Traitement du signal sonore

Notions de base sur les synthétiseurs

Michel Mourey

EMR 18603

Print & Listen
Drucken & Anhören
Imprimer & Ecouter

www.reift.ch

EDITIONS MARC REIFT

Route du Golf 150 • CH-3963 Crans-Montana (Switzerland)
Tel. +41 (0) 27 483 12 00 • Fax +41 (0) 27 483 42 43 • E-Mail : info@reift.ch • www.reift.ch

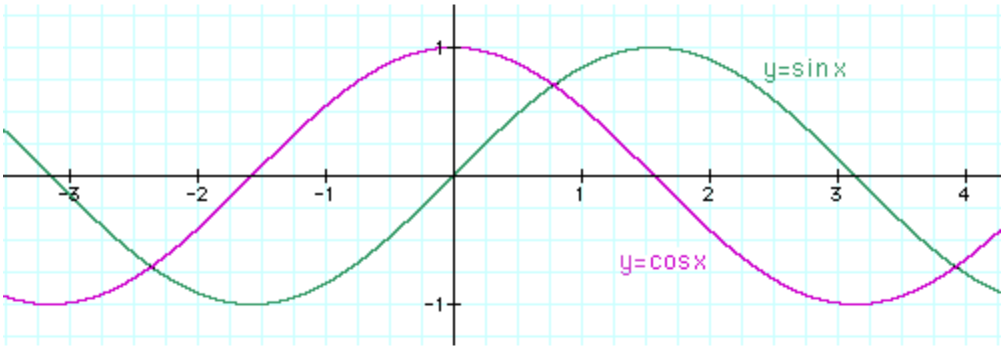
Traitement du signal sonore

Notions de base sur les synthétiseurs

Sommaire

1) LES SIGNAUX DE BASE

Fonctions sinus et cosinus (pas d'harmoniques)



y = sin (2 π f t) période T = 1 / f = 6,2 x cos (2 π f t) = sin (2 π f t + + π/2)

f : fréquence

Harmoniques : f, 2f, 3f, 4f, ...

Développement en série de Fourier des fonctions « rectangle » et « dent de scie »

$f(t) = C_0 \; \sum_{n=1}^{\infty} \; C_n \; \sin (n\omega t \; + \; \Psi_n)$ (somme de n=1 à l'infini) avec $\omega = 2\,\pi / T = 2\,\pi\,f$

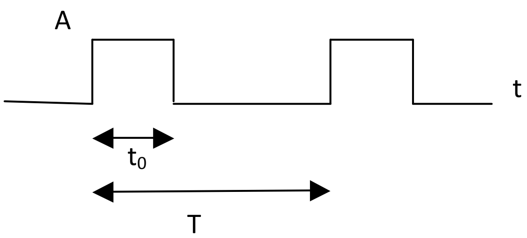
n : ordre de l'harmonique

A_m : valeur moyenne de la fonction (moyenne arithmétique)

A_{eff} : valeur efficace de la fonction (RMS root mean square : même puissance thermique qu'en courant continu dans une résistance identique)

C_n : amplitude du nième harmonique

Fonction : rectangle (amplitude maxi A)



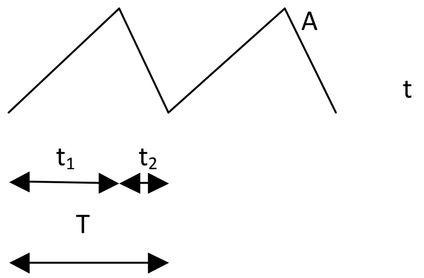
$A_m = A\,(t_0 / T)$ $A_{eff} = A\,(t_0 / T)^{1/2}$

$C_n = 2\,A_m\,[\sin \pi\, n\,(t_0 / T)] / \pi\, n\,(t_0 / T)$

Si $t_0 = T / 2$ (fonction carré) il n'y a pas d'harmoniques paires

$C_n = [4\,A_m / \pi\, n]\,[\sin \pi\, n \;/ 2)]$

Fonction : dents de scie triangulaire (amplitude maxi A)



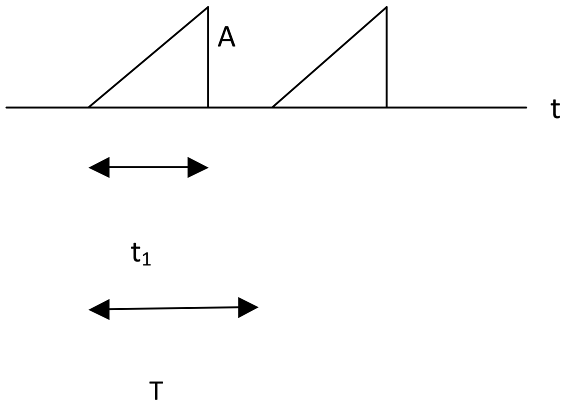
$A_m = A / 2$ $\quad\quad\quad\quad$ $A_{eff} = A / 3^{1/2}$

$C_n = 2 A_m [\sin \pi n (t_1 / T)] / \pi^2 n^2 (t_1 / T) (1 - t_1 / T)$

Si $t_1 = T / 2$ il n'y a pas d'harmoniques paires

$C_n = [8 A_m / \pi^2 n^2] [\sin \pi n / 2)]$

Fonction : dents de scie rectangulaire (amplitude maxi A)



$A_m = (A / 2) (t_1 / T)$

$A_{eff} = A (t_1 /3 T)^{1/2}$

$C_n = \{4 A_m / X^2\} \{2 (1 – \cos X) + X (X – 2 \sin X)\}$

Avec $X = 2 \pi n t_1 / T$

Si $t_1 = T$

$A_m = A / 2$

$A_{eff} = A /3^{1/2}$

$C_n = - 2 A_m (\cos \pi n) / \pi n$

2) **LES TROIS SORTES DE MODULATION :**

Y = A cos (□t+□)

- La modulation d'amplitude : A variable
- La modulation de fréquence : f = (□ / 2 π) variable   □ : pulsation
- La modulation de phase : □ variable

Dans tous les cas, il y a :

- Un signal porteur (porteuse)
- Un signal modulant (modulateur)
- Un signal modulé

Modulation d'amplitude : (signaux sinusoïdaux)

Signal modulateur : $u(t) = U_0 + U_m \cos(wt)$

Signal porteur : $v(t) = V_m \cos(Wt)$

Signal modulé : $s(t) = u(t)\, v(t) = (U_0 + U_m \cos(wt))\, V_m \cos(Wt)$

$s(t) = U_0 (1 + (U_m / U_0) \cos(wt))\, V_m \cos(Wt)$

$s(t) = A (1 + m \cos(wt)) \cos(Wt)$

$m = U_m / U_0$ taux de modulation

$A = U_0 V_m$

Amplitude du signal modulé = $A (1 + m \cos(wt))$

Valeur max : $H_{max} = A (1 + m)$

Valeur mini : $H_{min} = A (1 - m)$

$H_{max} / H_{min} = (1 + m) / (1 - m)$

$m = (H_{max} - H_{min}) / (H_{max} + H_{min})$

$\cos a \cos b = ½ [\cos(a + b) + \cos(a - b)]$

$s(t) = A \cos(W t) + ½ A m \cos[(W + w) t] + ½ A m \cos[(W - w) t]$

Il y a superposition de trois fréquences : $W / 2\pi$, $(W-w) / 2\pi$, $(W+w) / 2\pi$

Spectre du signal modulé

Modulation de fréquence :

Signal modulé : $s(t) = S(t) \cos (\Phi (t))$

$S(t)$: amplitude instantanée

$\Phi (t)$ = phase instantanée

$\Omega (t) = d \Phi (t) / dt$ = pulsation instantanée

$\Phi (t) = \int \Omega (t) dt = \Omega_0 t + □ (t)$

Pulsation du signal porteur : $\Omega_0 = 2 \pi F_0$ = constante   (F_0 > fréquences du signal modulant)

Signal modulé : $s(t) = S(t) \cos (\Omega_0 t + □ (t))$

- Si $S(t)$ est fonction de t et □ (t) = constante : c'est de la modulation d'amplitude
- Si $S(t)$ = constante et □ (t) fonction du temps
  - □ (t) = k u(t)

    u(t) étant le signal modulant : c'est de la **modulation de phase**
  - d (□ (t)) / dt = $k^{'}$ u(t) c'est de la modulation de fréquence

Dans le cas de la modulation de fréquence avec un signal modulant sinusoïdal :

$s(t) = A_0 \cos (\Omega_0 t + m \sin wt) = = A_0 \cos (2 \pi F_0 t + m \sin 2 \pi ft)$

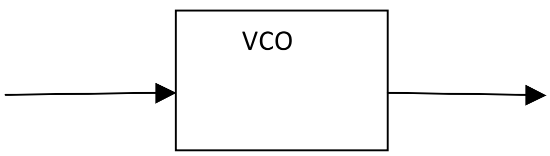
f : fréquence du signal utile

F_0 : fréquence du signal porteur

$m = \Delta f / f$: indice de modulation

Δf : excursion en fréquence (Δf = + ou – 75 KHz en radiodiffusion)

Une tension modulée en fréquence est une tension d'amplitude constante mais dont la fréquence instantanée varie avec le temps



Tension x(t)   signal y(t) de fréquence f(t)

VCO : oscillateur contrôlé en tension

3) L’ORIGINE DES SONS HARMONIQUES

Les cordes vibrantes, les tuyaux sonores, et les membranes vibrantes sont tous trois des oscillateurs à propagation.

L’oscillateur est responsable des ondes périodiques et des sons harmoniques développés par l’instrument de musique. Un tel oscillateur, lorsqu’il est excité, est parcouru par une onde stationnaire. Le coup d’archet sur la corde du violon consiste à exciter le système.

L’onde initiale ainsi crée est alors réfléchie périodiquement sur les limites du milieu dans lequel elle se propage. La corde du violon, le tuyau de la clarinette sont des milieux fermés à leur extrémité et sont donc le siège d’ondes stationnaires.

L’onde stationnaire est la superposition de plusieurs modes de vibration agissant simultanément dans le milieu. Chaque mode présente 0, 1, 2, 3, 4, … nœuds de vibrations pour lequel l’élément ne vibre pas. Ces nœuds divisent le milieu en parties égales. A chaque mode correspond une fréquence de la série harmonique.

La synthèse d’un son consiste à recréer un son à partir de composantes contrôlées.

4) SYNTHESE ADDITIVE : principe (synthèse de Fourier, synthèse harmonique)

Elle consiste à additionner des ondes de fréquence f1, f2, f3, f4, … de façon à créer une onde périodique complexe. Notre oreille est sourde aux relations de phase existant entre les différentes composantes harmoniques d’un son périodique. Seul, le spectre d’amplitude renseigne sur le timbre d’un son périodique.

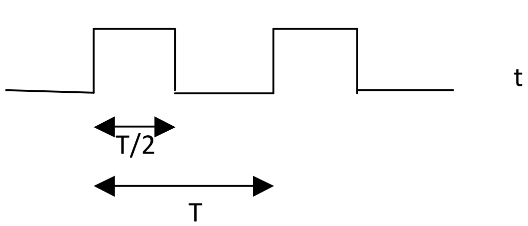
→RECOMPOSITION D’UN SIGNAL PERIODIQUE A L’AIDE DE FONCTIONS SINUSOIDALES

Un signal sonore est constitué d’une somme infinie de sinusoïdes (théorie de Fourier).

Exemple : pour reconstituer un signal comme la fonction carré (créneau), il suffit d’additionner un nombre suffisant de termes en sinus pour s’approcher de la vraie courbe.

$\sum_{n=0}^{\infty}$: somme de 0 à l’infini   avec n= 0, 2, 4, 6, … et ∞ : l’infini

$S(t) = (4\,A / \pi) \; \sum_{n=0}^{\infty} \{\sin (n+1)\, x] / (n+1)\}$ formule complète



Approximations : exemples

3 termes : $F(x) = 3\, [(4/\pi) \sin x + (4/3\pi) \sin 3x + (4/5\pi) \sin 5x]$

5 termes : $F(x) = 3\, [(4/\pi) \sin x + (4/3\pi) \sin 3x + (4/5\pi) \sin 5x + (4/7\pi) \sin 7x + (4/9\pi) \sin 9x]$

Ce qui donne quasiment une fonction carrée avec 5 termes.

→RECOMPOSITION D'UN SIGNAL SINUSOIDAL A PARTIR DE FREQUENCES MULTIPLES D'UNE FREQUENCE DONNEE QUI PEUT N'AVOIR AUCUN RAPPORT AVEC LA FREQUENCE DE LA SINUSOIDE AINSI RECOMPOSEE.

Le théorème de Fourier affirme qu'on peut décomposer et recomposer un signal périodique de fréquence f en une somme de signaux sinusoïdaux possédant des amplitudes, des phases et des fréquences qui sont multiples de la fréquence f considérée.

$F(t) = F(t + T) = h_1 \sin(\omega t + \Phi_1) + h_2 \sin(2\omega t + \Phi_2) + h_3 \sin(3\omega t + \Phi_3) + \ldots$

$\omega = 2\pi f = 2\pi / T$

En pratique, des signaux pseudopériodiques se retrouvent pour une période de temps brève dans l'état stationnaire de nombreux instruments dits entretenus.

Considérons la note do_3 = 261,62 Hz jouée 1/100 ème de seconde.

Pour décomposer ce signal en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence 100Hz, 200Hz, 300Hz,…, passons en mode numérique avec le standard CD (compact disc).

Chaque voie est codée par un nombre sur 16 bits avec 44100 (standard CD) nombres pour une seconde de son. Un centième de seconde est donc représenté par 441 échantillons et, pour connaitre la décomposition de Fourier, il faut comparer le signal avec les sinusoïdes à 100Hz, 200Hz, 300 Hz, …

En enregistrant en mode numérique sur un CD et en comparant le signal avec les sinusoïdes 100, 200,300,...600 Hz on obtient :

23,23

$+ 55{,}0749 \sin(2\pi 100t + 1{,}7310) = -55{,}0749$

$+117{,}0383 \sin(2\pi 200t + 1{,}8844) = 4{,}32$

$+162{,}6223 \sin(2\pi 300t - 1{,}1159) = 161.3696$

$+40{,}8287 \sin(2\pi 400t - 0{,}9892) = -15{,}9601$

$+22{,}1290 \sin(2\pi 500t - 0{,}8779) = -21{,}7311$

$+14{,}8686 \sin(2\pi 600t - 0{,}7809) = 3{,}2892$

$+ \ldots$ total = 99,5

On a recomposé 1/100 ème de seconde de la note do, mais si on continue à gauche et à droite, on voit qu'il est la répétition de ce signal, et qu'il présente donc une discontinuité importante à chaque 1/100 ème de seconde. De fait, ce signal est bien périodique avec une fréquence de 100 Hz.

On visualise le contenu fréquentiel du son (sonagrammes) pendant que le temps s'écoule.

La vitesse de lecture d'un enregistrement analogique modifie la hauteur du son.

La lecture d'un enregistrement numérique, peut se faire avec des ralentissements sans changement de hauteur.

Réseau

Transfert

Clavier MIDI Oscillateur T Filtre Ampli

Générateur d'enveloppe Générateur d'enveloppe

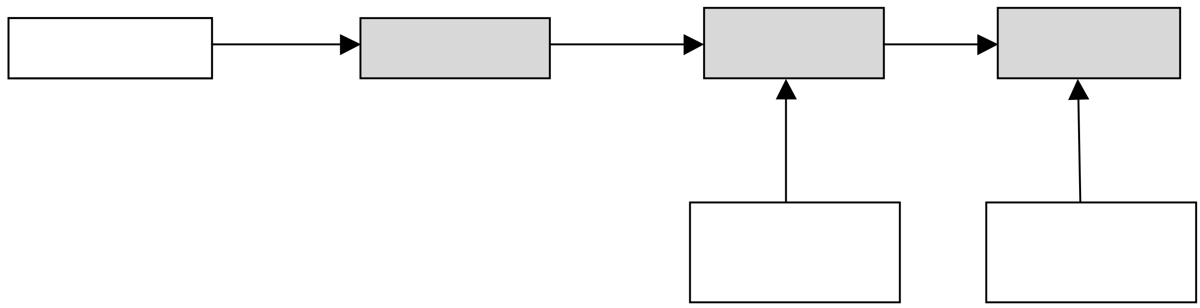
Passif

5) SYNTHESE SOUSTRACTIVE : principe

A partir d'un signal unique riche en harmoniques (onde carrée), on peut obtenir au moyen d'un filtre passe-bas de nombreuses sonorités en fixant la fréquence de coupure à différentes valeurs. (Voir 13)

6) CŒUR DU SYSTEME DE LA SYNTHESE DU SIGNAL ELECTRIQUE DU SON

Chaîne oscillateur-filtre-amplificateur



7) FONCTION DE TRANSFERT EN REGIME SINUSOÏDAL PERMANENT

➔ **Réseau électrique passif**

entrée **sortie**

➔Dans tous les cas le réseau a une bande passante (f mini – f max)

➔Signal d'entrée sinusoïdal :

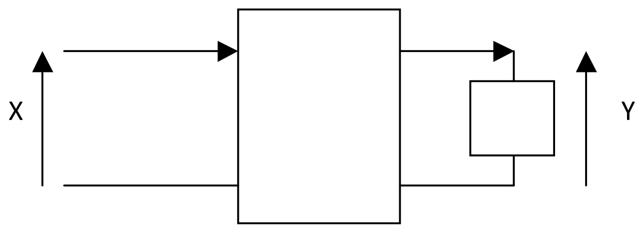
Le signal sinusoïdal de sortie est différent en amplitude et en phase du signal d'entrée.

➔Signal d'entrée périodique :

Le signal périodique de sortie est différent en amplitude, en phase pour la fréquence fondamentale et les harmoniques du signal d'entrée.

➔ **D'une manière générale**

On peut définir une fonction de transfert entre une entrée et une sortie.



X grandeur d'entrée ou d'excitation (courant I ou tension V)

Y grandeur de sortie ou de réponse (courant I ou tension V)

$X(t) = A \cos \omega t$

$Y(t) = B \cos (\omega t + \Phi)$

R

Filtre

<u>En notation complexe</u> (de la forme a + jb) : voir annexe 2

$\underline{X} = X$

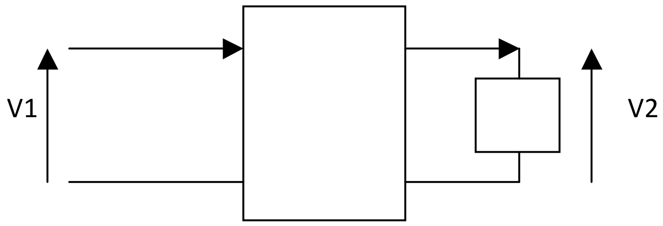
$\underline{Y} = Y\ e^{j\Phi}$

$\underline{T}\ (j\omega) = \underline{Y}\ /\ \underline{X} = T\ (\omega)\ \ e^{\ j\Phi(\omega)}$

Amplitude de la fonction de transfert = module de T(ω) = I T (jω) I

Phase de la fonction de transfert = argument Φ(ω) = Arg T (jω)

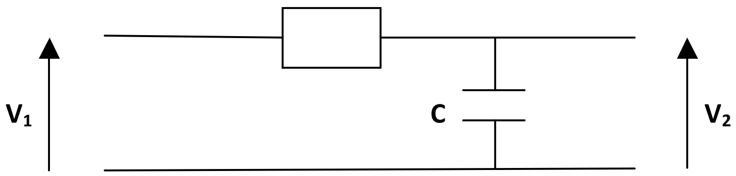
Cas du filtre :



Atténuation A = 20 log V1 / V2

Un filtre est stable lorsque le signal d'entrée étant constant, le signal de sortie atteint une valeur constante après le « temps d'induction » nécessaire.

Exemple : filtre passe bas (passif)



R : résistance exprimée en ohms (Ω)

C : capacité (condensateur) exprimée en farads

{Circuit équivalent : on remplace R par un bobinage (self) et C par R}

$T\ (j\omega) = V_2\ /\ V_1$

$= (1\ /\ j\ C\omega\ )\ /\ [R + (1\ /\ j\ C\omega)]$

$= 1\ /\ (1 + jRC\omega)$

$= (1 - jRC\omega\ )\ /\ (1 + R^2\ C^2\ \omega^2)$

Module $\mathrm{I}\ T\ (j\omega)\ \mathrm{I} = (1 + R^2\ C^2\ \omega^2)^{1/2}\ /\ \ (1 + R^2$

Argument $\Phi\ (\omega) = \text{arc tg } RC\omega$

$T\ (j\omega) = \mathrm{I}\ T\ (j\omega)\ \mathrm{I}\ \ e^{j\ \Phi(\omega)}$

Filtre passe haut (passif)

En inversant R et C sur le schéma,