

CFMS

Conversion numérique et formats asynchrones 1

Nicolas Sturmel, 7 Février 2022

- Conversion A/N
- Théorème de Nyquist
- Bruit d'échantillonnage
- Caractéristique d'un convertisseur
- Conversion N/A

A la fin du cours l'élève doit:

- savoir pourquoi on numérise les sons
- Expliquer le choix d'une fréquence d'échantillonnage
- calculer le bruit d'un convertisseur A/N et N/A
- donner le schéma d'un convertisseur
- connaître les valeurs typiques d'un convertisseur en Audio
- pouvoir expliquer l'aliasing ou recouvrement spectral

Conversions analogique - numérique et numérique - analogique.

I. Introduction.

Le monde physique est perçu via des signaux analogiques (température, pression, et donc ondes sonores) qui peuvent être traités par des systèmes analogiques.

La fin du 20eme siècle a vu naître une nouvelle manière de représenter ces signaux, les signaux numériques.

Le recours au numérique permet en effet un stockage aisément de l'information, une excellente reproductibilité des traitements, la possibilité de développer relativement aisément des fonctionnalités complexes, une réduction des coûts de production, etc.

L'interface nécessaire entre le monde analogique et un traitement numérique donné est réalisé par des convertisseurs analogique – numérique (CAN, ou ADC pour *Analog to Digital Converter* en anglais) et numérique – analogique (CNA, ou DAC pour *Digital to Analog Converter*). Le rôle d'un CAN est de convertir un signal analogique en un signal numérique pouvant être traité par une logique numérique, et le rôle d'un CNA est de reconvertisir le signal numérique une fois traité en un signal analogique.

Definitions:

Signal analogique : signal continu en temps et en amplitude.

Signal numérique : signal échantillonné et quantifié, discret en temps et en amplitude.

Questions:

Citer des instruments de travail du technicien du son et dire si ils sont analogiques, numériques ou les deux.

I.1 Les premiers enregistreurs numériques:

Denon DN-023 PCM : 8 track, 13 bits en 1972



Puis, un autre exemple avec l'ADAT en 1991 - 8 pistes, 16 bits sur VHS

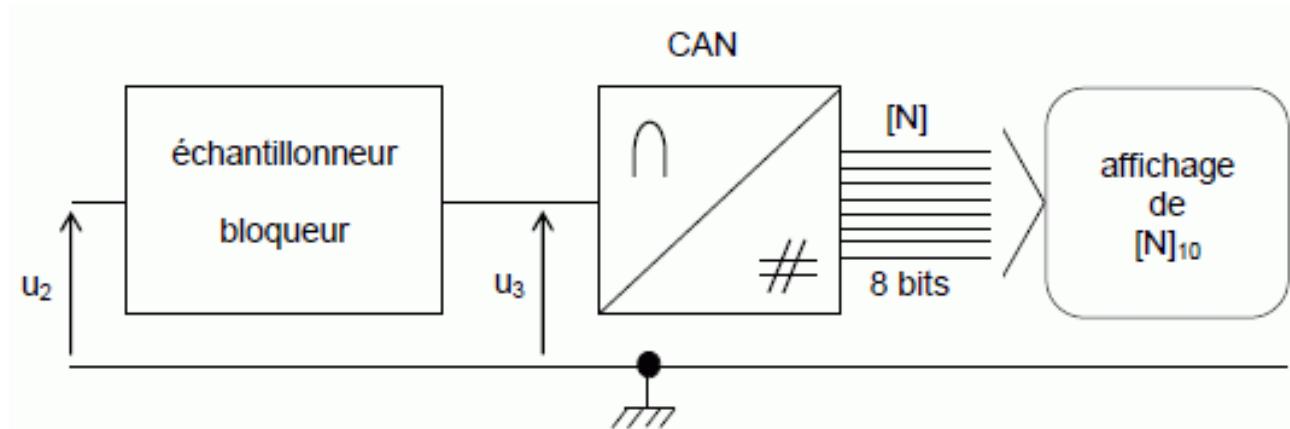


II. Conversion analogique numérique.

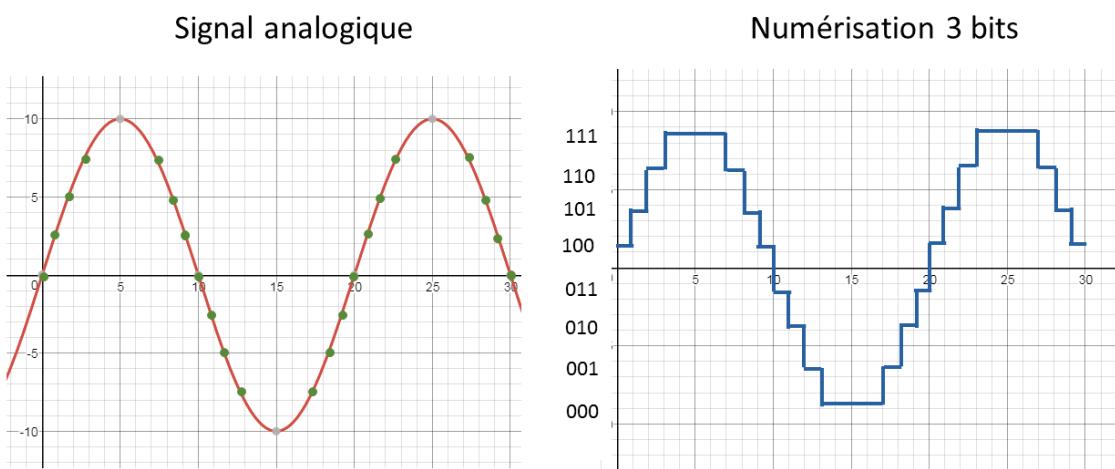
II.1. Principe de la conversion analogique numérique.

Définition : Un convertisseur analogique – numérique (CAN) est un dispositif électronique permettant la conversion d'un signal analogique en un signal numérique.

La conversion analogique – numérique peut être divisée en trois étapes : **l'échantillonnage**, la **quantification** et le **codage**.



La figure ci-dessous présente successivement ces trois étapes pour un CAN dont la sortie du signal numérique est sur 3 bits :



Ici, un signal analogique est échantillonné à une **période d'échantillonnage** constante T_{ech} . On obtient alors un signal échantillonné

$v_{ech}(k.T_{ech})$ discret en temps et continu en amplitude (ii). Ce dernier est ensuite quantifié, on obtient alors un signal numérique $v_q[k]$ discret en temps et en amplitude (iii). La quantification est liée à la **Résolution** du CAN (son nombre de bits).

Dans l'exemple précédent $v_q[k]$ peut prendre huit amplitudes différentes (3 étant le nombre de bits du CAN).

Questions:

Quelles sont les valeurs classique en audio pour la période et la résolution.

II.2. Aspects temporels et fréquentiels de l'échantillonnage.

L'obtention d'un signal échantillonné $x_{ech}(k.T_{ech})$ à partir d'un signal analogique $x(t)$ peut être modélisée mathématiquement dans le domaine temporel par la multiplication de $x(t)$ par un peigne de Dirac de période T_{ech} (noté $\delta_{Tech}(t)$):

$$x_{ech}(k.T_{ech}) = x(t) \cdot \delta_{Tech}(t) = x(t) \cdot \sum \delta(t - k.T_{ech})_k$$

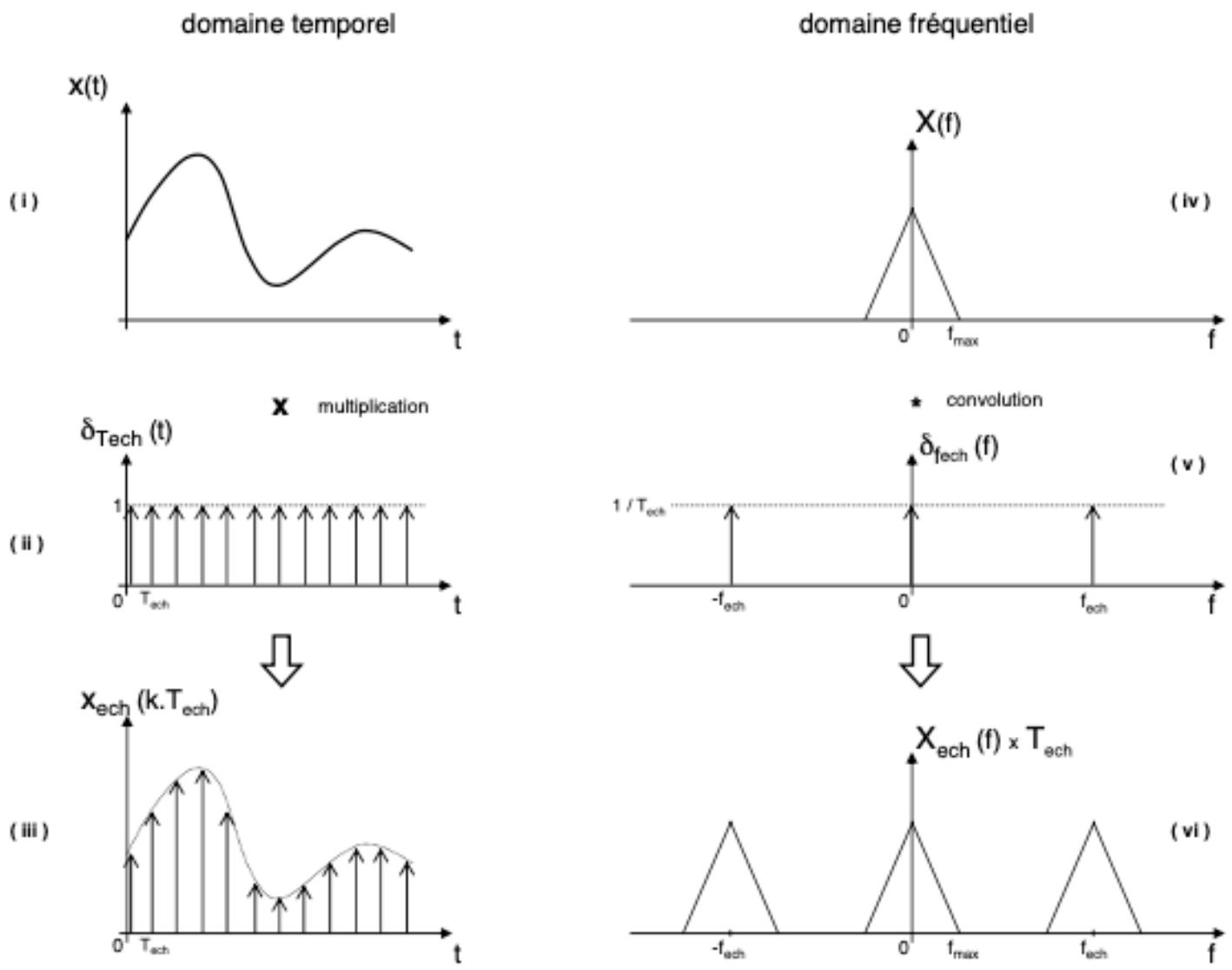
L'échantillonnage peut également être décrit graphiquement dans le domaine fréquentiel.

Au signal analogique $x(t)$, est associé dans le domaine fréquentiel le spectre $X(f)$, ce signal doit avoir une bande de fréquence de $-f_{max}$ à f_{max} .

L'on note le résultat suivant obtenu par analyse de Fourier :

- La transformée de Fourier d'un peigne de Dirac temporel, de période T_{ech} , et d'amplitude 1, est un peigne de Dirac dans le domaine fréquentiel, de période $f_{ech} = 1 / T_{ech}$ et d'amplitude $1 / T_{ech}$.

Une approche graphique dans le domaine spectrale permet d'illustrer la récupération de l'information contenue dans un signal échantillonné par un filtrage passe bas. En supposant un filtrage passe bas parfait (un tel filtre



est impossible à réaliser) sur la bande de fréquence de $-f_{\text{ech}}/2$ à $f_{\text{ech}}/2$ (appelée **bande de Nyquist**, la fréquence $f_{\text{ech}}/2$ étant appelée **fréquence de Nyquist**), on retrouve le spectre $X(f)$ et donc le signal temporel qui y correspond $x(t)$.

On retrouve alors l'explications de fréquences d'échantillonnage couramment utilisées en audio:

- Telephone, 8 ou 16kHz
- Musique 32, 48kHz et plus
- CD à 44,1kHz

Le saviez-vous ?

La radio AM utilise ce même principe de multiplication spectrale pour moduler/démoduler le signal.

Exercice

Calculer le débit (en octet par seconde) pour flux au format CD, un flux 8 pistes au format DXD (384kHz/24bits) et un flux MADI (48kHz/24bits)

Notion de repliement de spectre (aliasing).

Dans le cas où on augmente la période d'échantillonnage (on a alors f_{ech} qui diminue) il apparaît un phénomène de recouvrement spectral.

Ce phénomène apparaît dès lors que f_{max} , la plus grande fréquence de la partie du spectre centré sur 0, devient supérieur à $f_{ech} - f_{max}$ la plus basse fréquence de la partie du spectre centrée sur f_{ech} ; les parties du spectre qui se superposent s'ajoutent, et on obtient le spectre replié de la figure précédente. Il n'est plus possible de récupérer le signal analogique de départ par filtrage passe bas.

La contrainte qui en découle sur la fréquence d'échantillonnage pour éviter le repliement s'écrit mathématiquement :

$$f_{ech} > 2.f_{max}$$

Elle s'énonce sous la forme du **théorème de Shannon**, ou **théorème de l'échantillonnage** :

"Un signal $x(t)$ peut être représenté de manière univoque par une suite de valeurs échantillonnées si la fréquence d'échantillonnage, f_{ech} , est au moins deux fois plus élevée que la plus grande des fréquences, f_{max} , contenues dans le spectre."

Le spectre réel est généralement de largeur infinie (à cause du bruit, ou de signaux interférents non désirés), il y a donc toujours un phénomène de repliement spectral susceptible de ramener dans la bande de Nyquist, du bruit ou un signal d'interférence. D'où la nécessité de toujours inclure un filtre passe bas anti-repliement (*anti-aliasing filter*) ayant une fréquence de coupure à $f_{ech}/2$ devant un CAN.

Questions:

- Soit un signal La a 440Hz, quelle fréquence d'échantillonnage minimum dois-je choisir pour parfaitement convertir les 12 premières harmoniques.
- J'ai un filtre anti-repliement qui atténue de 40dB tous les 1kHz a partir d'une fréquence de coupure réglable, quelle est maintenant la fréquence d'échantillonnage si je veux rejeter de 90dB toutes les autres harmoniques.
- Je choisis un fréquence d'échantillonnage a 4kHz sans filtre et mon signal a 12 harmoniques (pas plus), dessiner le spectre du signal. Identifier la partie repliée du spectre.

Fréquence de Nyquist et transitoires

Pourquoi utiliser des fréquences d'échantillonnage plus élevées ? (96kHz, 192kHz). Les signaux audios sont composés de nombreuses transitoires, des sons très bref, qui gagnent à être décrit plus précisément sur la courte période de leur existence.

En effet, le théorème de Nyquist considère des sons stationnaires, ce qui est un cas idéal. En plus ça, l'imperfection du filtre anti-repliement est aussi à prendre en compte.

En pratique, on gagne donc à choisir F_e plus grand que l'idéal.

Le choix de F_e a aussi un choix sur la latence et la qualité des traitements numériques.

II.3. Caractéristiques des convertisseurs analogique - numérique idéaux.

Résolution.

Pour un CAN à N bits, le nombre d'états possibles en sortie est 2^N , ce qui permet d'exprimer des signaux numériques de 0 à $2^N - 1$ en code binaire naturel.

Un CAN est caractérisé également par la plage de variation acceptable de la tension analogique d'entrée, appelée **Pleine Echelle** (FS pour *Full Scale* en anglais) et que nous noterons V_{PE} .

La pleine échelle est divisée en autant de plages d'égale dimension (cas de la quantification uniforme) qu'il y a d'états possibles de la sortie numérique. Chaque plage est associée à un code numérique représentant la tension analogique d'entrée.

On définit le **quantum**, ou **LSB** (pour *Least Significant Bit*, le bit de poids faible) comme étant la dimension de ces plages. On le note q et l'obtient par : $q = \text{LSB} = \frac{V_{PE}}{2^N}$ (2^N "marches" à "l'escalier")

Plus la résolution d'un CAN est élevée, plus la sortie numérique est une image précise du signal analogique d'entrée.

Erreur de quantification (ou de codage) : différence entre la valeur du signal échantillonné et la valeur analogique d'entrée correspondant au code de sortie (correspondance donnée par la droite de transfert idéale), l'erreur de codage est exprimée en LSB.

L'erreur de quantification est comprise entre 0 et 1 LSB. Ce type d'erreur est inhérent aux CAN, il est lié à l'étape de quantification.

Plus la résolution (le nombre de bits) d'un CAN est élevée plus l'erreur de quantification est réduite.

CAN bipolaire.

Les caractéristiques précédentes sont celles de CAN **unipolaires** dont la tension analogique d'entrée est positive. Bien souvent, un même CAN peut être configuré également en mode **bipolaire** de façon à accepter une tension analogique d'entrée négative ou positive (la plage de variation est alors symétrique entre $-1/2V_{PE}$ et $+1/2V_{PE}$). La figure II.10 présente la caractéristique de transfert correspondante.

Bruit de quantification.

Le **rappor signal sur bruit (SNR pour Signal to Noise Ratio)** d'un CAN idéal est défini pour une entrée sinusoïdale pleine échelle, c'est le quotient entre la valeur efficace du signal $V_{\text{eff, sinus}}$ et celle du bruit $V_{\text{eff, bruit}}$ (s'agissant d'un CAN idéal le bruit se réduit au bruit de quantification) :

$$SNR = \frac{V_{\text{eff, sinus}}}{V_{\text{eff, bruit}}}$$

Avec

$$V_{\text{eff, sinus}} = \frac{V_{\text{PE}}}{2\sqrt{2}} = \frac{2^{N-1}q}{\sqrt{2}}$$

Et

$$V_{\text{eff, bruit}} = \sqrt{P_{\text{bruit}}} = \frac{q}{\sqrt{12}}$$

D'où

$$SNR = \sqrt{6} \cdot 2^{N-1}$$

Soit en dB

$$SNR_{\text{dB}} = 20 \log SNR = 6,02N + 1,76$$

Le SNR d'un CAN augmente avec sa résolution (gain de 6 dB par bit supplémentaire). Ce résultat représente le SNR maximal atteignable pour un convertisseur (il n'est valable que pour un signal sinusoïdal pleine échelle).

Questions:

- Calculer le SNR ideal de convertisseurs à 16, 20, 24 et 32bits
- Compte tenu de la performance d'un préampli suivant:
 - Gain 0db à +60dB
 - Sortie max : +12dBV
 - Bruit à +60dB de gain : -70dBV

Si j'ai un convertisseur avec un Full Scale à 20dBV, quelle est la resolution minimum en bit que je dois utiliser pour tirer parti de mon préampli ?

Codage.

En mode unipolaire le codage le plus couramment utilisé est le code binaire naturel. Un mot binaire s'écrit : $b_1 b_2 \dots b_{N-1} b_N$, avec b_1 le bit de poids fort (PF, ou MSB *Most Significant Bit*) et b_N le bit de poids faible (pf, ou LSB *Less Significant Bit*),

Le code binaire signé est obtenu en rajoutant un bit de signe devant le MSB au code binaire naturel. Pour un bit de signe nul, le nombre est positif, il est négatif pour un bit égale à un.

Le code binaire signé est peu propice aux opérations arithmétiques.

D	signé	binnaire décalé
3	11	111
2	10	110
1	1	101
0	000/100	100
-1	101	11
-2	110	10
-3	111	1
-4	-	0

Tab. II.3 – Codes bipolaires.

Le code binaire décalé consiste, comme son nom l'indique, à décaler le code binaire naturel. Il permet de compter de -2 à 2 -1. b_1 fait office de bit de signe. C'est un code fréquemment utilisé dans les CANs.

Le saviez-vous ?

Les fichiers qui stockent le PCM stockent directement un code binaire décalé. (Exemple: wav, aiff)

II.4. Caractéristiques des convertisseurs analogiques – numériques réels.

En plus de l'erreur systématique de quantification les CANs réels présentent des défauts que l'on classe en paramètres statiques et dynamiques.

Paramètres statiques.

Erreur d'offset(erreur de décalage) : on appelle offset un décalage horizontal de la caractéristique de transfert d'un CAN, l'erreur d'offset est exprimée usuellement en LSB. Une mesure de l'offset peut être faite en retranchant $1/2\text{LSB}$ à la première tension de seuil V_{S1} .

Erreur de gain : l'erreur de gain permet de mesurer l'écart entre la pente de la caractéristique idéale de transfert et la pente de la caractéristique réelle obtenue par régression linéaire des centres des paliers.

Non linéarités.

Les erreurs de non linéarité caractérisent les variations locales des tensions de seuil. On distingue non linéarités différentielles (**DNL** pour *Differential Non Linearity*) et intégrales (**INL** pour *Integral Non Linearity*). Elles sont mesurées après annulation des erreurs d'offset et de gain. Elles sont exprimées en LSB.

Paramètres dynamiques.

Les paramètres dynamiques permettent de mesurer la dégradation du signal numérique en sortie d'un CAN par rapport au signal analogique d'entrée.

Ils sont mesurés par analyse spectrale. Le CAN caractérisé est soumis en entrée à un signal analogique sinusoïdal pleine échelle (généralement). Les défauts du CAN réel entraînent la présence de bruit et d'harmoniques du signal d'entrée en sortie. La figure II.15 donne le spectre correspondant en sortie, calculé par FFT (*Fast Fourier Transform*, ou transformée de Fourier rapide). On retrouve le fondamental d'amplitude a_1 à la fréquence f_{\sin} , ainsi que des harmoniques d'amplitudes a_k aux fréquences $k.f_{\sin}$. Il y a également présence de bruit (le bruit de quantification bien évidemment mais aussi le bruit créé par les différents défauts du CAN). On rencontre parfois également des raies dans le spectre qui émergent du niveau de bruit moyen

à des fréquences non harmoniques de la sinusoïde d'entrée, on les nomme **Spurious** (cf. la raie d'amplitude s Fig. II.15).

SNR (*Signal to Noise Ratio*), rapport signal sur bruit hors distorsion : Il représente le rapport entre la puissance du signal (le fondamental) et la puissance de bruit (sans prendre en compte la composante continue et les harmoniques).

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log (\text{ Signal } / \text{ Bruit })$$

SINAD (*Signal to Noise ratio And Distortion*), rapport signal sur bruit avec distorsion :

Il représente le rapport entre la puissance du signal et la puissance comprise dans le bruit, les harmoniques et les éventuels spurious.

ENOB (*Effective Number Of Bits*), nombre de bits effectif :

Sa définition est liée à celle du SINAD. L'ENOB est le nombre de bits du CAN idéal qui donnerait le même SINAD que le CAN réel.

$$\text{D'où } SINAD_{dB} = 6,02 \cdot ENOB + 1,76$$

$$ENOB = (SINAD - 1,76) / 6,02$$

SFDR (*Spurious Free Dynamic Range*) :

Le SFDR donne la plage de fonctionnement du CAN exprimée comme la distance (en dB) séparant l'amplitude du fondamental et l'harmonique ou *spurious* d'amplitude la plus élevée sur la bande de fréquence considérée (généralement du continu à $f_{ech}/2$).

THD (*Total Harmonic Distorsion*), taux de distorsion harmonique :

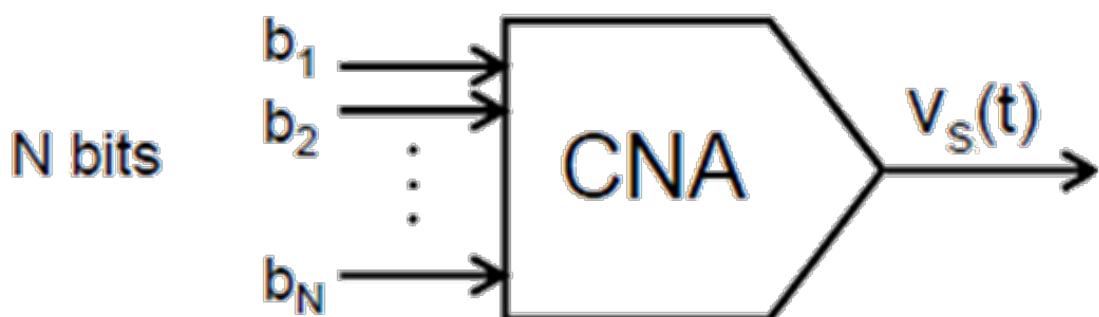
Il permet de caractériser la distorsion introduite par un CAN. Le THD est le rapport entre la puissance des harmoniques et la puissance du fondamental.

Et en vrai ? Allons voir le LTC2512-24 de Analog Device

Conversion Numérique vers Analogique

Il s'agit ici de faire l'opération inverse et de reconstruire un signal analogique à partir du signal numérique. En utilisant la propriété du train de Dirac, le signal analogique doit être filtré pour supprimer les réplications spectrales. Encore ici, ce filtre est important mais peut se révéler plus simple que dans le cas du CAN. On parle de filtre de lissage.

Les amplis de classe D utilisent notamment le fait que toute la chaîne d'amplification restitue généralement avec difficultés des fréquences de plus de 20kHz.



On retrouve les mêmes mesures que pour un CAN:

SNR

THD

ENOB

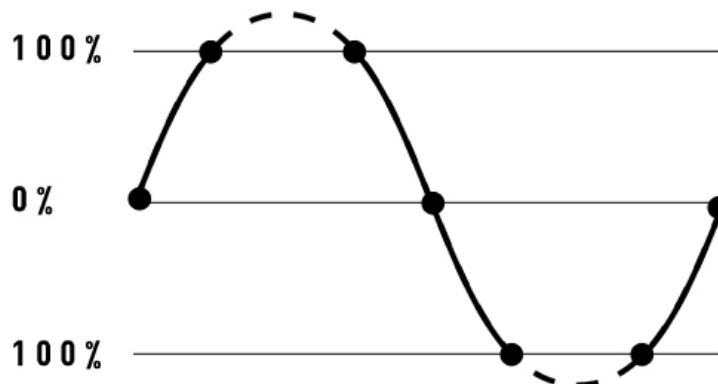
Ainsi que les mêmes erreurs

Question:

Calculer le ENOB du Apogee Rosetta 800 pour l'AD et le DA.

EBU R128 et True Peak

Intersample peaks



Le CNA dispose d'une tension maximum en pleine échelle. Ceci peut causer des distorsions lorsque le signal est trop fort. Dans certains cas il a été montré un dépassement jusqu'à 6dB entre le niveau numérique et le signal analogique reconstruit. C'est pourquoi la norme R128 propose un moyen d'estimer ce dépassement pour proprement régler le gain de sortie et éviter les distorsions.

Un bon convertisseur dispose généralement du marge permettant ce dépassement.

Codage et Codage

Il y a ambivalence des termes codages et compression. Quand il s'agit d'une compression de données on parle de Codec. Les codecs utilisent des techniques qui ressemblent à l'échantillonnage en ceci qu'il découpe et code des parties du signal, mais pas nécessairement temporel et codage en amplitude.

Exemple:

- G.711, G.722 : Quantification logarithmique
- MP3: découpage petits éléments dont le spectre est calculé (codage spectrale logarithmique)
- AAC: MP3 amélioré, taille éléments variable etc...

Pour Résumer

Un convertisseur AN transforme un signal analogique en une suite numérique.

Un convertisseur AN est composé d'un échantillonneur-bloqueur, d'un étage de quantification et d'un étage de codage.

L'échantillonneur découpe le signal analogique à une fréquence F_e

L'étage de quantification a une résolution définie en bits

Le choix de F_e impacte la bande passante de l'échantillonnage, on parle de fréquence de Nyquist. Un échantillonnage de F_e ne peut décrire que des signaux allant jusqu'à $F_e/2$.

Si le signal a du contenu au delà de $F_e/2$ on observe des artefacts appelés Aliasing.

Pour supprimer cet aliasing on utilise un filtre anti repliement à $F_e/2$.

L'étage de quantification limite aussi l'information que l'on peut coder du signal. Un codage sur N bits ne permettra pas d'avoir un SNR inférieur à $6.02 N + 1,76$ dB (pour un minimum de 6 bits).

Les performances réelles d'un convertisseur AN se décrivent par les valeurs suivantes:

- Fonction de transfert (réponse en phase et fréquence)
- Linéarité
- THD (distorsion harmonique totale)
- ENOB (effective number of bits)
- SINAD (ou THD+N, le rapport du signal sur l'ensemble bruit + distorsion)

Un convertisseur NA convertit une suite numérique en signal analogique et dispose des mêmes étages en sens inverse que un convertisseur NA.

Pour lisser le signal et supprimer les artefact d'aliasing on utilise un filtre de lissage. Un convertisseur NA dispose de critères de performances similaires aux convertisseurs AN.