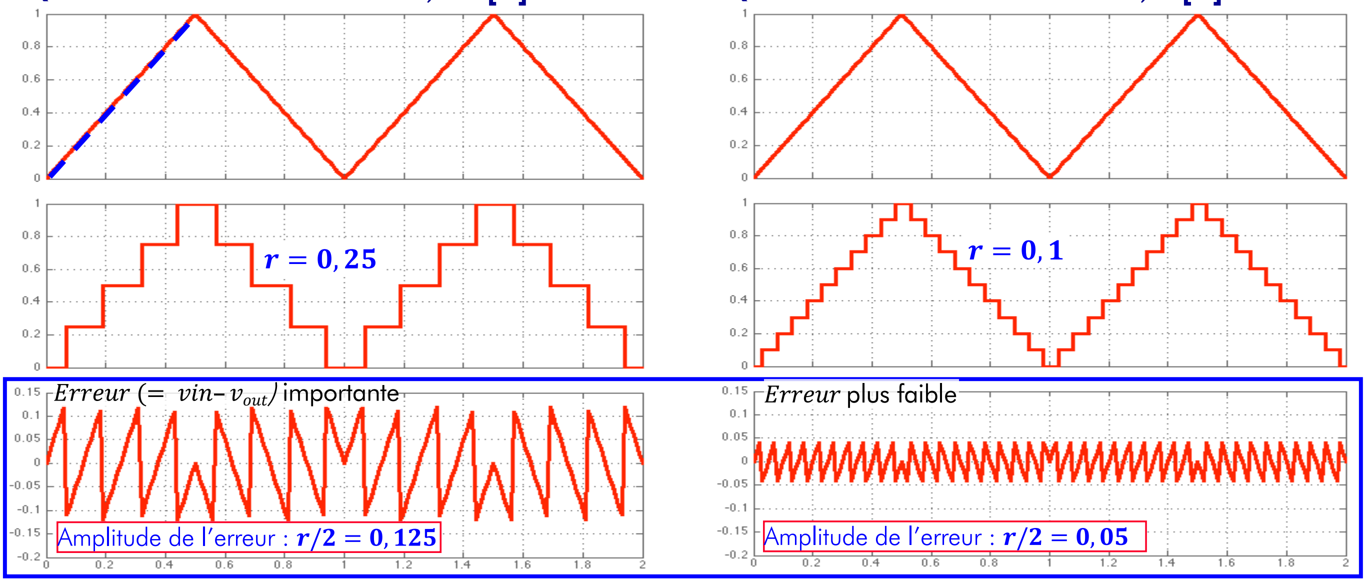
- **Les CAN utilisent un codage comportant deux symboles binaires, 0 et 1**
  - Pour des échantillons codées sur n bits, la quantification a lieu sur 2^n valeurs
- **En transmission, le codage utilise d'avantage de « symboles » (4, 8, etc.)**
  - Ce procédé rend le codage plus dense : ceci permet d'augmenter le débit

Illustration de la quantification



Étape 3 – Quantification et erreur (de quantification)

Quantification forte : $r = 0,25$ [V] — Quantification faible : $r = 0,1$ [V]



Le **bruit de quantification** est un signal de perturbation superposé au signal à convertir :

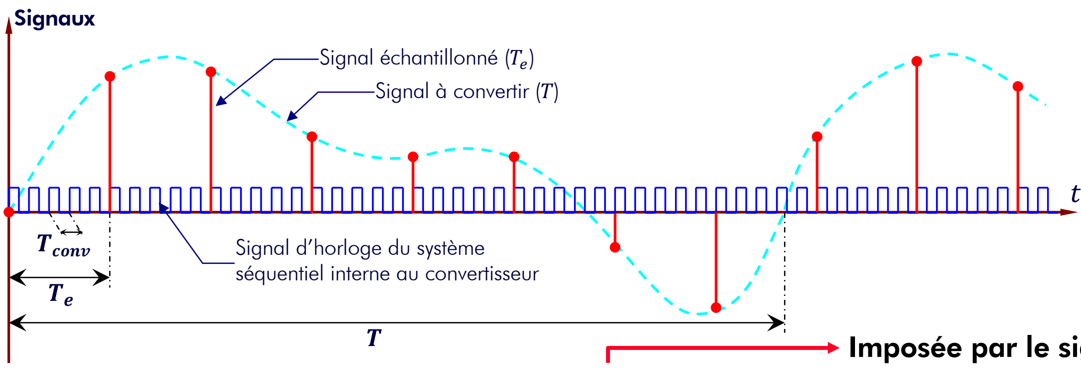
- Il est confronté au signal « utile » (sans cette perturbation), soit en **amplitude maximale** ou alors en **valeur efficace**
- Caractérisation par le **rapport signal/bruit**, noté S/B : **S/B=Amplitude signal/Amplitude bruit** ou **S/B_{dB}=20log(S/B)**
- **Valeurs courantes** : de 60 à 120 dB. S/B permet de définir la **résolution** *'r'* et la **taille du CAN** *'n'* en bits

Bilan – Répartition de la fréquence des signaux dans la conversion A/N

Pour information et pour une vision générale

Dans un CAN, plusieurs signaux cohabitent

- **Le signal à convertir, de période T (fréquence $1/T$) s'il est périodique**
- **Le signal échantillonné, de période T_e (fréquence $1/T_e$)**
  - Cadence imposée par la rapidité des phénomènes (condition de Shannon-Nyquist)
- **Le signal d'horloge, de période T_{conv} pour le système séquentiel dans le convertisseur**
  - Signaux d'horloge des constituants séquentiels compteurs, registres, séquenceurs, etc.

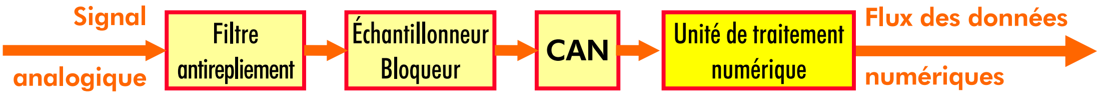


Imposée par le signal à traiter

$f < f_e < f_{conv}$ ou $T > Te > T_{conv}$

Commande de l'E/B — **Commande du CAN**

Constitution détaillée de la chaîne de pré-traitement avant la conversion

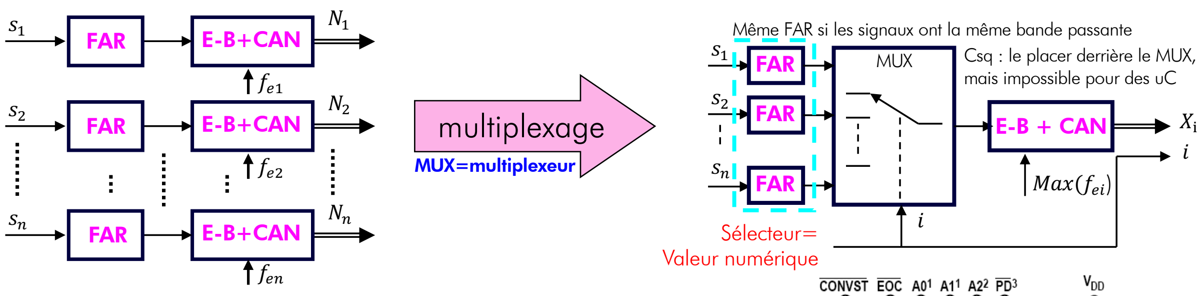


Que quoi dispose-on en sortie du CAN ?

- **Le CAN délivre un nombre codé sur n bits à chaque période T_e**
- **La succession de ces valeurs constitue un flux de données numériques**
  - Suite de valeurs notées $X[k]$ ou $\{X_k\}$
- **Ce flux est imposé au calculateur :**
  - La durée de traitement par échantillon doit rester inférieure à T_e
- **Cette cadence fixe la fréquence d'horloge du calculateur (puisque c'est un système séquentiel)**
  - Et dans une moindre mesure la taille des données traitées : 8, 16, 32 bits (la durée globale de traitement est d'autant moins importante que la taille des mots numériques est élevée)

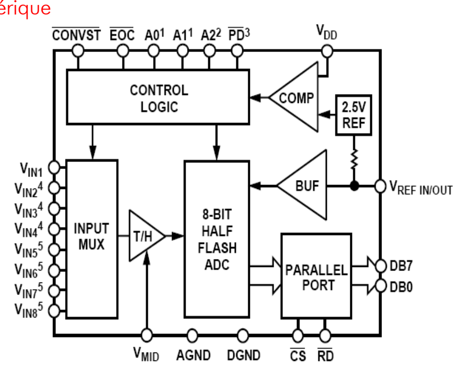
Souvent, la chaîne numérique comporte plusieurs signaux à numériser

- **Un convertisseur par signal : solution inadaptée, même pour différentes bandes passantes**
- **Pour adapter le coût : usage d'un seul CAN et plusieurs entrées analogiques multiplexées**



Exemple de composant : famille AD782x (Analog Devices)

- **Taille des sorties numériques : 8 bits**
- **8 entrées**
- **Interfaçage microprocesseur**



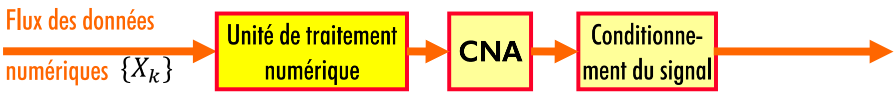
[1]A0, A1	AD7825/AD7829
[2]A2	AD7829
[3]PD	AD7822/AD7825
[4]V_{IN2} TO V_{IN4}	AD7825/AD7829
[5]V_{IN5} TO V_{IN8}	AD7829

Conversion numérique-analogique

Chaîne post-traitement : retour à l'analogique et conditionnement du signal

Après le traitement numérique : deux opérations restent à effectuer

- **Passer du domaine numérique à l'analogique avec un CNA**
- **« Nettoyer » le signal analogique des perturbations de la conversion**



Le convertisseur numérique–analogique (CNA)

- **Assure la conversion des valeurs numériques du signal traité**
- **À la cadence de l'échantillonnage (cadence imposée par la chaîne numérique)**

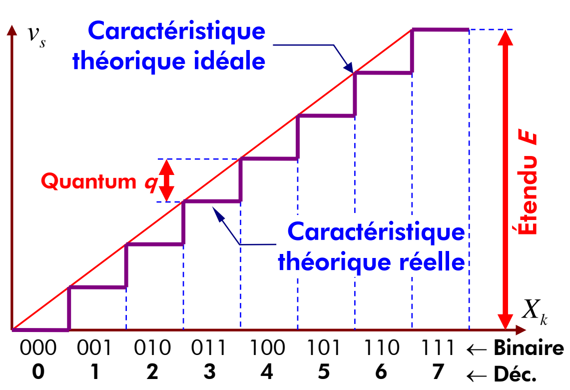
Le conditionnement du signal

- **Le signal analogique comporte du bruit de conversion**
  – Un filtrage est nécessaire
- **La plage de conversion du CNA impose le niveau du signal analogique de sortie**
  – Une amplification du signal est, a priori, inutile

Convertisseurs numérique-analogique (CNA) en bref : caractéristiques

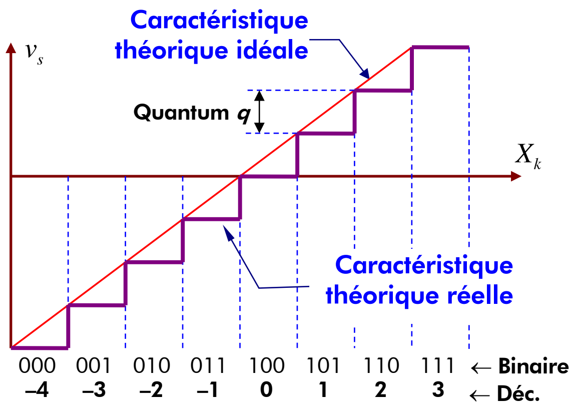
Symboles fonctionnels

Caractéristiques de transfert



$$q = \frac{E}{2^n - 1} \approx \frac{E}{2^n}$$

$$v_s(t) = q\{X_k\}$$

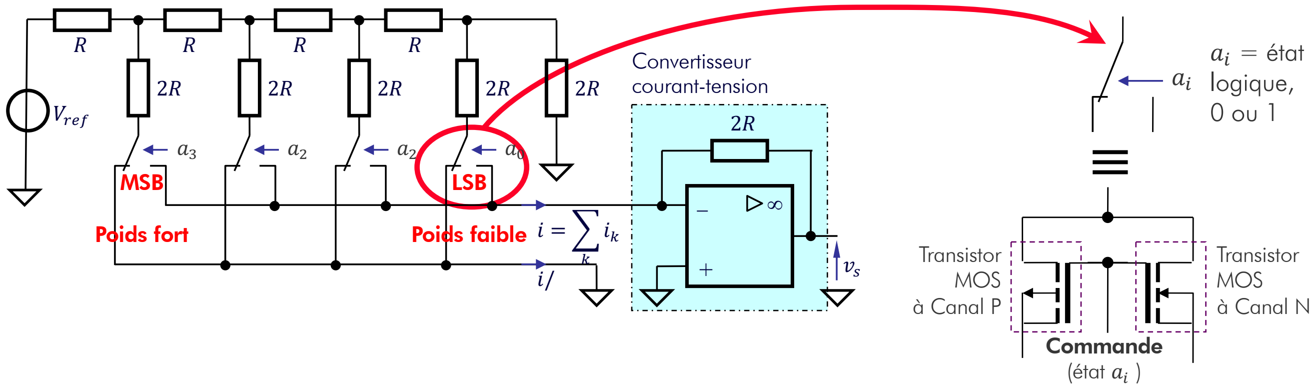


CNA unipolaire **CNA bipolaire**

Convertisseurs numérique-analogique : structure à réseau R-2R

Structure

Réalisation des interrupteurs



Tension de sortie

- $v_s = -\dfrac{V_{ref}}{2^n}\displaystyle\sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i$
- avec $X = \displaystyle\sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i$ la valeur convertie

Avantages

- **Structure simple et modulaire**
- **Pas de dispersion des valeurs**

Inconvénient

- **Structure dissipative (R et $2R$)**
- **L'emploi de diviseurs capacitifs réduit cet inconvénient**

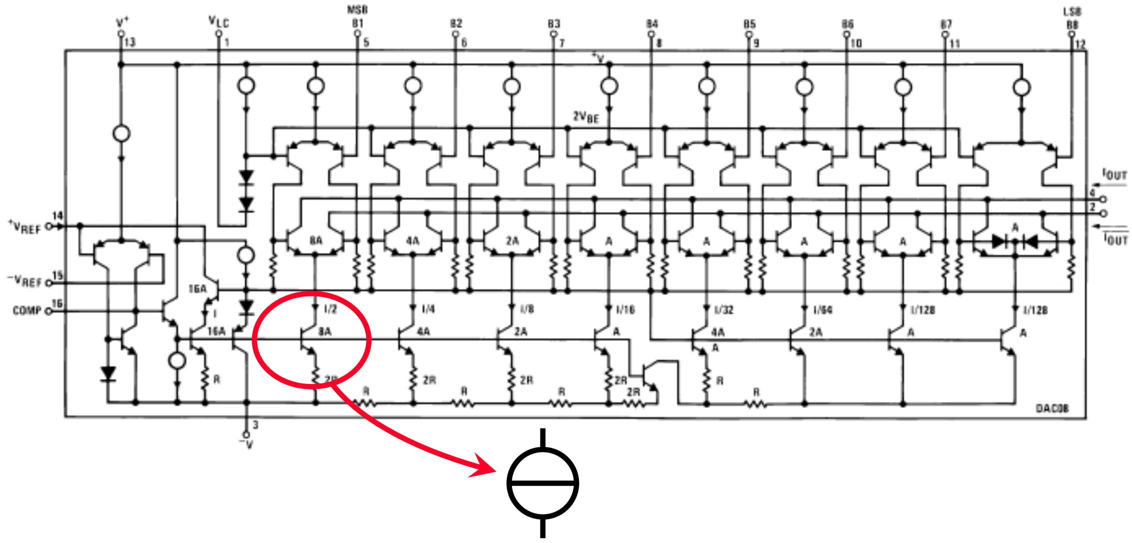
Convertisseurs numérique-analogique : réseau R-2R, solution intégrée

Variante de réseau R-2R :

- Courants pondérés
- Exemple du DAC80x de National Semiconductor

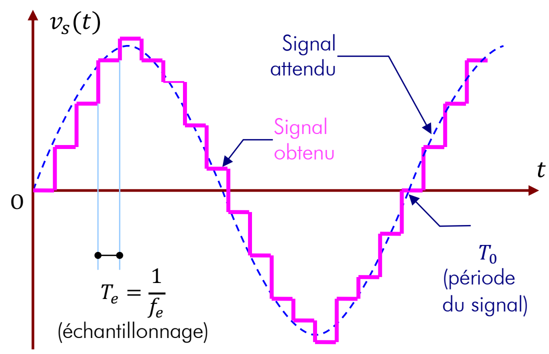
Mise en place de sources de courant dans chaque branche contributive

- Ce sont des courants pondérés, solution qui permet une meilleure précision

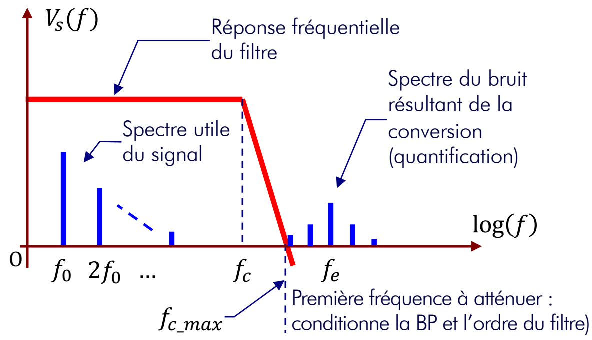


Convertisseurs numérique-analogique : traitement post-conversion

Représentation temporel



Représentation fréquentielle



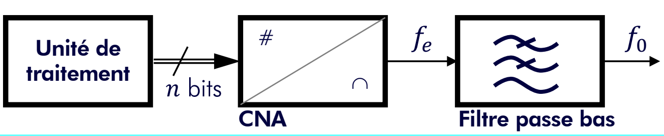
Signal analogique bruité

- Par la conversion N/A
- Remède : insérer un filtre passe bas
- Fréq. de coupure : $m \cdot f_0 < f_c < f_e$

Type de filtre employé

- Réponse de Bode très «plate» en bande passante
- Coupure nette, abrupte : ordre élevé
- Filtre de Butterworth (ordre 4 à 8)

Chaîne de conversion complète ▶



D13

Annexe
Précisions sur certains outils

Introduction
Conversion analogique–numérique
Conversion numérique-analogique
Annexe - Précisions sur certains outils

Représentation et codage des informations numériques (Cf. : cours d'informatique)

Détails dans les ressources Moodle et dans le cours d'informatique de sup

Dans les systèmes numériques, les informations sont codées en binaire

- **Base 2, base décimale (10) et hexadécimale (16, notées H ou $)**

Plusieurs codages des nombres coexistent

- **Représentation ou codage naturel**
  - – Le code pondéré (ex. $13_{10}=1.2^3+1.2^2+0.2^1+1.2^0=1101_2$)
  - – « Poids » binaires : 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048,etc.
- **Extension aux nombres négatifs (codage signé)**
  - N'est pas utilisé car ne permet pas les calculs
  - – Code décalé : translation de la table des nombres naturels (Cf. tab. suiv.)
    - Signe = bit de poids fort (BPF) ou *Most Significant Bit* (MSB) : « 1 » = positif et « 0 » = négatif
  - – Code complément à 2 : codage « compatible » avec l'addition des positifs
    - Signe : MSB=« 1 » pour les négatifs et MSB=« 0 » pour les positifs
    - –N=Cplt2(N)=cplt1(N)+1=N/+1 (N/ signifie « N barre »)
      - Ex1 : –8=cplt1(1000)+1=0111+1, donc –8 est codé 1000
      - Ex2 : –1=cplt(0001)+1=1110+1=1111 (autres essais sur calculatrice)
    - Attention : taille de représentation des mots binaires fixée, 4, 8, 16, 32, etc.
  - – Avec ce codage, les additions et les soustractions sont effectuées de la même manière (somme de l'opposé), comme pour les entiers positifs
- **Codage des nombres à virgule totalement différente (fixe ou flottante)**

D16

Synthèse : table des modes de codage des informations numériques

D16

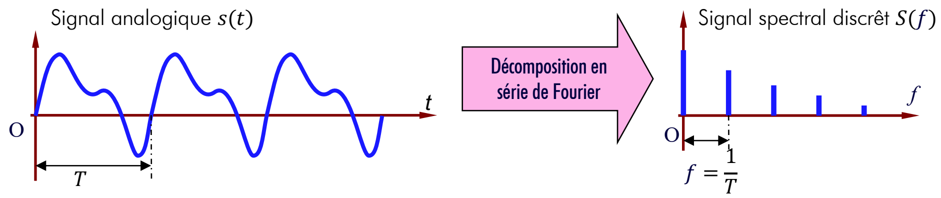
Fraction de la pleine échelle PE	Valeurs correspondantes pour une pleine échelle de 10 V de – 5 à + 5 V	Binaire décalé	Binaire décalé complémenté	Complément à 2	Binaire signé
+ PE/2 – 1 LSB	+ 4,997 6	1111 1111	0000 0000	0111 1111	1111 1111
+ (3/4) PE/2	+ 3,750 0	1110 0000	0001 1111	0110 0000	1110 0000
+ (1/2) PE/2	+ 2,500 0	1100 0000	0011 1111	0100 0000	1100 0000
+ (1/4) PE/2	+ 1,250 0	1010 0000	0101 1111	0010 0000	1010 0000
0^+	0,000 0	1000 0000	0111 1111	0000 0000	1000 0000 (1)
0^-	0,000 0	1000 0000	0111 1111	0000 0000	0000 0000 (1)
– (1/4) PE/2	– 1,250 0	0110 0000	1001 1111	1110 0000	0010 0000
– (1/2) PE/2	– 2,500 0	0100 0000	1011 1111	1100 0000	0100 0000
– (3/4) PE/2	– 3,750 0	0010 0000	1101 1111	1010 0000	0110 0000
– PE/2 + 1 LSB	– 4,997 6	0000 0001	1111 1110	1000 0001	0111 1111
– PE/2	– 5,000 0	0000 0000	1111 1111	1000 0000	pas de code

(1) En binaire signé, il y a deux codes pour représenter zéro : 1000 0000 pour 0^+ et 0000 0000 pour 0^-, et pas de code pour – PE/2.

Réf. Les techniques de l'ingénieur

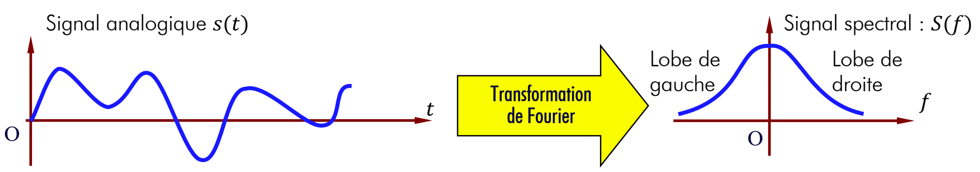
Deux domaines induisant deux modes de représentation des signaux périodiques :

- **En temporel par son chronogramme $s(t)$ où le temps évolue continûment ;**
- **En fréquentiel par son spectre $S(f)$ (c'est une fonction « discrète » de la fréquence)**
  - Ce spectre est issu de la **décomposition en série de Fourier**



Un signal non-périodique peut aussi être représenté dans ces deux domaines :

- **En temporel où le chronogramme ne se répète pas (aucune périodicité)**
- **Fréquentiel par son spectre continu $S(f)$ où la fréquence évolue continûment**
  - Ce spectre est issu de la **transformation de Fourier**



D11

Deux opérations mathématiques

- **Décomposition en série de Fourier**
  - Expression de l'amplitude complexe des harmoniques ou leur module (S_n) et leur phase (φ_n)
  - La représentation graphique est un **spectre de raies**
- **Transformation de Fourier**
  - Expression de la fonction complexe $S(f)$
    la représentation graphique est un **spectre continu**

Décomposition en série de Fourier (rappel)

$$s(t) = \langle s(t) \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad \text{avec} \quad a_n = \frac{2}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} s(t)\cdot\cos(n\omega t)\,\mathrm{d}t$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} s(t)\cdot\sin(n\omega t)\,\mathrm{d}t$$

ou $S_n(f) = \frac{1}{T}\int_{(T)} s(t) e^{-j2\pi nft}\,\mathrm{d}t$

$$S_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad et \quad \phi_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

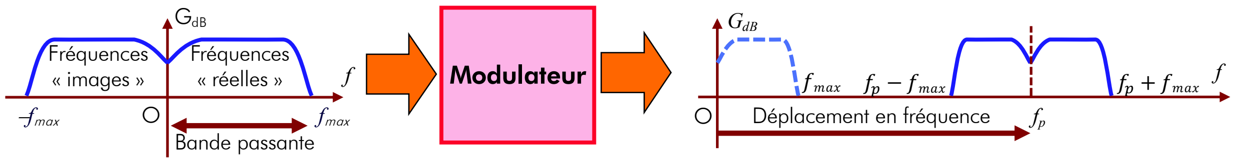
Transformation de Fourier

- **Le résultat de la transformation donne un spectre continu en fréquence**

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft}\,\mathrm{d}t$$

D11

Modulation : c'est le déplacement fréquentiel d'un signal

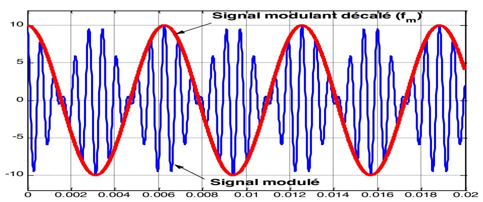


Spectre de $s(t)$ en entrée **Spectre de $s_m(t)$ autour de f_p**

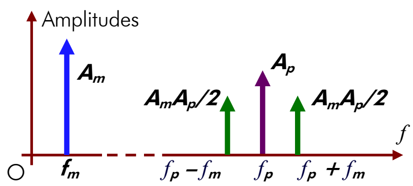
Modulation d'amplitude : cas d'un signal sinusoïdal

- **Signal modulant :** $s(t) = A_m \cos(\omega_m t)$
- **Signal porteur (porteuse) :** $s_p(t) = A_p \cdot \cos(\omega_p t)$
- **Signal modulé :** $s_m(t) = \frac{A_m A_p}{2}\left(\cos\left[\left(\omega_p - \omega_m\right)t\right] + \cos\left[\left(\omega_p + \omega_m\right)t\right]\right)$

Représentation temporelle



Représentation fréquentielle

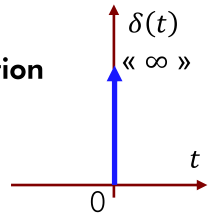


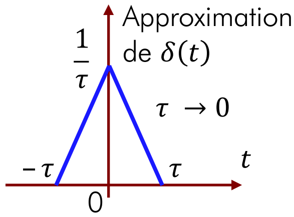
D10

Bilan : la modulation d'amplitude = produit des signaux qui se traduit par une translation de fréquence du spectre

Distribution de Dirac, dénommée abusivement « fonction de Dirac »

- **Fonction δ : « valeur infinie » en 0 et de valeur nulle partout ailleurs**
- **Sur $\mathbb{R}$, intégrale finie : $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt = 1$**
- **Approximation de δ possible par une fonction**
- **<u>Remarque</u> :**
  la fonction δ s'apparente à la dérivé de la fonction échelon

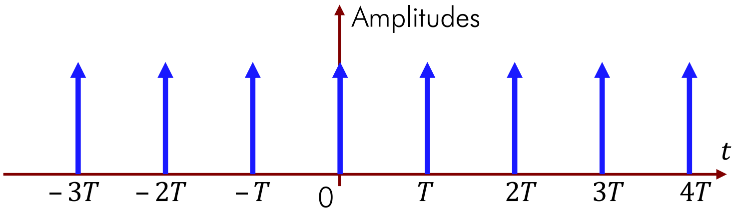




Peigne de Dirac

- **La distribution « peigne de Dirac » est obtenue par sommation de distributions de Dirac**
- **Ces distributions sont espacées des durées T**

$$\delta_T(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT)$$



D10

- **Elle est aussi appelée « fonction » sha Ш(t) (lettre Ш provenant de l'alphabet cyrillique)**

Références

- Prévot Claude, *Conversions analogique-numérique et numérique-analogique (part.1)*, Les techniques de l'ingénieur, traité E370.
- Prévot Claude, *Conversions analogique-numérique et numérique-analogique (part.2)*, Les techniques de l'ingénieur, traité E371.
- Prévot Claude, *Conversions analogique-numérique et numérique-analogique (part.3)*, Les techniques de l'ingénieur, traité E372.
- Wikipédia
  - http://fr.wikipedia.org/wiki/Distribution_de_Dirac
  - http://fr.wikipedia.org/wiki/Peigne_de_Dirac
  - http://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_numérique_du_signal
  - http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre_de_Butterworth
  - http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_d%27%C3%A9chantillonnage_de_Nyquist-Shannon
  - http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Analogique-Numérique
  - http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_numérique-analogique
  - http://fr.wikipedia.org/wiki/Fenêtrage

Fin de « Chaîne de traitement numérique du signal »

Avez-vous des questions ?