

## **1.10. Traitement numérique<sup>80</sup> du signal<sup>81</sup> ou Digital Signal Processing , DSP**

Les phénomènes qui nous entourent sont presque tous "analogiques", c'est-à-dire qu'ils sont caractérisés par des grandeurs qui évoluent sans discontinuité. C'est le cas des sons où la grandeur est une pression d'air. C'est le cas aussi pour une image où les grandeurs caractéristiques qui sont la luminosité et la couleur varient d'un point à l'autre de l'image ("pixel").

Lorsque nous avons parlé de modulations analogiques, un des paramètres de la porteuse (amplitude, fréquence ou phase) suivait la variation du signal à transporter (son ou image). Pour les modulations numériques on va aussi moduler l'amplitude, la fréquence ou la phase, mais on va devoir passer par une étape supplémentaire c'est-à-dire traduire le signal analogique (son ou image) en une succession de bits (1 ou 0). Ceci est précisément le but de l'échantillonnage et de la quantification.

Le signal ainsi numérisé peut être transmis sur un support (un câble, une onde radio, une fibre optique) et restitué à un autre endroit. Mais le signal peut aussi être traité de façon numérique, c'est-à-dire qu'un signal peut être filtré (passe haut, passe-bas, passe bande ou réjection de bande), il peut aussi être débarrassé du souffle (bruit). Si le signal analogique de départ était modulé en AM, en FM ou en SSB, on pourra aussi le démoduler. Mais le traitement numérique du signal permet aussi d'améliorer des images, de faire de la reconnaissance vocale, de venir en aide à l'échographie (médicale ou maritime), sismologie,

Le traitement numérique du signal a donc ouvert de nouveaux horizons et comme (presque) tous les émetteurs-récepteurs ont un "DSP" et il est normal que nous abordions ici aussi la traitement du signal numérique ou le DSP<sup>82</sup>.

Les techniques DSP font appel à des concepts mathématiques de haut niveau, mais nous essayerons de garder cet aspect à son expression la plus simple.

Enfin, pour ne pas se limiter à quelques définitions (parfois hermétiques, nous l'admettons), il nous a paru nécessaire d'illustrer le texte par quelques exemples de circuits. Ce chapitre devrait donc être vu (ou revu) après l'étude des composants et des circuits.

---

<sup>80</sup> Rappel : Une remarque linguistique, en français on parle de numérique pour désigner ce que les anglo-saxons appellent "digital". En français, digital se rapporte au doigt, on parle d'empreintes digitales. Tout ce qui se conçoit en 1 et 0 c'est du numérique !

<sup>81</sup> Ceci constitue une nouvelle matière dans le programme HAREC et a été introduit lors de la réunion de Vilnius en 2004.

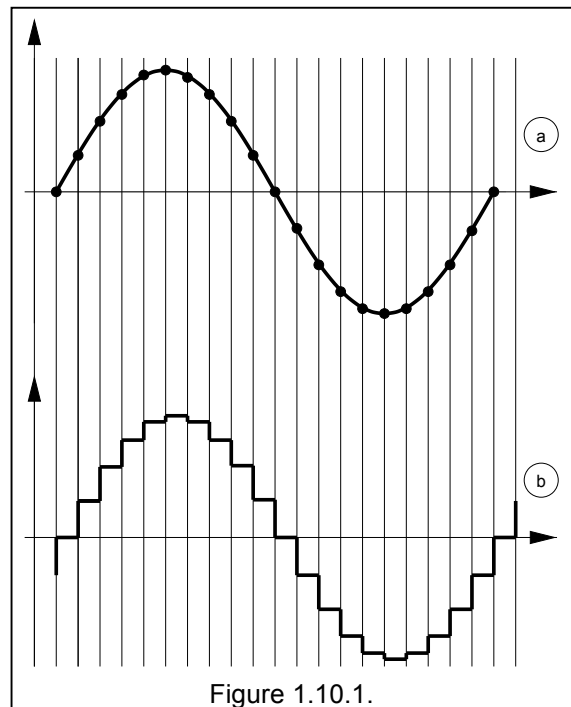
<sup>82</sup> Cette technique très novatrice, comporte aussi une partie "mathématique" de haut niveau que nous allons aborder ici en essayant de la simplifier au maximum.

### 1.10.1. Echantillonnage et quantification

L'**échantillonnage** est un procédé par lequel on prend des échantillons d'un signal analogique à des intervalles réguliers. L'amplitude de cet échantillon est encore à cet instant une grandeur analogique.

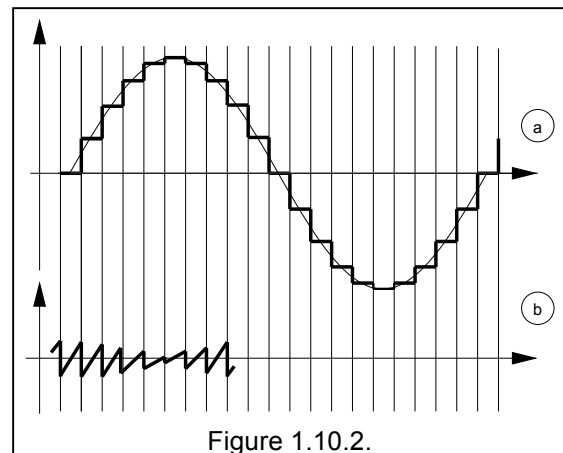
L'échantillon va ensuite être quantifié, c-à-d qu'on va traduire l'amplitude de cet échantillon en une valeur numérique. Cette opération s'appelle la **quantification**.

La figure ci-contre représente un signal (sinusoïdal) avec des points d'échantillonnage et à chaque point correspond une valeur quantifiée.



La valeur quantifiée comportera un certain nombre de bits. Il est évident que si on échantillonne avec 8 bits on aura beaucoup moins de précision que si on échantillonne avec 10 bits ou plus. Avec 8 bits on a 256 niveaux ( $2^8 = 256$ ), avec 10 bits on a 1024 niveaux ( $2^{10} = 1024$ ).

Si on examine la différence entre la valeur quantifiée et la valeur réelle du signal on aura une différence, qui peut être nulle, négative ou positive. Cette différence apparaît comme un bruit que l'on appelle **bruit de quantification** (ou idle noise). Remarquons que le bruit de quantification ne dépend pas du nombre de bits, mais bien du rapport intervalle entre échantillon/ période du signal



L'échantillonnage et la quantification s'opèrent dans des circuits appelés ADC (Analog-to-Digital Converter) et inversement nous aurons besoin de convertisseurs numériques analogiques ou DAC (Digital-to-Analog Converter). Voir Chapitre 3.

### 1.10.2. Fréquence minimum d'échantillonnage

Le nombre d'échantillons par seconde s'appelle la **fréquence d'échantillonnage**. Ainsi, si la fréquence d'échantillonnage est de 8 kHz, cela signifie que l'on prend 8000 échantillons par seconde. Il faut que la fréquence minimale d'échantillonnage soit égale à au moins 2 x la plus haute fréquence à échantillonner, ainsi,

- pour la téléphonie où le spectre est limité à 3,5 kHz, la fréquence minimale d'échantillonnage est de 8 kHz, c'est-à-dire que l'on prend généralement 8000 échantillons par seconde,
- pour l'audio (Hi-Fi) où le spectre est limité à 20 kHz, la fréquence minimale d'échantillonnage est de 44 kHz, et on prend donc 44000 échantillons par seconde,
- pour la vidéo où le spectre est limité à 5,75 MHz, la fréquence minimale d'échantillonnage est de 13,5 MHz, ce qui veut dire que l'on prend 13500000 échantillons par seconde

### **1.10.3. Convolution**

(à terminer)

### **1.10.4. Filtre anti-replis et filtre de reconstruction**

Si on échantillonne un signal avec une fréquence inférieure au minimum, c'est-à-dire avec une fréquence inférieure à 2 x la plus haute fréquence, tout se passe comme si il y avait une fréquence plus basse, comme si le spectre était "replié" sur lui-même. Il est donc nécessaire de filtrer correctement le signal d'entrée. Le filtre s'appelle un **filtre anti-replis** ou anti-crénelage ou anti-alias. Le filtre anti-replis est un filtre passe-bas qui doit être extrêmement raide. Ainsi

- pour la téléphonie on filtre à 3,5 kHz si on emploie une fréquence d'échantillonnage de 8 kHz
- en audio (Hi-Fi, CD, ...) on filtre à 20 kHz si on emploie une fréquence d'échantillonnage de 44 kHz
- en vidéo on filtre à 5,75 MHz si on emploie une fréquence d'échantillonnage de 13,5 MHz

Lorsque, en bout de processus, on va restituer le signal sous forme analogique, il y aura forcément des composantes à la fréquence de la fréquence d'échantillonnage. Donc on retrouvera du 8 kHz en téléphonie .... Pour éviter cela il faut utiliser un filtre de reconstruction qui est également un filtre passe-bas relativement raide qui

- pour la téléphonie ne laisse passer que les composantes inférieures à 3,5 kHz (si la fréquence d'échantillonnage est de 8 kHz),
- pour l'audio (Hi-Fi) ne laisse passer que les composantes inférieures à 20 kHz (si la fréquence d'échantillonnage est de 44 kHz),
- pour la vidéo ne laisse passer que les composantes inférieures à 5,75 MHz (si la fréquence d'échantillonnage est de 13,5 MHz).

### **1.10.5. Convertisseurs analogique/numérique et numérique/analogique ou ADC et DAC**

Un convertisseur analogique/numérique (désigné par ADC sur les schémas anglo-saxons ou par CAN sur les schémas français) est un circuit qui convertit une tension sous forme d'un nombre binaire.

Un convertisseur numérique/analogique, désigné par DAC sur les schémas anglo-saxons ou par CNA sur les schémas français, est un circuit qui convertit un nombre binaire sous forme d'une tension.

Un ADC ou un DAC est caractérisé par le nombre de bits (en sortie ou en entrée). Un ADC avec 8 bits pourra manipuler un maximum de 256 valeurs ( $2^8 = 256$ ), et il y aura donc 128 valeurs positives et 128 valeurs négatives. Si l'amplitude du signal d'entrée est de  $1 V_{\text{crête à crête}}$  par exemple, le plus petit incrément sera de  $1/128$  de Volt, et numériser un signal de 10 mV dans les mêmes conditions revient à faire une grossière erreur.

Une façon de contourner (partiellement) ce problème est d'utiliser un loi de codage qui ne soit pas linéaire, mais logarithmique :

Cette technique est utilisée en téléphonie par exemple, où on se contente de 8 bits !

On peut se contenter d'une telle définition, mais après avoir vu les chapitres ( ) et ( ) il sera bon de revenir sur ce qui suit :

La figure ci-contre montre un montage appelé convertisseur analogique/numérique à double rampe.

La figure ci-contre montre un montage appelé convertisseur numérique/analogique.

### 1.10.6. Filtrage numérique, FIR et IIR

Dans la suite de ce cours, nous verrons comment, dans la technologie traditionnelle "radio", on construit (ou on a construit) des filtres avec des selfs et des condensateurs. Nous verrons aussi que, pour les circuits à fréquence intermédiaire par exemple, on peut obtenir des filtres beaucoup plus sélectifs, beaucoup plus pointus à l'aide de quartz. Nous verrons aussi comment on peut utiliser des selfs et des condensateurs pour filtrer en HF (disons de 0,1 MHz aux micro-ondes<sup>83</sup>).

Ce que nous allons voir ici concerne les basses fréquences (pour fixer les idées, disons jusqu'à 20 kHz). On peut en effet construire des **filtres numériques** extrêmement performant grâce au traitement des signaux. Tellement performant qu'au lieu de filtrer les signaux moyenne fréquence d'un récepteur, on peut aussi créer un nouveau standard de moyenne fréquence aux environs de 12 kHz et de le traiter comme s'il s'agissait d'une basse fréquence dans un DSP.

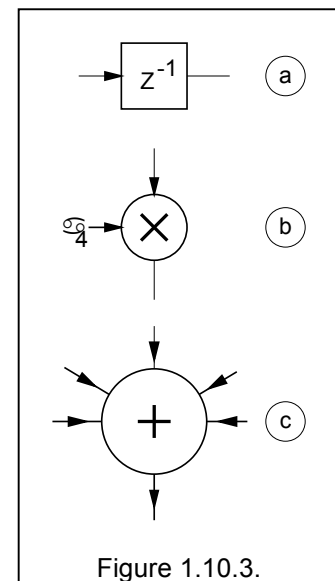
Les filtres DSP utilisent des circuits **retardateurs** de signaux, des circuits **multiplicateurs** et des circuits **additionneurs**.

Mais attention, ce que nous dessinons ne correspond pas à un circuit électrique proprement dit, il n'y a ni résistance, ni capacité, ni self, ni élément actif (transistor, ...) ce que nous dessinons ici est un **concept mathématique** que l'on va implémenter dans un microprocesseur. Les 3 symboles ci-contre ne représentent que des fonctions implémentées dans des programmes de traitement du signal.

Le signal qui entre dans un circuit retardateur (figure a) en ressort après un certain temps. Symboliquement il y a un " $Z^{-1}$ " dans ce symbole. Pour réaliser un tel circuit on pourrait imaginer une mémoire dans laquelle on stocke la valeur numérisée d'un signal et puis on va lire cette mémoire après un certain temps.

Le signal qui entre dans un multiplicateur subit une transformation, on va le multiplier par un facteur (ici représenté par  $\alpha_4$ ). Si le signal d'entrée vaut 12 par exemple et que  $\alpha_4$  vaut 3, la sortie sera égale à 36<sup>84</sup>.

Quand à l'additionneur, il comporte plusieurs entrées et le signal qui en sort est égale à la somme des signaux d'entrée.



#### 1.10.6.1. La réponse impulsionnelle

Un élément important est la réponse d'un filtre : on distingue deux types de filtre numérique: le filtre à réponse finie ou Finite Impulse Response ou FIR et le filtre à réponse infinie ou Infinite Impulse Response ou IIR.

En anglais le mot principal se trouve à la fin ... Commençons donc par **Impulse Response** ou en français la **réponse impulsionnelle**. La réponse impulsionnelle d'un circuit est la forme du signal de sortie, lorsqu'on applique une impulsion à l'entrée. Cette impulsion est infiniment brève<sup>85</sup> (c'est-à-dire infiniment courte). Deux exemples :

a) soit un circuit RC<sup>86</sup> auquel on applique une impulsion infiniment brève

b) soit un circuit LC auquel on applique une impulsion infiniment brève. Ce circuit agit un peu comme une balançoire que l'on pousse un bon coup, puis on arrête ....

<sup>83</sup> Au-delà de quelques centaines de MHz cela devient un peu plus difficile, et certainement pour les micro-ondes (c-à-d au dessus de 1 GHz) on n'utilise plus des selfs comme on l'entend pour les fréquences plus basses, mais des circuits spéciaux pour "ondes guidées".

<sup>84</sup> Nous avons pris des exemples de valeurs dans le système décimal pour simplifier la compréhension.

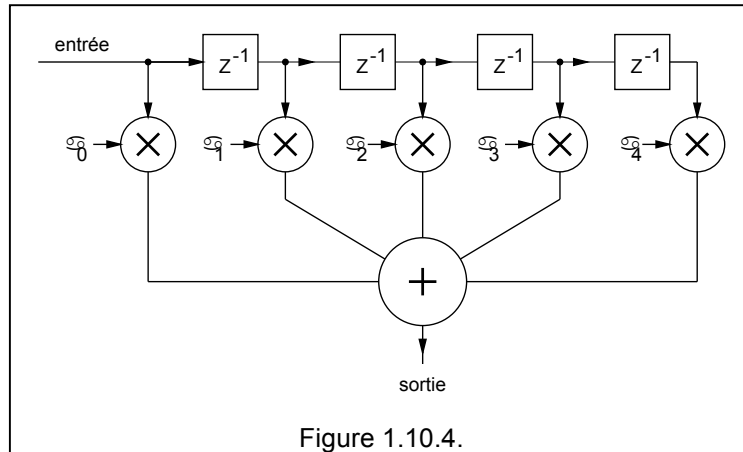
<sup>85</sup> On appelle ces impulsions infiniment brève des **impulsions de Dirac**.

<sup>86</sup> Un circuit RC est constitué d'une résistance et d'un condensateur ... nous verrons ces circuits au chapitre 3.

Sachant ce qu'est une réponse impulsionnelle, il reste à étudier la différence entre **Finite** et **Infinite** ....

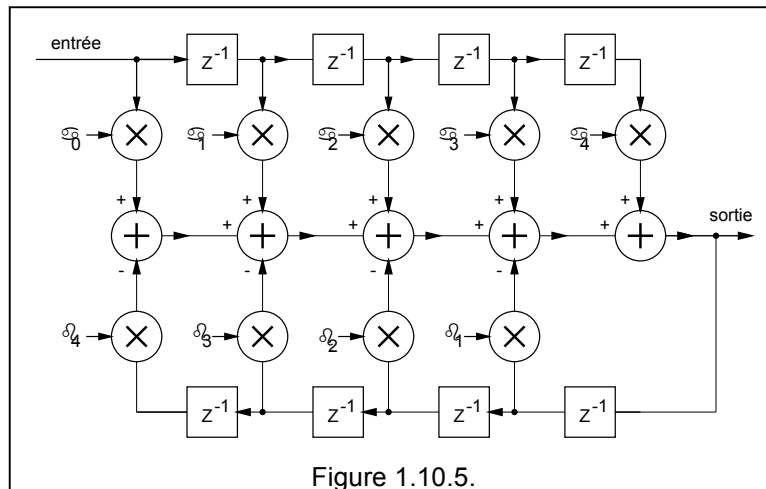
**1.10.6.2. Le filtre à réponse finie ou FIR**

On dit que le filtre a une **réponse finie** lorsqu'il n'y a pas de rétro-couplage entre l'entrée et la sortie



**1.10.6.3. Le filtre à réponse infinie ou IIR**

On dit que le filtre a une **réponse infinie** lorsqu'il y a rétro-couplage entre l'entrée et la sortie



### 1.10.7. Transformée de Fourier

#### 1.10.7.1. Le théorème de Fourier

Ce théorème est tellement important qu'on ne pourrait pas le passer sous silence. Si la démonstration ne doit pas être retenue par coeur, il faut ABSOLUMENT retenir son énoncé et les conclusions.

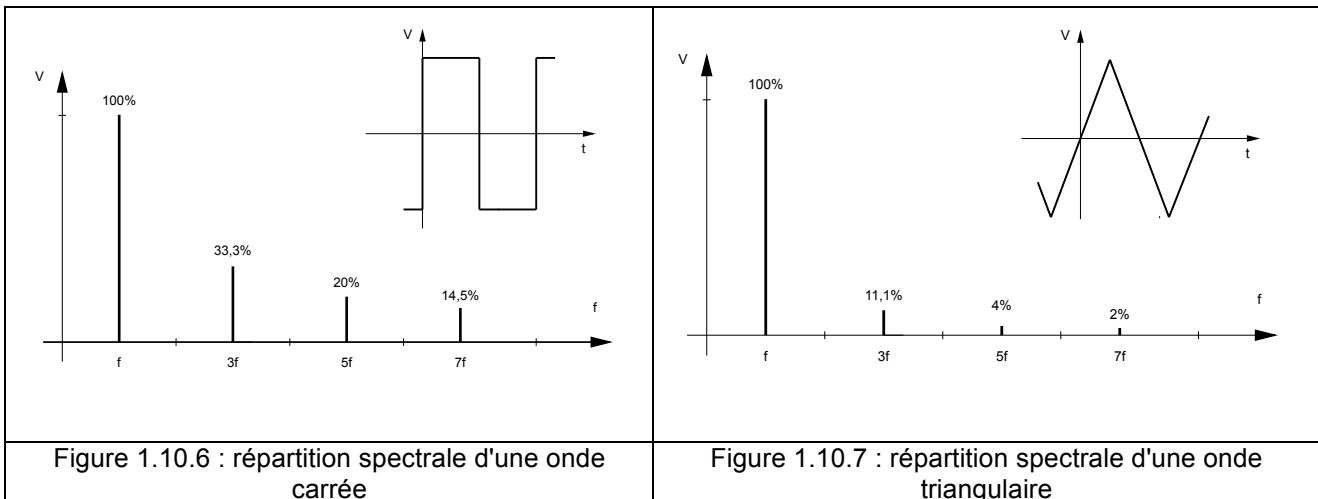
Théorème de Fourier :

Toute fonction  $v(t)$ , de fréquence  $f$ , est la somme d'un terme constant et d'une suite de fonctions sinusoïdales de fréquences  $f, 2f, 3f, 4f, \dots kf$ .

$$v(t) = A_0 + A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t + A_2 \sin 2\omega t + B_2 \cos 2\omega t + \dots A_n \sin n\omega t + B_n \cos n\omega t + \dots$$

- $A_0$  est la valeur moyenne
- $A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t + \dots$  sont les composantes à fréquence fondamentale
- $A_2 \sin 2\omega t + B_2 \cos 2\omega t + \dots$  sont les composantes à fréquence harmonique  $2f$
- $A_n \sin n\omega t + B_n \cos n\omega t + \dots$  sont les harmoniques à fréquence harmonique  $nf$

L'analyse consiste alors à déterminer tous ces coefficients  $A_n$  et  $B_n$  pour différentes formes de signaux et à les mettre en tableau, ou mieux encore à représenter graphiquement la répartition spectrale. Par exemple



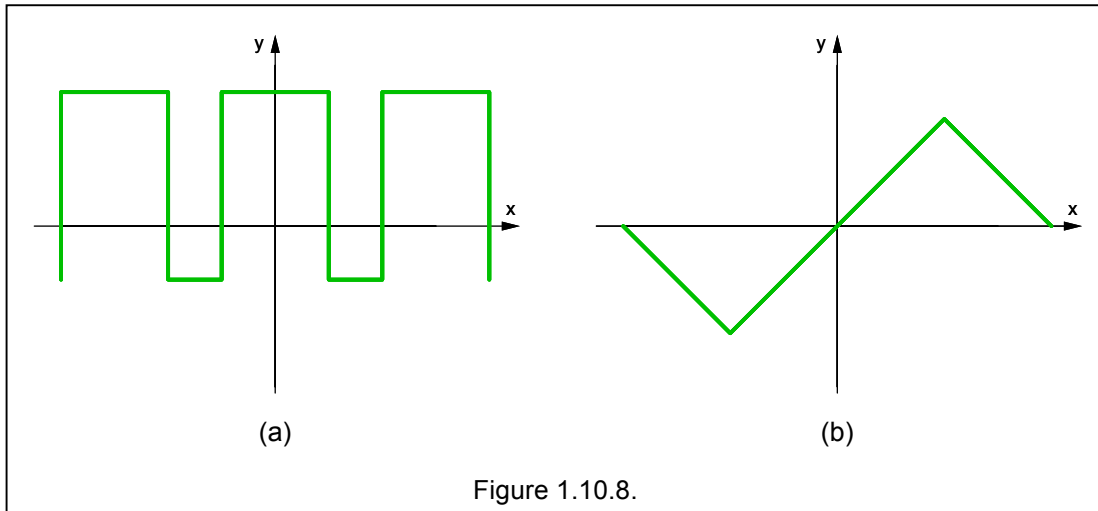
En pratique, cela signifie que pour transmettre

- un signal sinusoïdal de 1 kHz, il faut une bande passante de 1 kHz,
- un signal carré à 1 kHz, il faut un circuit qui laisse passer au moins 3 kHz, voire 5 kHz ou 7 kHz si on veut qu'il soit correctement restitué ...
- et pour un signal triangulaire, on voit que les composantes d'ordres supérieures sont moins importantes que pour un signal carré. En fait on pourrait déjà le voir ainsi, à l'œil nu, un signal triangulaire est plus proche d'un signal sinusoïdal qu'un signal carré. qui serait constitué de deux demi sinusoïdes à 1 kHz, il faudrait au moins passer du 2 kHz.

Toutes ces composantes d'ordre supérieur s'appellent des **harmoniques** et la fréquence de base s'appelle la **fondamentale**.

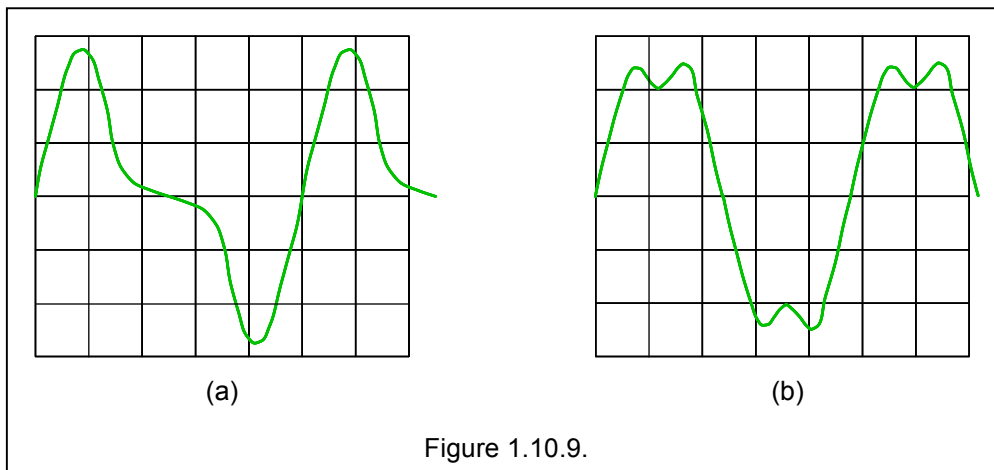
On distingue aussi deux types de symétries dans un signal périodique

- a) la **symétrie autour de l'axe y**, on parle aussi de symétrie paire et on constate que ces ne signaux comportent que des harmoniques de rang pair, c'est-à-dire des harmoniques 2, 4, 6, etc ...
- b) la **symétrie autour de l'axe x**, on parle aussi de symétrie impaire et on constate que ces signaux ne comportent que des harmoniques de rang impair, donc des harmoniques 3, 5, 7, etc ...



Soit les signaux de la figure ci-dessous avec une fréquence fondamentale de 2 kHz,

- le signal de la figure a comportera donc la fondamentale à 2 kHz et les harmoniques à 4 kHz, 8 kHz, ...
- le signal de la figure b comportera donc la fondamentale à 2 kHz et les harmoniques à 6 kHz, 10 kHz, ...



Tout ceci était dans le monde analogique et a donné des frayeurs aux électroniciens qui voulaient faire passer (ou amplifier) sans distorsion appréciable des signaux carrés ...

Mais si l'amplificateur n'amplifie pas de façon linéaire, le signal de sortie va être déformé, et tout se passe comme si de nouvelles harmoniques venaient s'ajouter. Et ici c'est la frayeur des radioamateurs qui, utilisant des amplificateurs mal réglés ou dans de mauvaise condition (saturation) vont produire des fréquences en dehors de leurs bandes. Ces fréquences pourront gêner les récepteurs de radio et de télévision des voisins.

**1.10.7.2. La transformée de Fourier discrète ou DFT (Discrete Fourier Transform)<sup>87</sup>**

La transformée de Fourier discrète consiste à relever des échantillons de tensions à l'aide d'un convertisseur analogique/numérique et à analyser ces échantillons. Le temps de calcul est proportionnel au carré du nombre d'échantillons.

**1.10.7.3. La transformée de Fourier rapide ou FFT (Fast Fourier Transform)**

La transformée de Fourier rapide permet d'accélérer le temps de calcul.

---

<sup>87</sup> La transformée de Fourier c'est très bien, mais peu pratique, car on doit connaître la forme du signal à traiter avant de le traiter. La transformée de Fourier est un outil idéal du point de vue théorique. Mais, ce que nous cherchons en traitement du signal, c'est un outil pour traiter le signal tel qu'il se présente dans la nature. On ne peut pas prévoir la forme qu'aura un signal vocal ou musical ... le signal capté par un microphone et amplifié arrive sur une ligne et c'est à partir de là qu'il faudra le traiter numériquement. La **transformée de Fourier discrète** et la **transformée de Fourier rapide** sont les **deux outils** dont nous aurons besoin.



### **1.10.8. La synthèse directe de fréquence ou DDS (Direct Digital Synthese)**

Comment faire un générateur sinusoïdal en numérique ?

On pourrait prendre une eeprom et y introduire 256 valeurs répondant à la relation  $U \cos ( n \times \pi / 360 )$ . Il suffirait alors de lire successivement toutes les valeurs d'adresses (0 à 255) pour avoir en sortie un nombre binaire qui représente la sinusoïde. Si nous utilisons alors un convertisseur numérique analogique, nous aurons réalisé un synthétiseur numérique. En faisant varier la fréquence d'horloge on va pouvoir faire varier la fréquence de sortie du signal. Il est évident qu'on peut aussi encoder les valeurs correspondant à un signal triangulaire ou n'importe quelle forme de signal (un signal représentant le rythme cardiaque, par exemple !)

Il est vrai qu'en radio on a essentiellement besoin d'un tel synthétiseur pour remplacer le VCO ancienne version avec sa bobine et son condensateur variable ...

### **1.10.9. Mais un DSP , c'est quoi finalement ?**

Finalement un DSP est un circuit électronique complexe, essentiellement basé sur un circuit intégré que l'on appelle aussi DSP, mais ça c'est bien le "processeur", c-à-d le circuit rempli d'intelligence ...

## **1.11. Le programme HAREC**

Que faut-il connaître d'après le programme HAREC ?

### CHAPITRE 1<sup>ER</sup>

#### 1. ELECTRICITE, ELECTROMAGNETISME ET RADIOELECTRICITE - THEORIE

Vilnius  
2004<sup>88</sup>

##### 1.1 Conductivité

- Conducteur, semi-conducteur et isolant
- Courant, tension et résistance
- Les unités : l'ampère, le volt et l'ohm
- La loi d'Ohm ( $U = R.I$ )
- Puissance électrique ( $P = U.I$ )
- L'unité : le Watt
- Energie électrique ( $W = P.t$ )
- La capacité d'une batterie (ampère-heure)

##### 1.2 Les générateurs d'électricité

- Générateur de tension, force électromotrice (fem), courant de court circuit, résistance interne et tension de sortie
- Connexion en série et en parallèle de générateurs de tension

##### 1.3 Champ électrique

- Intensité du champ électrique
- L'unité = le volt par mètre
- Blindage contre les champs électriques

##### 1.4 Champ magnétique

- Champ magnétique entourant un conducteur
- Blindage contre les champs magnétiques

##### 1.5 Champ électromagnétique

- Ondes radio comme ondes électromagnétiques
- Vitesse de propagation et relation avec la fréquence et la longueur d'onde
- Polarisation

##### 1.6 Signaux sinusoïdaux

- La représentation graphique en fonction du temps
- Valeur instantanée, amplitude :  $[E_{max}]$ , valeur efficace [RMS] :  $U_{eff} = U_{max} / \sqrt{2}$  et valeur moyenne
- Période et durée de la période
- Fréquence
- L'unité : le Hertz
- Différence de phase

##### 1.7 Signaux non sinusoïdaux

- Signaux basse fréquence
- Signaux carrés
- Représentation graphique en fonction du temps
- Composante de tension continue, composante d'onde fondamentale et harmoniques
- Bruit [ $P_N = kTB$ ] (bruit thermique du récepteur, bande de bruit, densité de bruit, puissance de bruit dans la bande passante du récepteur) +

<sup>88</sup> Cette colonne indique la nouvelle matière ajoutée (+) ou supprimée (-) lors de la réunion CEPT de 2004.

**1.8 Signaux modulés**

- CW +
- Modulation d'amplitude
- Modulation de phase, modulation de fréquence et modulation en bande latérale unique
- Déviation de fréquence et indice de modulation :  $[m = \Delta F / f_{\text{mod}}]$
- Porteuse, bandes latérales et largeur de bande
- Forme d'onde de signaux CW, AM, SSB et FM (représentation graphique)
- Spectre de signaux CW, AM, SSB et FM (représentation graphique) +
- Modulation numériques : FSK, 2-PSK, 4-PSK, QAM +
- Modulations numériques : bit rate , symbol rate et bande passante +
- CRC et retransmission (par exple Packet Radio), forward error correction (par exemple Amtor FEC) +

**1.9 Puissance et énergie**

- Puissance des signaux sinusoïdaux :  $[ P = i^2 R ; P = u^2 / R ]$
- Rapports de puissance correspondant aux valeurs en dB suivantes : 0 dB, 3 dB, 6 dB, 10 dB et 20 dB [ valeurs positives et négatives]
- Rapports de puissance entrée/sortie en dB d'amplificateurs et/ou d'atténuateurs
- Adaptation (transfert maximum de puissance)
- Relation entre puissance d'entrée et de sortie et rendement  $[\eta = P_{\text{out}}/P_{\text{in}} \times 100\%]$
- Puissance crête de la porteuse modulée [P E P]

**1.10. Traitement numérique du signal (DSP)**

- Echantillonnage et quantification +
- Fréquence minimum d'échantillonnage (fréquence de Nyquist) +
- Convolution (domaine temporel / domaine fréquentiel, représentation graphique) +
- Filtre anti-aliasing, filtre de reconstitution +
- ADC / DAC +

## 1.12. Table des matières

1.1. La conductivité.....	2
1.1.1. Conducteur, semi-conducteur et isolant .....	2
1.1.2. Courant, tension et résistance .....	6
1.1.3. Les unités : l'ampère, le volt et l'ohm .....	9
1.1.4. La loi d'Ohm .....	11
1.1.5. Les lois de Kirchhoff.....	12
1.1.5.1. La loi des nœuds.....	12
1.1.5.2. La loi des mailles.....	13
1.1.6. Puissance électrique .....	14
1.1.6. Puissance électrique.....	14
1.1.7. L'énergie électrique.....	14
1.1.8. La capacité d'une batterie .....	15
1.2. Les générateurs d'électricité.....	17
1.2.1. Généralités.....	17
1.2.2. Mise en série de générateurs .....	18
1.2.3. Mise en parallèle de générateurs.....	18
1.2.4. Résistance adaptée .....	19
1.3. Electrostatique et champ électrique .....	20
1.3.1. Introduction .....	20
1.3.2. La loi de Coulomb.....	20
1.3.3. La charge élémentaire, celle de l'électron.....	21
1.3.4. Le champ électrique.....	21
1.3.6. La capacité.....	22
1.3.6. La cage de Faraday .....	22
1.4. Electromagnétisme et champ magnétique .....	23
1.4.1. Introduction .....	23
1.4.2. Le champ magnétique .....	24
1.4.3. Le champ magnétique terrestre .....	24
1.4.4. Les lignes de force du champ magnétique .....	25
1.4.5. Les champs magnétiques produit par des courants .....	25
1.4.6. Le flux magnétique.....	28
1.4.7. L'excitation magnétique .....	28
1.4.8. La perméabilité magnétique - Matériaux paramagnétiques et diamagnétiques .....	29
1.4.9. La protection contre les champs magnétiques .....	30
1.4.10. Les circuits magnétiques et la loi d'Hopkinson .....	30
1.4.11. La courbe de magnétisation et le cycle d'hystérésis.....	31
1.4.12. Le point de Curie.....	32
1.4.13. Les forces électromagnétiques .....	33
1.4.13.1. Force dans un conducteur parcouru par un courant et soumis à un champ.....	33
1.4.13.2. Force entre deux conducteurs parcourus par des courants.....	34
1.4.14. L'induction électromagnétique .....	35
1.4.15. L'inductance .....	35
1.4.16. L'induction mutuelle .....	36
1.4.17. Les courants de Foucault.....	36
1.4.18. Les 3 piliers de l'électrotechnique .....	37
1.5. Le champ électromagnétique .....	38
1.6. Signaux sinusoïdaux .....	41
1.6.1. Représentation graphique.....	41
1.6.2. La fonction sinusoïdale .....	42
1.6.3. Tension efficace, tension maximum et tension moyenne .....	43
1.6.4. Fréquence, période et pulsation .....	44
1.6.5. Résistance, condensateur et bobine soumis à un courant continu ou alternatif.....	44
1.6.5.1. Résistance en continu et en alternatif .....	44
1.6.5.2. Condensateur en continu et en alternatif .....	44
1.6.5.3. Bobine en continu et en alternatif.....	45
1.6.5.4. En résumé .....	46
1.6.5.5. Circuits complexes constitués de R, de L et de C.....	46
1.6.6. Déphasage.....	49

1.7. Signaux non sinusoïdaux .....	49
1.7. Signaux non sinusoïdaux .....	50
1.7.1. Les signaux audio .....	50
1.7.2. Les ondes carrés .....	52
1.7.3. Le bruit thermique .....	53
1.8. Signaux modulés .....	54
1.8.1. Généralités sur les modulations analogiques .....	54
1.8.1. La modulation par tout ou rien .....	55
1.8.2. La modulation d'amplitude .....	56
1.8.2.1. Principe .....	56
1.8.2.2. Enveloppe du signal AM.....	58
1.8.2.3. Calcul de l'énergie dans chacune des raies du spectre .....	58
1.8.2.4. Taux ou profondeur de modulation .....	60
1.8.2.5. Le rapport Signal/Bruit après détection .....	61
1.8.2.6. Les modulateurs AM .....	61
1.8.2.7. Conclusion.....	62
1.8.3. La modulation à bande latérale unique.....	63
1.8.3.1. Principe .....	63
1.8.3.2. Porteuse supprimée ou porteuse atténuée .....	64
1.8.3.3. Les problèmes de démodulation .....	64
1.8.4. La modulation à bande latérale résiduelle .....	65
1.8.5. Les modulations angulaires .....	66
1.8.5. Les modulations angulaires .....	66
1.8.5.1. But.....	66
1.8.5.2. Principe .....	66
1.8.5.3. Relation FM-PM .....	67
1.8.5.4. Spectre et bande passante .....	69
1.8.5.5. Préaccentuation et désaccentuation .....	71
1.8.5.6. Changement de fréquence et multiplication de fréquence .....	72
1.8.6. Résumé sur les modulations analogiques .....	73
1.8.6.1. Les dénominations des modulations analogiques .....	73
1.8.6.2. Tableau résumé AM, SSB, FM.....	74
1.8.7. Généralités sur les modulations numériques.....	75
1.8.8. Amplitude Shift Keying (ASK) ou Modulation par Déplacement d' Amplitude .....	75
1.8.9. Frequency Shift Keying (FSK) ou Modulation par Déplacement de Fréquence .....	76
1.8.9.1. Application radioamateur : la RTTY .....	77
1.8.10. Minimum Shift Keying (MSK).....	77
1.8.11. Phase Shift Keying (PSK) ou Modulation par Déplacement de Phase.....	78
1.8.12. Quadrature Amplitude Modulation (QAM) ou Modulation d'Amplitude en Quadrature .....	83
1.8.13. Caractéristiques des transmissions numériques .....	84
1.8.13.1. Débit binaire et vitesse de transmission.....	84
1.8.13.2. TEB ou BER.....	84
1.8.13.3. Bande passante et spectre.....	84
1.8.14. Résumé sur les modulations numériques.....	85
1.8.15. Modulations d'impulsions (PCM, PWM, PAM, PPM, ...) .....	86
1.8.16. Détection et correction d'erreurs .....	87
1.8.16.1. Le Cyclic Redundancy Check ou CRC.....	87
1.8.16.2. Le Forward Error Correction ou FEC .....	87
1.9. Puissance et énergie .....	88
1.9.1. Puissance des signaux sinusoïdaux .....	88
1.9.3. Les décibels .....	89
1.9.3.1. Introduction.....	89
1.9.3.2. Amplification et gain en puissance .....	89
1.9.3.3. Organes en cascade .....	91
1.9.3.4. Amplification et gain en tension et en courant .....	92
1.9.3.5. Tableau de conversion dB rapport de puissance ou de tension .....	92
1.9.4. Adaptation d'impédance.....	93
1.9.5. Rendement .....	94
1.9.6. Puissance d'enveloppe de crête (PEP).....	94
1.10. Traitement numérique du signal ou Digital Signal Processing , DSP .....	95
1.10.1. Echantillonnage et quantification .....	96

---

1.10.2. Fréquence minimum d'échantillonnage .....	96
1.10.3. Convolution .....	97
1.10.4. Filtre anti-replis et filtre de reconstruction .....	97
1.10.5. Convertisseurs analogique/numérique et numérique/analogique ou ADC et DAC.....	97
1.10.6. Filtrage numérique, FIR et IIR.....	98
1.10.6.1. La réponse impulsionnelle.....	98
1.10.6.2. Le filtre à réponse finie ou FIR .....	99
1.10.6.3. Le filtre à réponse infinie ou IIR.....	99
1.10.7. Transformée de Fourier .....	100
1.10.7.1. Le théorème de Fourier.....	100
1.10.7.2. La transformée de Fourier discrète ou DFT (Discrete Fourier Transform).....	102
1.10.7.3. La transformée de Fourier rapide ou FFT (Fast Fourier Transform).....	102
1.10.8. La synthèse directe de fréquence ou DDS (Direct Digital Synthese) .....	103
1.10.9. Mais un DSP , c'est quoi finalement ? .....	103
1.11. Le programme HAREC.....	104
1.11. Le programme HAREC.....	104
1.12. Table des matières .....	106