

ANNEXES

Annexe I : Transformées de Fourier

A) Théorème de Fourier

Le théorème de Fourier est exprimé par la relation suivante :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi i f t} dt$$

et sa réciproque :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{2\pi i f t} df$$

$x(t)$ ou signal est une fonction du temps t ; $X(f)$ ou spectre de $x(t)$ est une fonction de la fréquence f ; e est la base du logarithme népérien ($e = 2,718\dots$) ; i est le nombre imaginaire tel que $i^2 = -1$.

Si t est mesuré en secondes, f est exprimé en Hz (nombre de cycles par seconde).

La relation d'Euler permet d'exprimer le terme exponentiel comme étant la somme de deux fonctions trigonométriques. Le cosinus en est la partie réelle et le sinus en est la partie imaginaire :

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i \sin(\theta)$$

Si on pose $\theta = 2\pi f t$,

$$e^{i2\pi f t} = \cos(2\pi f t) + i \sin(2\pi f t)$$

B) Transformée de Fourier discrète (DFT)

Le calcul de la DFT s'effectue sur une séquence $x(n)$ de N échantillons.

La DFT permet de calculer les coefficients a_k et b_k permettant d'établir la relation :

$$x(n) = \sum_{k=-N/2}^{+N/2} a_k \cos(k\omega n) + b_k \sin(k\omega n) \quad (1)$$

avec $\omega = 2\pi/N$

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos(k\omega n)$$

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin(k\omega n)$$

Dans la relation (1) la DFT donne à la fois les amplitudes et les phases des composants de fréquences positives et négatives. Pour la fonction cosinus qui est paire, il n'y a pas lieu de distinguer les fréquences positives des fréquences négatives. Pour la fonction sinus, une fréquence négative donnera l'opposé de l'amplitude de la fréquence opposée. Si l'on ne désire que des fréquences positives, il faut multiplier leurs amplitudes par deux.

La définition de la DFT est la suivante :

$$\begin{aligned} DFT[x(n)] &= X(k) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-i\omega nk} \text{ avec } 0 \leq k \leq N-1 \end{aligned} \quad (2)$$

avec $\omega = 2\pi/N$ et $e^{-i\omega nk} = \cos(\omega nk) - i \sin(\omega nk)$.

Sa réciproque est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} DFT^{-1}[X(k)] &= x(n) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{i\omega nk} \text{ avec } 0 \leq n \leq N-1 \end{aligned} \quad (3)$$

Si l'on note $X(k)$ sous la forme $a_k + ib_k$, on obtient l'amplitude de $X(k)$:

$$|X_k| = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

et la phase de $X(k)$:

$$\arg[X(k)] = \text{pha}[X(k)] = \tan^{-1}\left(\frac{b_k}{a_k}\right)$$

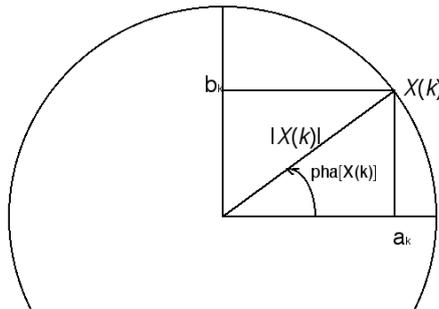


figure 1 : interprétation graphique de la valeur de $X(k)$

La fréquence f_k correspondant à l'index k peut être calculée à partir de la fréquence fondamentale de l'analyse (ou fréquence de l'analyse). Pour une DFT portant sur une fenêtre de N échantillons, cette fréquence fondamentale est égale à R/N , R étant la fréquence d'échantillonnage du son.

$$f_k = kR/N \text{ avec } 0 \leq k \leq N-1$$

Lorsque k vaut $N/2$, on obtient la fréquence $R/2$ que l'on peut remplacer par son opposé $-R/2$ et, au-delà de $N/2$, on obtient les fréquences $f = kR/N$ équivalentes à $-(N-k)R/N$.

k	f(Hz) = kR/8	
0	0	
1	R/8	
2	2R/8	
3	3R/8	
4	R/2	-R/2
5	5R/8	-3R/8
6	6R/8	-2R/8
7	7R/8	-R/8

tableau 1 : tableau de correspondance entre les indices k et les fréquences étudiées par l'analyse.

Annexe II : Algorithmes pour l'extraction de pics

La recherche de pics est une technique utilisée pour réduire l'information contenue dans une analyse FFT et pour améliorer la résolution fréquentielle de l'analyse.

Dans le programme « findpeak », mis au point par Pierre-François Baisnée [Baisnée-1988b], trois algorithmes sont proposés. Ils mettent en œuvre trois paramètres de contrôle : **un seuil de distance minimum** D entre l'amplitude d'un pic candidat et les amplitudes de ses voisins ; **l'amplitude minimum** A_0 en dessous de laquelle une raie de fréquence ne peut être un pic ; **un nombre n de raies voisines** situées de part et d'autre de la raie candidate permettant de tester l'importance de la raie centrale.

Dans le premier algorithme, une raie de fréquence est assimilée à un pic si elle est supérieure à la valeur minimale A_0 et si les $2n$ raies voisines sont inférieures à cette raie d'au moins D dB.

Dans le deuxième algorithme, les $2n$ raies voisines de la raie centrale doivent être inférieures à cette raie et au moins l'une d'entre elles inférieure à la raie centrale de plus de D dB.

Dans le troisième algorithme, les $2n$ raies voisines de la raie centrale doivent être inférieures à la raie centrale et la moyenne des amplitudes de ces $2n$ raies doit être inférieure à l'amplitude de la raie centrale de plus de D dB.

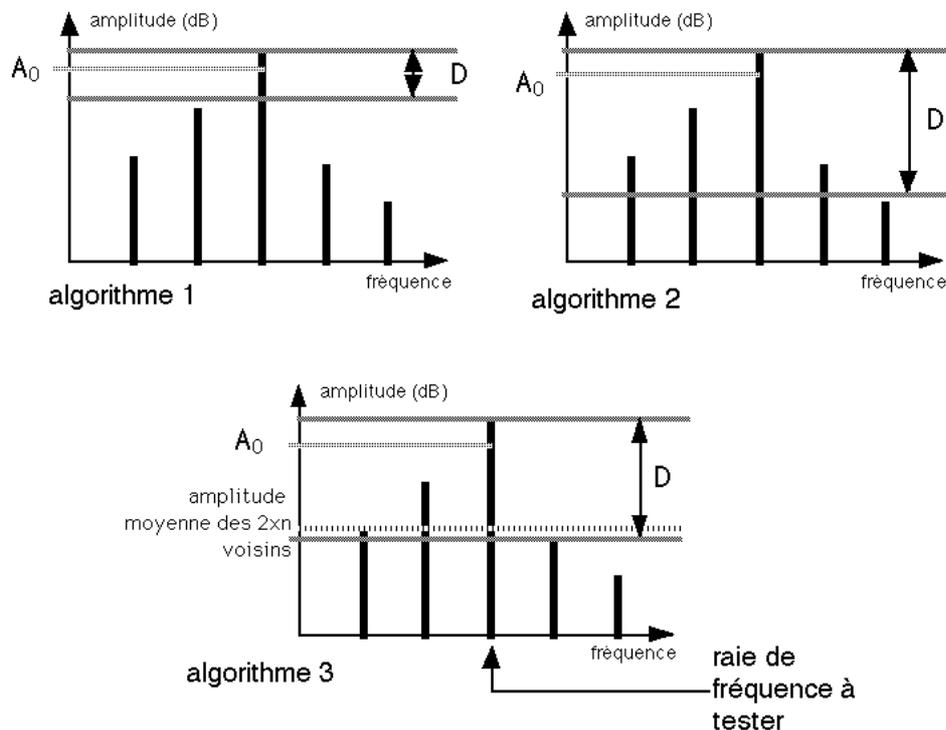


figure 2 : algorithmes de sélection des pics à partir d'une FFT

Lorsqu'un pic est détecté, sa fréquence exacte est calculée par interpolation suivant la méthode de Lagrange, à l'aide d'un polynôme du troisième ordre passant par quatre points de coordonnées également espacés et dont on calcule l'ordonnée du maximum local.

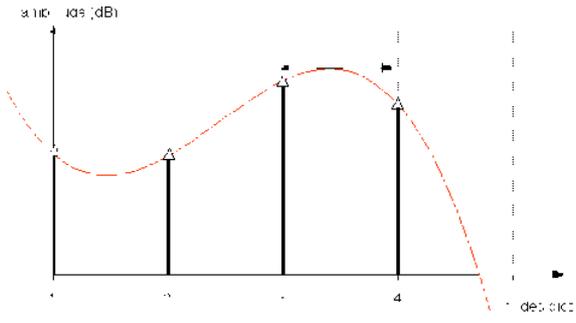


figure 3 : obtention du maximum par interpolation avec la méthode de Lagrange

Annexe III : Algorithmes de Terhardt pour la détection des hauteurs virtuelles perçues

Ernst Terhardt a mis au point une série d'algorithmes permettant d'extraire, dans l'analyse FFT d'un son, des paramètres significatifs pour la perception [Terhardt—1982].

A) Evaluation des effets de masquage

Les masquages mutuels des composantes spectrales ont principalement deux effets : d'une part ils rendent certaines composantes spectrales inaudibles ou ils en diminuent l'audibilité et d'autre part ils peuvent légèrement décaler la hauteur des composantes perceptibles.

Le degré auquel une composante spectrale est « auditivement significative » est donné par un « excès d'amplitude » noté LX . Cet excès est défini comme étant la différence entre l'amplitude de cette composante et une amplitude qui représente la puissance de masquage du reste du spectre, en tenant compte de la sélectivité fréquentielle de l'oreille.

Pour le $\mu^{\text{ème}}$ composant, l'excès d'amplitude $LX_{\mu} (1 \leq \mu \leq N)$ s'exprime par :

$$LX_{\mu} = L_{\mu} - 10 \log \left[\left(\sum_{\substack{v=1 \\ v \neq \mu}}^N 10^{L_{Ev}(f_{\mu})} \right)^2 + 10^{L_{TH}(f_{\mu})} \right] dB \quad (1)$$

L_{μ} est l'amplitude, déterminée par l'algorithme d'extraction des pics ; $L_{Ev}(f_{\mu})$ est le niveau d'excitation produit à la fréquence LX_{μ} par la $v^{\text{ème}}$ composante spectrale ; $L_{TH}(f_{\mu})$ est le seuil d'audibilité à la fréquence f_{μ} .

Le niveau d'excitation, $L_{Ev}(f_{\mu})$ est spécifié par :

$$L_{Ev}(f_{\mu}) = L_v - s(z_v - z_{\mu}) \quad (2)$$

L_v est l'amplitude de la $v^{\text{ème}}$ composante spectrale. Le symbole z représente le taux de bande critique « critical-band rate » ; z_v et z_{μ} sont donc respectivement les taux de bande critique des $v^{\text{ème}}$ et $\mu^{\text{ème}}$ composantes. La relation entre la fréquence et le taux de bande critique est donnée par la relation :

$$z = \left[13 \tan^{-1}(0,76 \cdot f) + 3,5 \tan^{-1}\left(\frac{f}{7,5}\right)^2 \right] \text{Bark} \quad (3)$$

f est la fréquence. Dans ce paragraphe, les fréquences seront toujours exprimées en kHz.

L'équation (2) peut être représentée par une courbe triangulaire dont la pente est donnée par le paramètre s . Lorsque $f_{\mu} < f_v$, la pente est indépendante de la fréquence et de l'amplitude, lorsque $f_{\mu} > f_v$, la pente dépend de l'amplitude et, plus faiblement, de la fréquence.

$$s = 27 \text{dB/Bark} \quad \text{pour } f_{\mu} < f_v$$

$$s = \left[-24 - \frac{0,23}{f_v} - 0,2L_v \right] \text{dB/Bark} \quad \text{pour } f_{\mu} > f_v$$

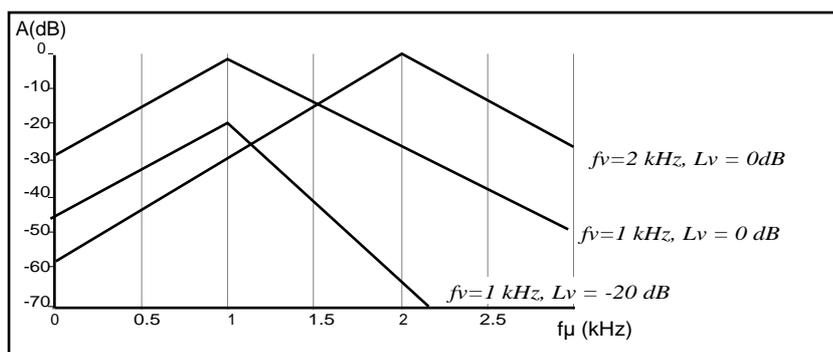


figure 4 : courbes de masquage d'un composant de fréquence f_{μ} par un composant de fréquence f_v pour différentes valeurs de fréquences et d'amplitudes du composant v

Le seuil d'audibilité « threshold of hearing », qui est représenté par LX_{μ} dans l'équation (1) est donné par la formule :

$$L_{TH}(f_{\mu}) = 3,64 \cdot f_{\mu}^{-0,8} - 6,5 \cdot e^{-0,6(f_{\mu}-3,3)^2} + 10^{-3} \cdot f_{\mu}^4 \text{ dB}$$

L'évaluation des effets de masquage (équations (1) à (4)) pour toutes les composantes spectrales ($\mu = 1$ à N) fournit un spectre réduit formé d'un ensemble de fréquences et de leur excès d'amplitude LX_{μ} . Les valeurs positives de LX_{μ} indiquent des composantes audibles alors que des valeurs négatives ou nulles sont considérées comme non perçues.

B) Décalages de hauteur

Les algorithmes de Terhardt incluent des fonctions qui permettent de calculer la hauteur perçue d'un son. Dans le cas général, les hauteurs spectrales perçues ne sont pas exactement les mêmes que les hauteurs perçues dans le cas de sons purs ayant les mêmes fréquences. Cela est dû aux interactions existant entre les composantes du spectre qui sont perçues simultanément par le système auditif. De plus, la hauteur perçue dépend de l'amplitude du son ainsi que l'ont démontré les études réalisées dans le cas de sons purs. Terhardt donne pour la hauteur perçue de la $\mu^{\text{ème}}$ composante spectrale la relation suivante :

$$LX_{\mu} = f \cdot (1 + v_{\mu}) \text{ pu} \quad (5)$$

La hauteur est mesurée sur une échelle proportionnelle à la fréquence en « pitch unit » ou « pu ». Le décalage en fréquence est représenté par v_{μ} et sa valeur est au maximum de quelques pour-cent. Pour les spectres de sons complexes, v_{μ} est donné par la formule :

$$v_{\mu} = 2 \cdot 10^{-4} (L_{\mu} - 60) (f_{\mu} - 2) + 1,5 \cdot 10^{-2} e^{\left(\frac{-LX'_{\mu}}{20}\right)} \times (3 - \ln f_{\mu}) + 3 \cdot 10^{-2} e^{\left(\frac{-LX''_{\mu}}{20}\right)} \times (0,36 + \ln f_{\mu}) \quad (6)$$

L_{μ} et f_{μ} sont respectivement l'amplitude et la fréquence de la $\mu^{\text{ème}}$ composante spectrale. LX'_{μ} et LX''_{μ} sont des représentations spécifiques de l'excès d'amplitude qui tiennent compte de l'interférence de la composante spectrale considérée avec les composantes de fréquences inférieures pour LX'_{μ} et de fréquences supérieures pour LX''_{μ} . Les formules en sont :

$$LX'_\mu = L_\mu - \log\left(\sum_{v=1}^{\mu-1} 10^{L_{Ev}(f_\mu)}\right) dB$$

$$LX''_\mu = L_\mu - \log\left(\sum_{v=\mu+1}^N 10^{L_{Ev}(f_\mu)}\right) dB$$

Le calcul de ν_μ n'est nécessaire que pour les composantes spectrales dont l'excès d'amplitude est supérieur à zéro.

C) Poids perceptifs

Le poids indiquant l'importance avec laquelle chaque composant participe à la perception sonore globale dépend de l'excès d'amplitude et de la fréquence du composant. Précédemment, l'excès d'amplitude servait de critère binaire (positif ou négatif). Dans cette dernière phase de l'algorithme, le poids perceptif de la $\mu^{\text{ème}}$ composante spectrale est donné par :

$$WS_\mu = \left(1 - e^{\frac{-LX_\mu}{15}}\right) \cdot \left(1 + 0,07\left(\frac{f_\mu}{0,7} - \frac{07}{f_\mu}\right)^2\right)^{-1} \quad \text{si } LX_\mu \geq 0 \quad (8a)$$

$$WS_\mu = 0 \quad \text{si } LX_\mu < 0 \quad (8b)$$

Le premier facteur de l'équation (8a) rend compte de l'excès d'amplitude de manière à ce que le poids perceptif WS augmente avec les LX croissantes. Le second facteur représente l'influence de la position de la composante spectrale sur l'axe des fréquences et tient compte du phénomène de dominance spectrale. Ce facteur montre qu'à amplitudes égales, les fréquences ne sont pas perçues comme ayant la même intensité selon la région du spectre où elles se situent. La figure suivante montre les variations de la dominance spectrale en fonction de la fréquence.

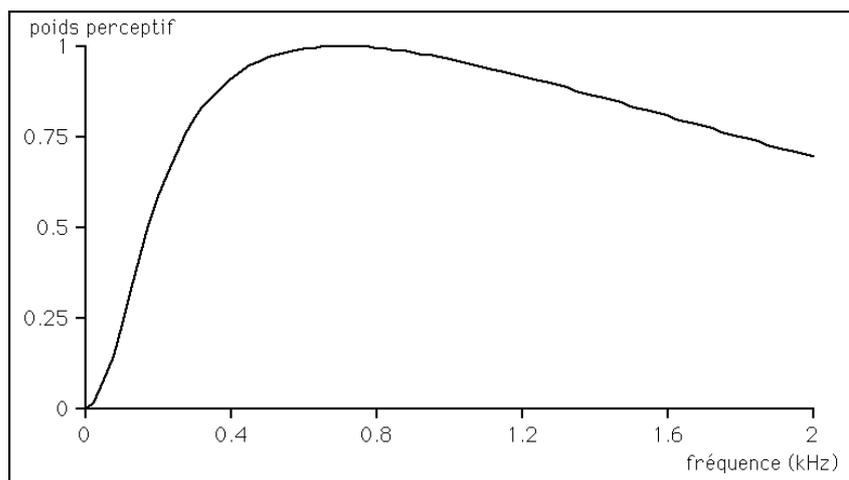


figure 5 : courbe de dominance spectrale

Annexe IV : Instruments Csound

A) Instrument additif élémentaire

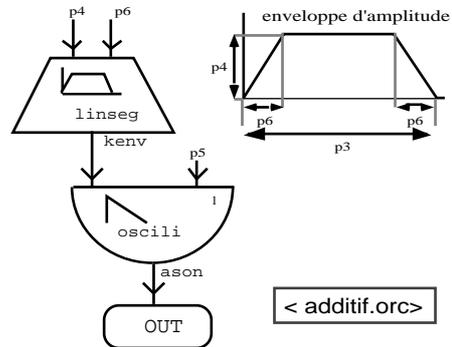


figure 6 : schéma d'un instrument additif pour le programme Csound

instrument « additif.orc »

instr 1

kenvamp	linseg	0, p6, p4, p3-2*p6, p4, p6, 0
ason	oscili	kenvamp, p5, 1
out	out	ason

endin

partition « add.sco » (exemple sonore n° 22)

; forme d'onde :

f1 0 1024 10 1

; partiels :

i1 0 3 3276.0 220 1

i1 0 3 3276.0 440 1

i1 0 3 3276.0 660 1

i1 0 3 3276.0 880 1

i1 0 3 3276.0 1100 1

i1 0 3 3276.0 1320 1

i1 0 3 3276.0 1540 1

i1 0 3 3276.0 1760 1

i1 0 3 3276.0 1980 1

i1 0 3 3276.0 2200 1

e

B) Instruments additifs sur un modèle résonant « resons.orc »

orchestre « resons.orc »

```
instr 1
; synthèse additive, enveloppe résonante exp. décr.
kamp1    linseg    0, 0.01, 1, p3-0.01, 1
kamp2    expseg    1, p3, 0.0001
kenvamp  =         kamp1 * kamp2 * p4
ason     oscili    kenvamp, p5, p6
          out      ason * 32767
endin
```

```
instr 2
; synthèse additive, enveloppe résonante exp. croissante.
kamp1    linseg    1, p3-0.01, 1, 0.01, 0
kamp2    expseg    0.0001, p3, 1
kenvamp  =         kamp1 * kamp2 * p4
ason     oscili    kenvamp, p5, p6
          out      ason * 32767
endin
```

```
instr 3
; synthèse additive, enveloppe résonante exp. décr. glissando
kgliss   linseg    p5, p3, p6
kamp1    linseg    0, 0.01, 1, p3-0.01, 1
kamp2    expseg    1, p3, 0.0001
kenvamp  =         kamp1 * kamp2 * p4
ason     oscili    kenvamp, kgliss, p7
          out      ason * 32767
endin
```

```
instr 4
; synthèse additive, enveloppe résonante avec sustain et vibrato.
kenvvib  linseg    0, p9, p7, p3-p9, 0
kvib     oscili    kenvvib, p8, 1
kvib     =         1+kvib
kamp1    linseg    0, 0.01, 1, p3-0.02, 1, 0.01, 0
kamp2    expseg    p9, 1/2, p3-p9, 1
kenvamp  =         kamp1 * kamp2 * p4
ason     oscili    kenvamp, p5*kvib, p6
          out      ason * 32767
endin
```

En fonction de l'instrument auquel une ligne de la partition s'adresse, le nombre de paramètres varie. Voici un exemple de partition dont chaque ligne s'adresse à un instrument différent (cf. exemple sonore n° 25) :

```
; onde sinus
f1 0 1024 10 1
; instr1    date    dur    amp    freq    onde
i1          3      2.14  0.012 173    1
; instr2    date    dur    amp    freq    onde
i2          3      2.14  0.012 173    1
; instr3    date    dur    amp    freq1   freq2   onde
i3          3      2.14  0.012 173    190    1
; instr4    date    dur    amp    freq    onde    viba vibf durattvib durvibsust
i4          3      2.14  0.012 173    1      0.1  5    1    1
e
```

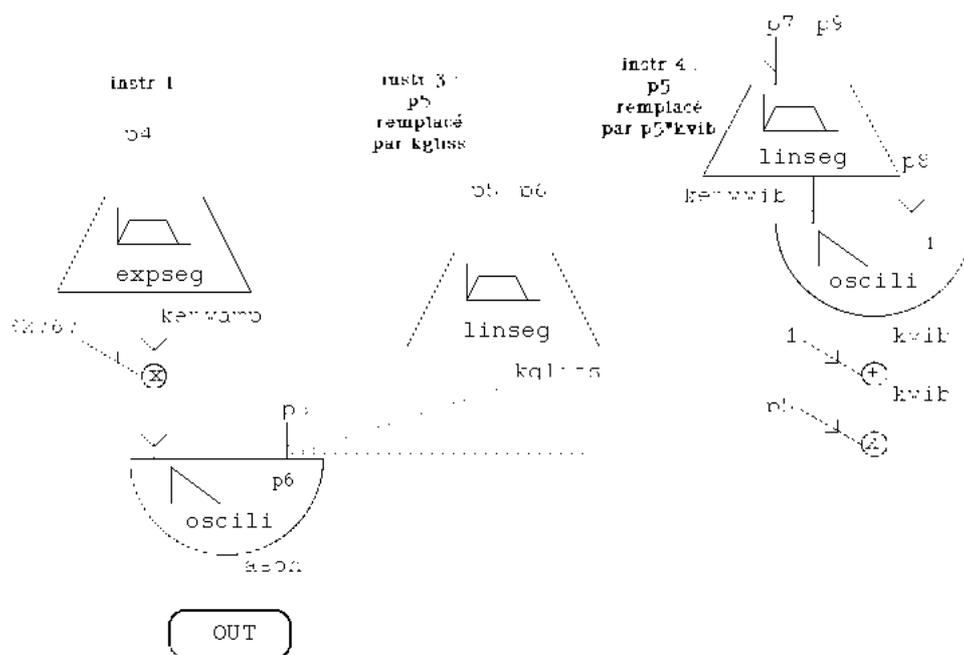


figure 7 : schémas des différents instruments utilisés par l'orchestre « resons.orc ».

Chaque instrument dispose d'enveloppes différentes :

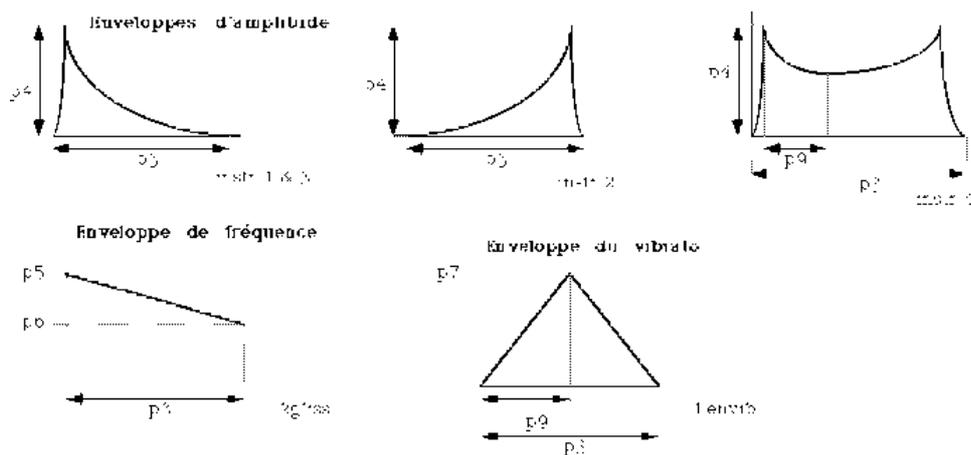


figure 8 : enveloppes utilisées pour l'orchestre « resons.orc ».

C) Instrument « filt-basic-vpm.orc »

Instrument utilisé pour le filtrage avec Csound dans la pièce « En Trance » de Fausto Romitelli (cf. exemple sonore n° 62).

```
sr = 44100
kr = 882
ksmps = 50
nchnls = 1
```

```
; -> entrer le nom du son
; -> entrer une valeur de scaling
; p4 = amp du filtre
; p5 = freq du filtre
; p6 = attaq dur (bw)
; p7 = decay begin time (bw)
; p8 = bandwidth ref
; p9 = bandmax/bandref (scaling factor)
```

```
instr 1
iscaling      =      0.00008      ;**** amplitude correction ****
iamp          =      p4           ; inits
ifreq        =      p5
iatt         =      p6
idec         =      p3 - p7
isust        =      p7 - p6
iband        =      p8
ibwsc        =      p9

ifrand       =      500           ; jitter
iarand       =      0.03          ;intense
;iarand      =      0.01          ;moyen
;iarand      =      0.004         ;faible

asndin       soundin "son_à_filtrer"
;asndin      soundin "bruit.aiff"      ; pour tests

kalea        randi   iarand, ifrand

kband        linseg  iband*ibwsc, iatt, iband, isust, iband, idec, iband*ibwsc
kamp         =      sqrt(kband)*iamp/sqrt(iband)

asig         reson   asndin, ifreq * (1+kalea), kband
asig         =      asig * kamp * iscaling

out          asig
endin
```

l;p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10
i1	0	2.3000	0.1154	273	0.0100	1.0000	99	99	2.5626
i1	0	2.3000	0.0903	819	0.4463	0.9945	99	99	1.8490
i1	0	2.3000	0.1346	1092	0.6712	0.9917	99	99	3.8177
i1	0	2.3000	0.2233	1638	0.8534	0.9894	99	99	1.0122
i1	0	2.3000	0.3563	2457	1.0122	0.9874	99	99	0.4463
i1	0	2.3000	0.4449	3003	1.1558	0.9856	99	99	2.3978
i1	0	2.3000	0.5336	3549	1.2883	0.9840	99	99	3.7556
i1	0	2.3000	0.6666	4368	1.4122	0.9824	99	99	2.6424
i1	0	2.3000	0.7692	5187	1.5291	0.9810	99	99	2.1353
i1	0	2.3000	0.7692	6006	1.6404	0.9796	99	99	3.1618
i1	0	2.3000	0.7692	6552	1.7467	0.9782	99	99	2.4812
i1	0	2.3000	0.7692	7371	1.8490	0.9770	99	99	3.5000
i1	0	2.3000	0.7692	8463	1.9475	0.9757	99	99	3.3675
i1	0	2.3000	0.7692	9282	2.0428	0.9745	99	99	2.7973
i1	0	2.3000	0.7692	10101	2.1353	0.9734	99	99	1.1558
i1	0	2.3000	0.7692	10920	2.2251	0.9722	99	99	0.0100
i1	0	2.3000	0.7692	12012	2.3125	0.9711	99	99	1.7467
i1	0	2.3000	0.7692	12831	2.3978	0.9701	99	99	2.9467
i1	0	2.3000	0.7692	13923	2.4812	0.9690	99	99	2.0428
i1	0	2.3000	0.7692	14742	2.5626	0.9680	99	99	3.6293
i1	0	2.3000	0.7692	15834	2.6424	0.9670	99	99	3.0912
i1	0	2.3000	0.7692	16926	2.7206	0.9660	99	99	2.7206
i1	0	2.3000	0.7692	17745	2.7973	0.9651	99	99	0.8534
i1	0	2.3000	0.7692	18837	2.8727	0.9641	99	99	2.3125
i1	0	2.3000	0.1579	440	2.9467	0.9632	99	99	0.6712
i1	0	2.3000	0.2349	1320	3.0195	0.9623	99	99	1.9475
i1	0	2.3000	0.3326	1760	3.0912	0.9614	99	99	3.6928
i1	0	2.3000	0.5282	2640	3.1618	0.9605	99	99	3.0195
i1	0	2.3000	0.8215	3960	3.2313	0.9596	99	99	1.2883
i1	0	2.3000	1.0171	4840	3.2998	0.9588	99	99	1.5291
i1	0	2.3000	1.0526	5720	3.3675	0.9579	99	99	1.6404
i1	0	2.3000	1.0526	7040	3.4342	0.9571	99	99	3.9398
i1	0	2.3000	1.0526	8360	3.5000	0.9563	99	99	3.2313
i1	0	2.3000	1.0526	9680	3.5650	0.9555	99	99	2.8727
i1	0	2.3000	1.0526	10560	3.6293	0.9546	99	99	3.4342
i1	0	2.3000	1.0526	11880	3.6928	0.9538	99	99	4.0000
i1	0	2.3000	1.0526	13640	3.7556	0.9531	99	99	3.5650
i1	0	2.3000	1.0526	14960	3.8177	0.9523	99	99	1.4122
i1	0	2.3000	1.0526	16280	3.8791	0.9515	99	99	3.2998
i1	0	2.3000	1.0526	17600	3.9398	0.9508	99	99	2.2251
i1	0	2.3000	1.0526	19360	4.0000	0.9500	99	99	3.8791
e									

tableau 2 : partition pour l'instrument filtre.

D) Instrument « mn3-env.orc »

Instrument utilisé pour la synthèse additive avec Csound dans la pièce « En Trance » de Fausto Romitelli (cf. exemple sonore n° 58).

; from "Synthétiseur <mn3>" LP mai 1992 IRCAM mod. Nov. 95
 ; p6 = tab pour ampl

sr = 44100
 kr = 4410
 ksmps = 10
 nchnls = 2

instr 1

iamp	=	p4 * 32767	
ifreq	=	p5	
ipan	=	frac(p2*10)	
kpan	linseg	ipan, p3, 1-ipan	
kenv	oscil1	0, iamp, p3, p6	
kfenv	oscil1	0, ifreq, p3, 50	
klfoenv	linseg	0, p3/2, 0.01, p3/2, 0	
klfo	oscil	klfoenv, 5.2, 1	
kmodf	=	0.005 * klfo	
kmoda	=	0.001 * klfo	
kalea1	randi	0.003, 100	
kalea2	randi	0.003, 320	
kalea3	randi	0.003, 1050	
kalea	=	kalea1 + kalea2 + kalea3	
kfreq	=	kfenv * (1 + kmodf) * (1 + kalea)	; fréquence résultante
kenv	=	kenv * (1 + kmoda)	
aosc1	oscil	kenv, kfreq, 1	; DCO
aosc2	oscil	kenv, kfreq, 2	; DCO
ktrans	line	1, p3, 0	
aosc	=	aosc1*ktrans + aosc2*(1-ktrans)	
afil	reson	aosc, 2*p5, 2*p5, 1	; DCF
afil	balance	afil, aosc	
;afil	=	aosc	
	outs1	afil*sqrt(1-kpan)	
	outs2	afil*sqrt(kpan)	

endin

E) Instrument « mn3-2osc.orc »

Instrument utilisé pour la synthèse par forme d'onde avec Csound dans la pièce « En Trance » de Fausto Romitelli (cf. exemples sonores n° 56, 57, 59 et 60).

```

; p6 = fund de l'analyse
; p7 = non utilisé
; p8 = n° table env amp glob.
; p9 = n° table env freq glob.
; p10 = freq filtre
; p11 = band du filtre
; p12 = freq lfo
; p13 = n° table forme d'onde lfo
; p14 = n° table env lfo
; p15 = amp de la mod sur freqs
; p16 = amp de la mod sur amps
; p17 = amp du jitter
; p18 = freq du jitter
; p19 = durosc
; p20 = dur1osc
; p21 = pan

```

```

sr = 44100
kr = 4410
ksmps = 10
nchnls = 2

```

```

instr 1
iamp      =      p4 * 32767
ifreq     =      p5

kfreq     oscil1  0, p5/p6, p3, p9 ; hauteur & porta
kenv      oscil1  0, 1, p3, p8

klfoenv   oscil1  0, 1, p3, p14
klfo      oscil   klfoenv, p12, p13
kmodf     =      p15/2 * klfo * 0.6
kmoda     =      p16 * klfo

kalea1    randi   p17, p18
kalea2    randi   p17, p18*3
kalea3    randi   p17, p18*10
kalea     =      kalea1 + kalea2 + kalea3

kfreq     =      kfreq * (1 + kmodf) * (1 + kalea) ; fréquence résultante
kenv      =      kenv * iamp * (1 + kmoda)
kenv1     linseg  1, p20, 1, p19, 0, p3-p19-p20, 0
kenv2     linseg  0, p20, 0, p19, 1, p19, 0, p3-(2*p19)-p20, 0

aosc1     oscil   kenv*kenv1, kfreq, 1 ; DCO
aosc2     oscil   kenv*kenv2, kfreq, 2 ; DCO
aosc      =      aosc1 + aosc2

afil      reson   aosc, p10, p11, 1 ; DCF
afil      balance afil, aosc

          outs1   afil*sqrt(1-p21)
          outs2   afil*sqrt(p21)

endin

```

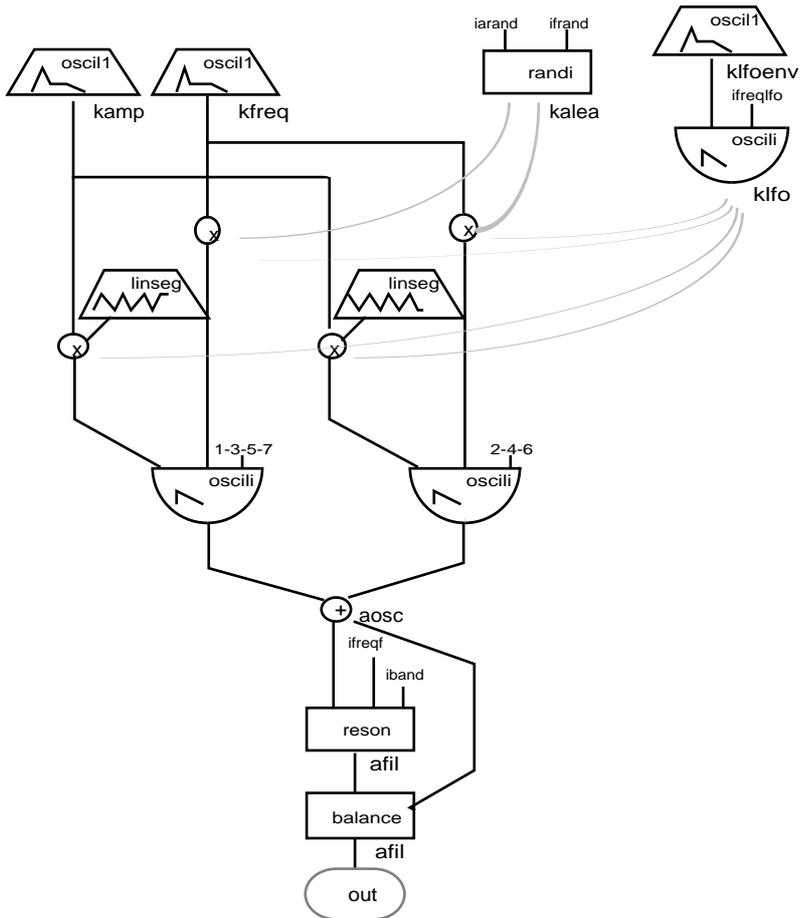


figure 9 : schéma de l'instrument "mn3-2osc.orc", synthèse par forme d'onde variable.

F) Instrument « granul-j.orc »

Instrument utilisé pour la synthèse granulaire, pour synthétiser des sons d'après des analyses de Terhardt (exemple sonore n° 28).

sr = 44100		
kr = 4410		
ksmps = 10		
nchnls = 1		

instr 1		
kamp	linseg	0, p6, p4, p3-p6, 0
ason	oscili	kamp, p5, 1
	out	ason * 32767
endin		

Annexe V : Patches PatchWork

Annexe V : Patches PatchWork

A) Modulation de fréquence

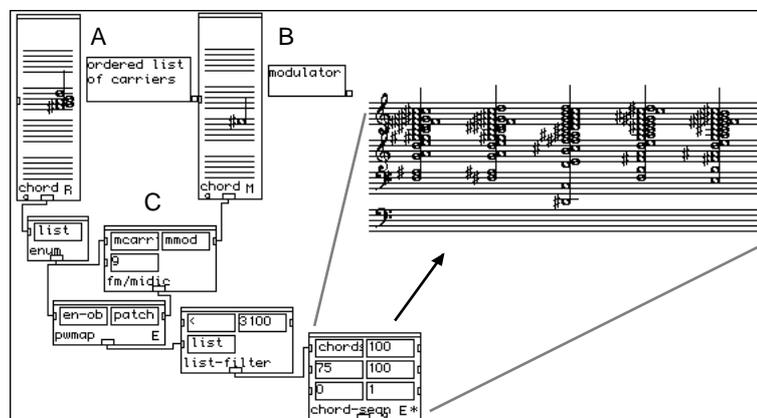


figure 10 : calcul d'un spectre par modulation de fréquence
« Gondwana » de Tristan Murail (bibliothèque Esquisse).

B) Série harmonique

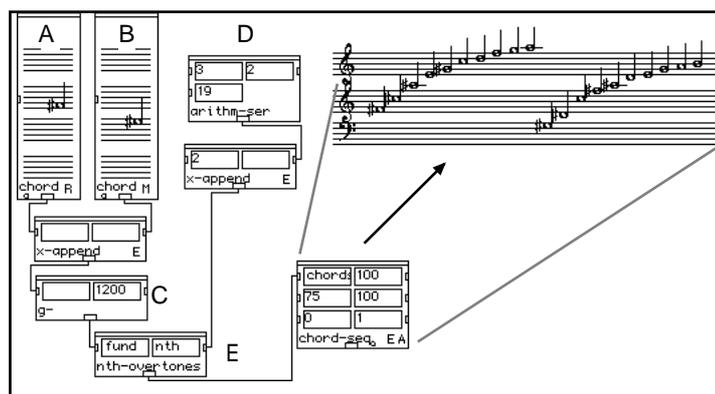


figure 11 : calcul d'une série harmonique
« Gondwana » de Tristan Murail (bibliothèque Esquisse).

C) Echantillonnage de courbes

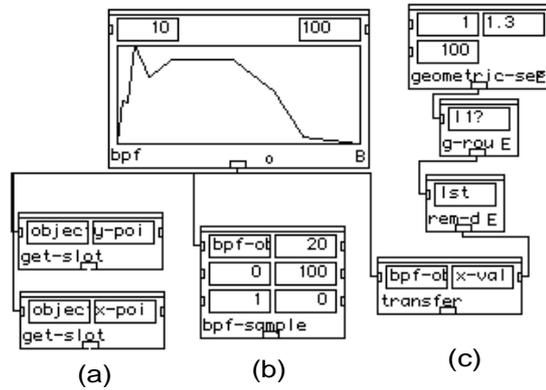


figure 12 : patch pour l'échantillonnage de courbes par segments
 (a) coordonnées des points de la courbe, (b) échantillonnage à pas constant, (c) échantillonnage sur points choisis.

D) Formatage d'une courbe pour Csound

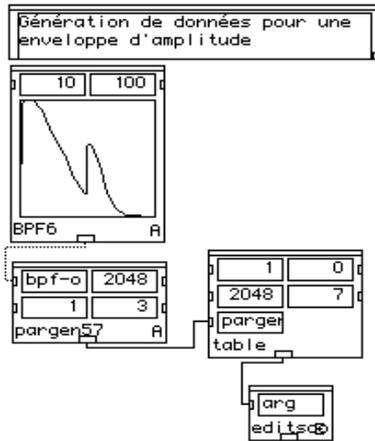


figure 13 : patch pour la production d'une table pour Csound à partir d'une BPF (bibliothèque Csound/Edit-sco).

E) Lecture de données d'analyses additives

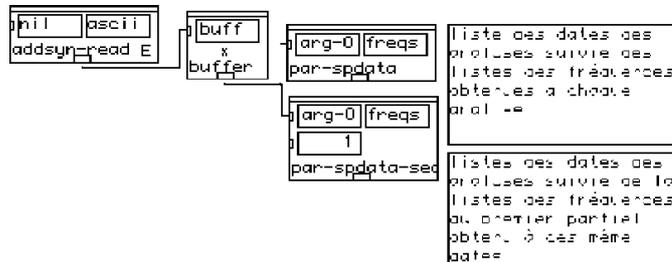


figure 14 : patch pour la lecture d'un fichier contenant des données d'analyse additive (bibliothèque SpData).

G) Interpolation de sons en synthèse additive

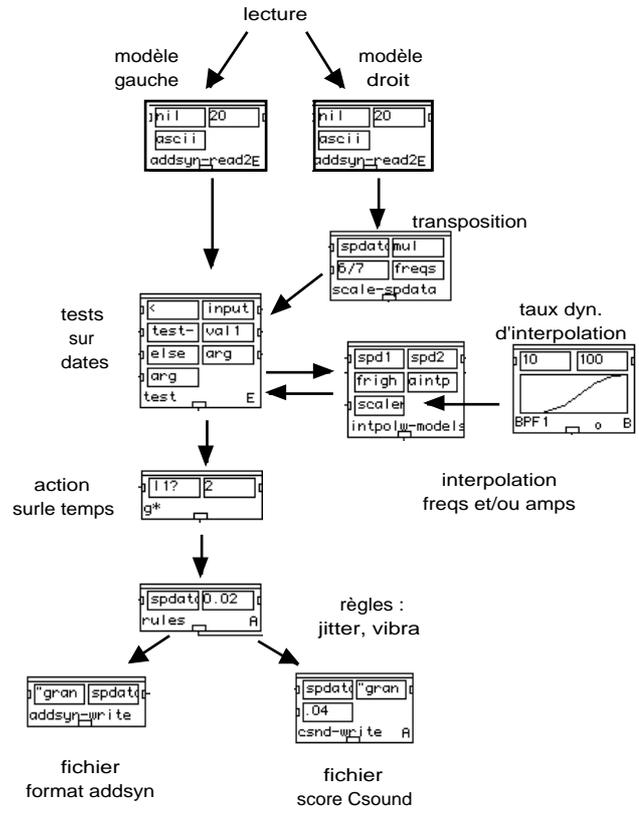


figure 16 : ordinogramme du patch utilisé pour l'interpolation de modèles de sons additifs (bibliothèques Csound/Edit-sco et SpData).

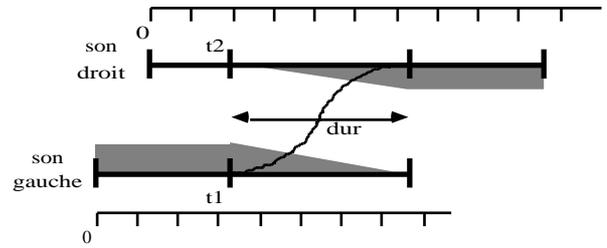


figure 17 : schéma décrivant les phases du processus d'interpolation

H) Interpolations multiples dans Chant

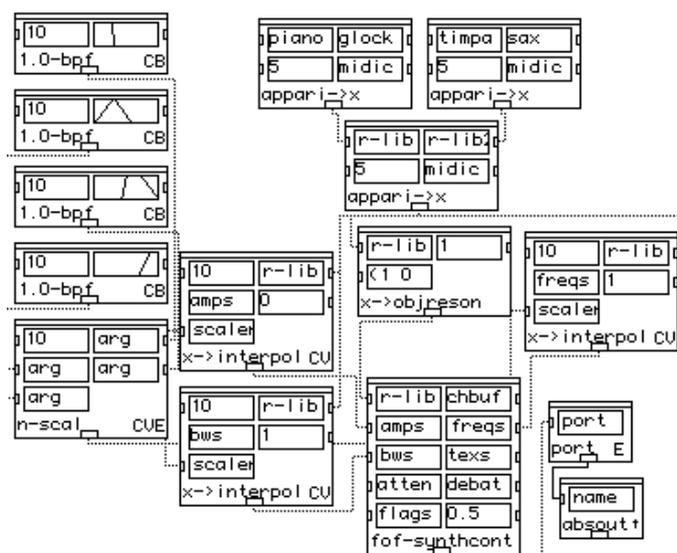


figure 18 : patch pour l'interpolation entre quatre instruments dans PW-Chant (bibliothèque PW-Chant).

I) Distorsions de séries harmoniques

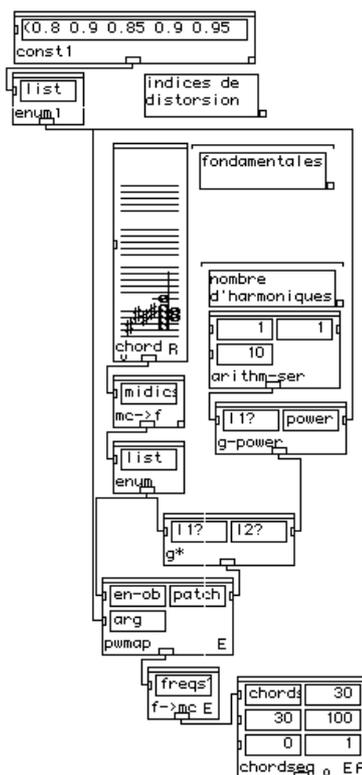


figure 19 : patch schématisé pour la distorsion de séries harmoniques (« En Trance »).

La fréquence des notes de ces accords est obtenue par la formule suivante :

$$f_n = f_0 \times n^i$$

avec f_n : fréquence du $n^{\text{ième}}$ partiel, f_0 : fréquence de la fondamentale, n : indice du partiel, i : indice de distorsion

(a)



(b)



(c)



(d)

figure 20 : (a) : les six accords de référence de la section 3D'
 La note supérieure reste constante : les accords sont étirés vers le bas.

(b) : progression harmonique sur le premier accord.

(c) : progression harmonique sur le dernier accord.

(d) : ensemble des accords utilisés pour la section 3D' pour la partie électronique et pour la partie instrumentale (exemple sonore n° 69).

J) Production d'accords sur un modèle FM

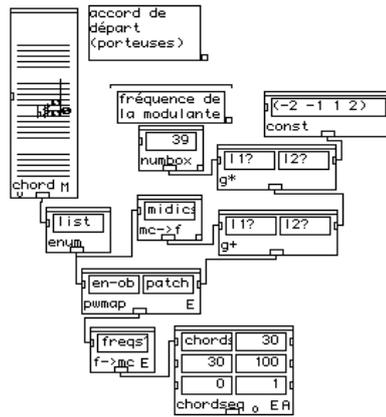


figure 21 : patch utilisé pour la production des hauteurs par modulation de fréquence (« En Trance »).

K) Synthèse additive

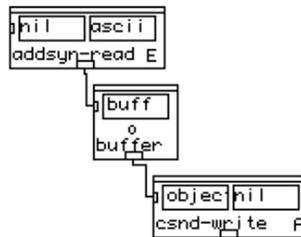


figure 22 : patch pour l'écriture d'une partition Csound pour l'instrument *granul-r.orc* à partir d'une analyse additive (bibliothèques Csound/Edit-sco et SpData).

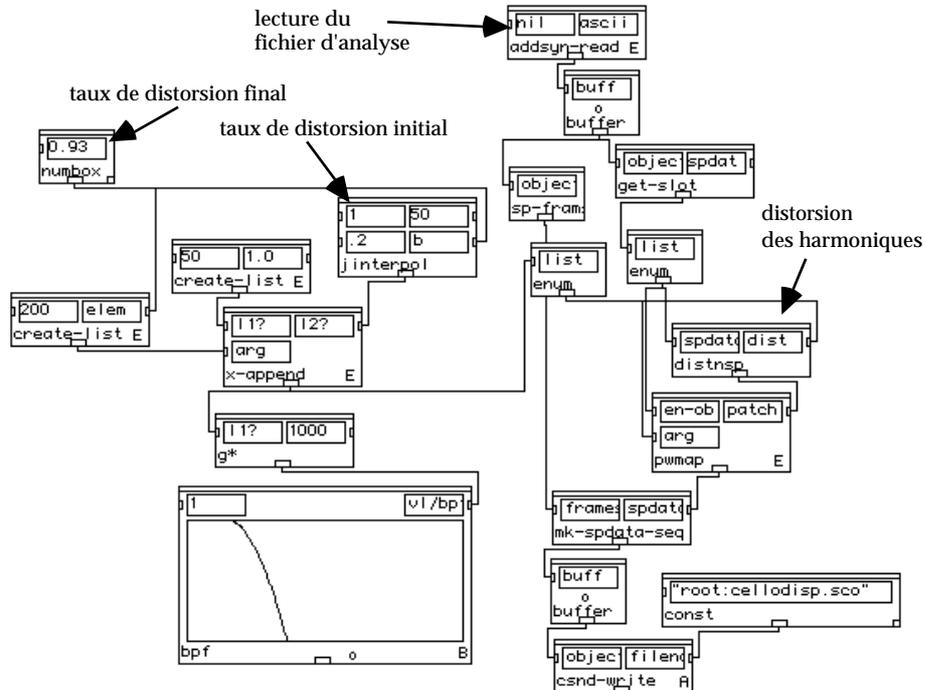


figure 23 : patch pour la production d'une partition Csound destinée à la synthèse additive avec distorsion harmonique (bibliothèques Csound/Edit-sco et SpData).

L) Interpolations de spectres avec Csound

Mikhaïl Malt a réalisé un patch démonstratif de la production de données spectrales pour le contrôle d'un dispositif de synthèse additive [Malt, Pottier—1993]. Mikhaïl Malt génère une série inharmonique par compression d'une série harmonique (taux de compression 90%) qu'il enchaîne avec une autre série inharmonique obtenue par étirement d'une autre série harmonique (expansion 115%). Le son produit est un croisement progressif entre deux spectres. On obtient un son très mouvant qui débute dans les fréquences graves puis se développe et s'achève dans les haut-médiums.

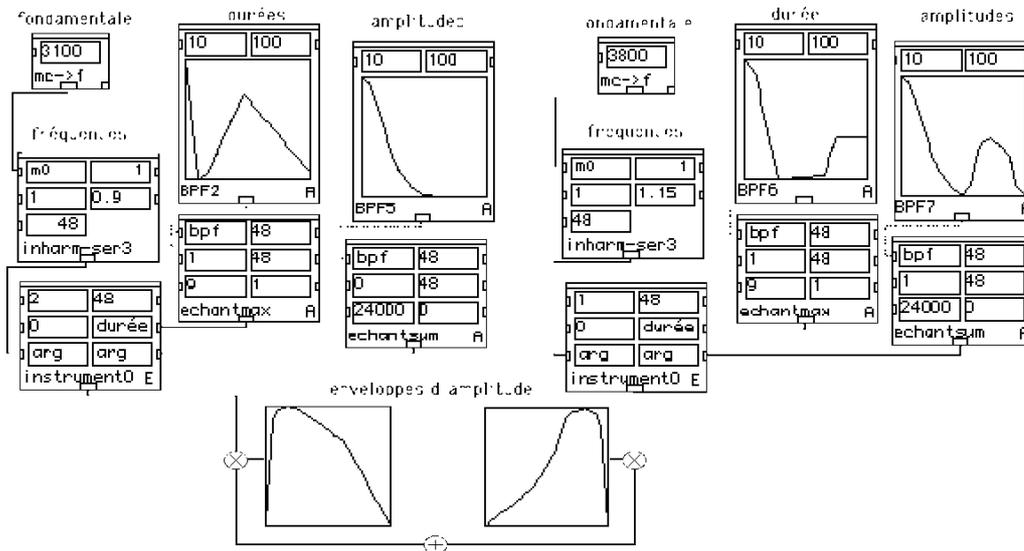


figure 24 : patch pour la synthèse d'un son additif dans lequel deux spectres se croisent (M. Malt, bibliothèque Csound/Edit-sco)(exemple sonore n° 27).

M) Synthèse avec Chant

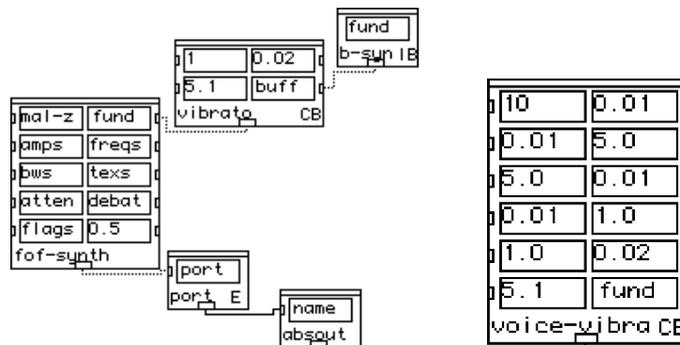


figure 25 : instrument pour la synthèse d'une voyelle avec un vibrato standard (à gauche), module « voice-vibra » pour un vibrato à caractère vocal (à droite) (bibliothèque PW-Chant)(exemple sonore n° 11).

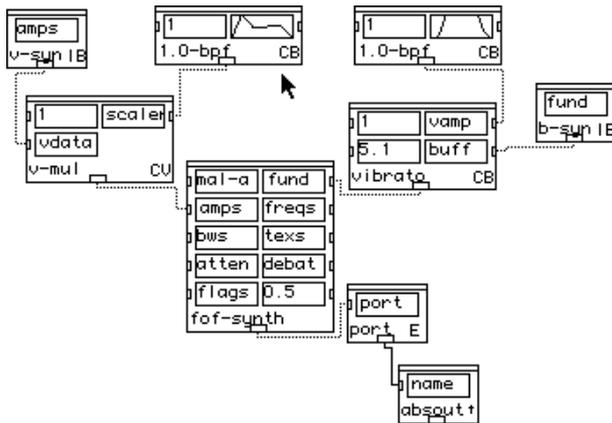


figure 26 : utilisation d'une «BPF» pour l'enveloppe du son et d'une autre pour l'intensité du vibrato (bibliothèque PW-Chant).

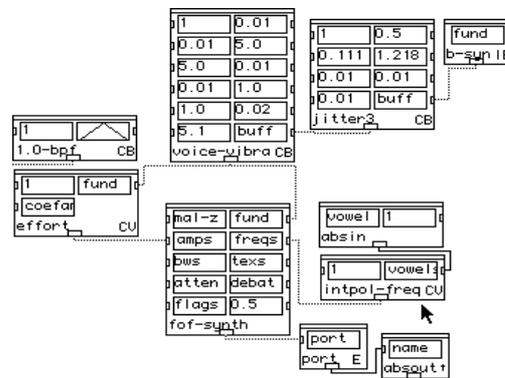


figure 27 : patch permettant des transitions entre voyelles (exemple sonore n° 13).

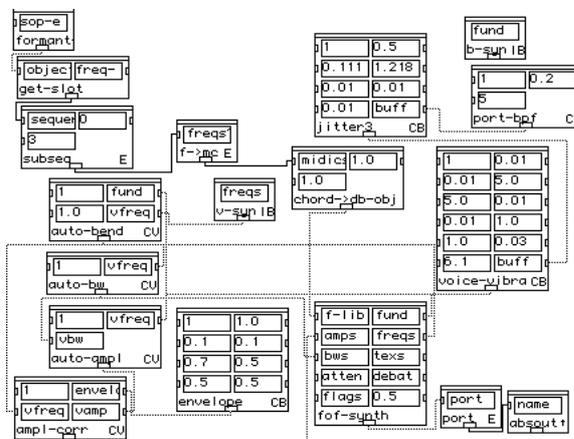


figure 28 : correction automatique des paramètres des formants suivant la hauteur et l'amplitude des notes jouées (bibliothèque PW-Chant).

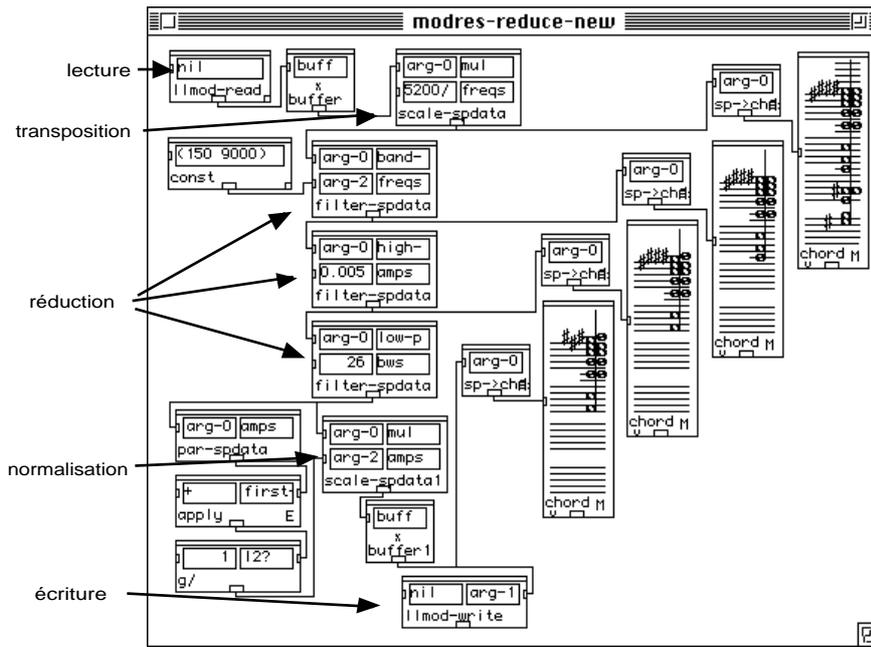


figure 29 : réduction, transposition et normalisation d'un modèle de résonance (bibliothèque SpData).

N) LiaisonPW/Max

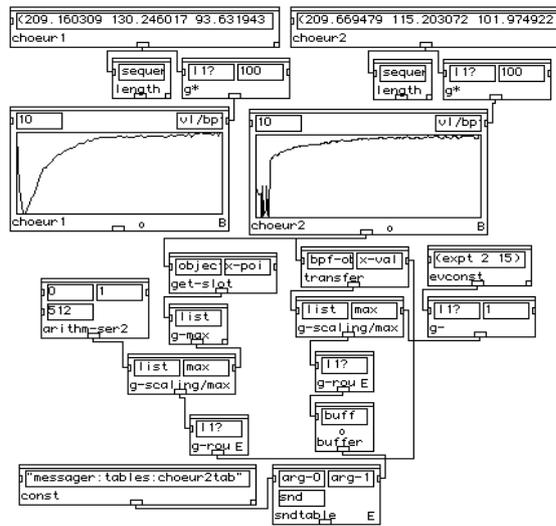


figure 30 : patch utilisant la bibliothèque PW-Max pour la construction d'une table au format Max SIM pour le module « tab1 » (bibliothèque PW-Max).

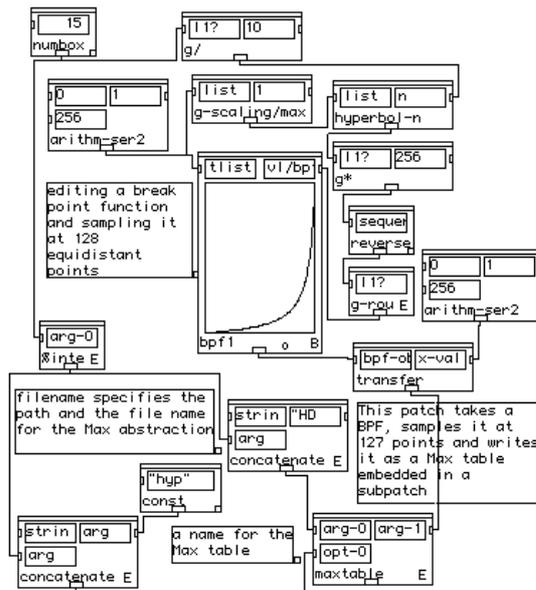


figure 31 : patch pour la construction de tables hyperboliques, enregistrées sous forme de sous-patches Max (bibliothèques PW-Max et SpData).

Annexe VI : Patches Max/SIM

A) Modifications d'une fondamentale

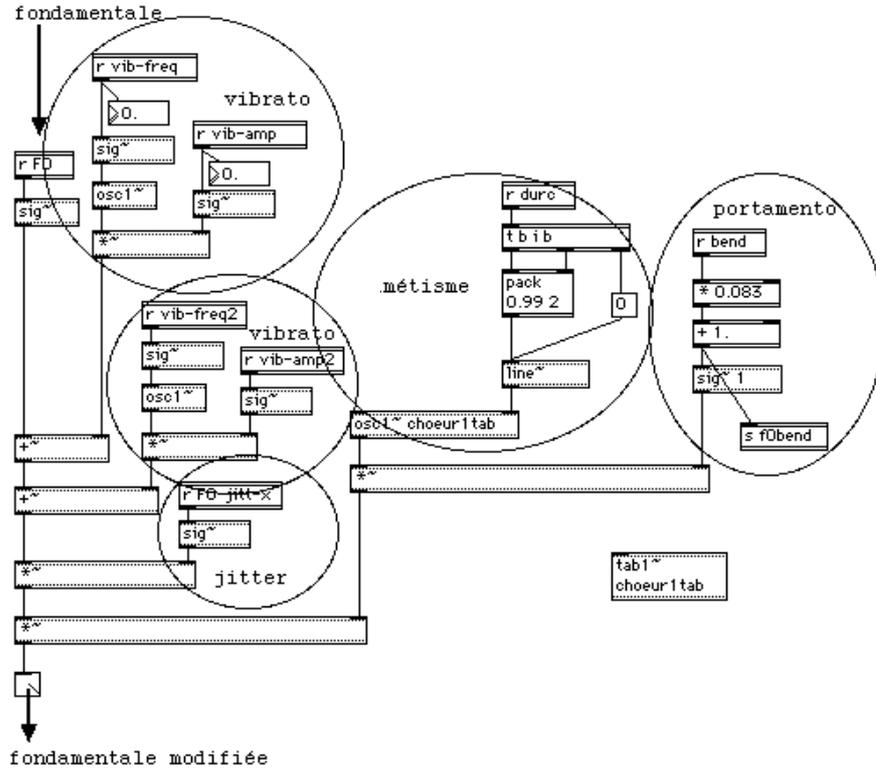


figure 33 : dispositif de modification de la fréquence fondamentale comportant deux vibratos, un « jitter », une fonction de mélisme et un « portamento ».

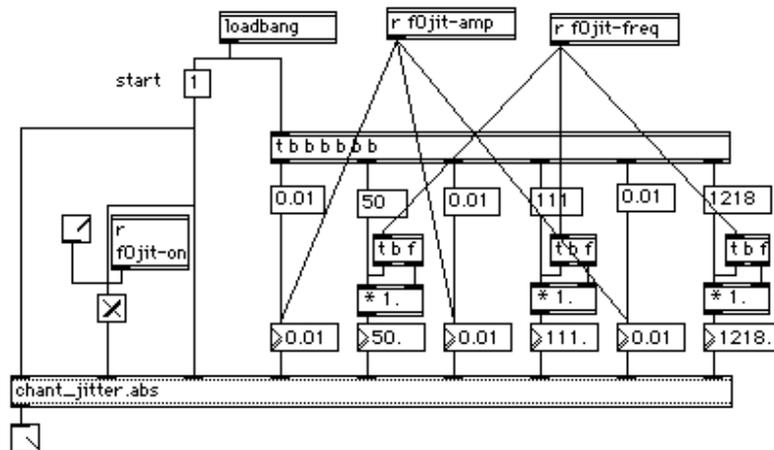


figure 34 : triple « jitter » pour modifier la fondamentale de la voix.

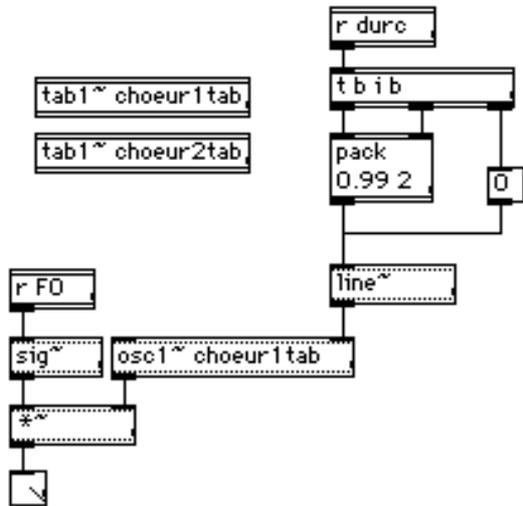


figure 35 : déclenchement du mélisme sur la fondamentale (patch Max-SIM)

La variable `durc` reçoit une valeur numérique, exprimée en ms, qui déclenche la lecture de la table stockée en mémoire par l'oscillateur et qui indique la durée de cette lecture. Cette table va multiplier la fréquence fondamentale des Fofs pour produire un mélisme.

B) Règles de Chant

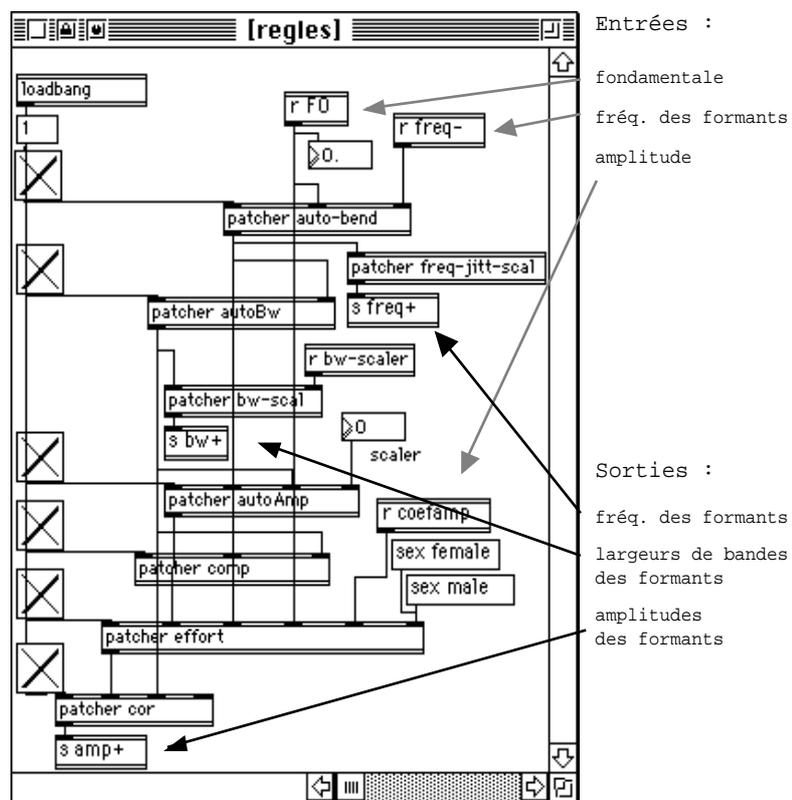


figure 36 : patch de connexion des différentes règles de contrôle des paramètres formantiques.

C) Panneau de contrôle général des paramètres (Le Messenger)

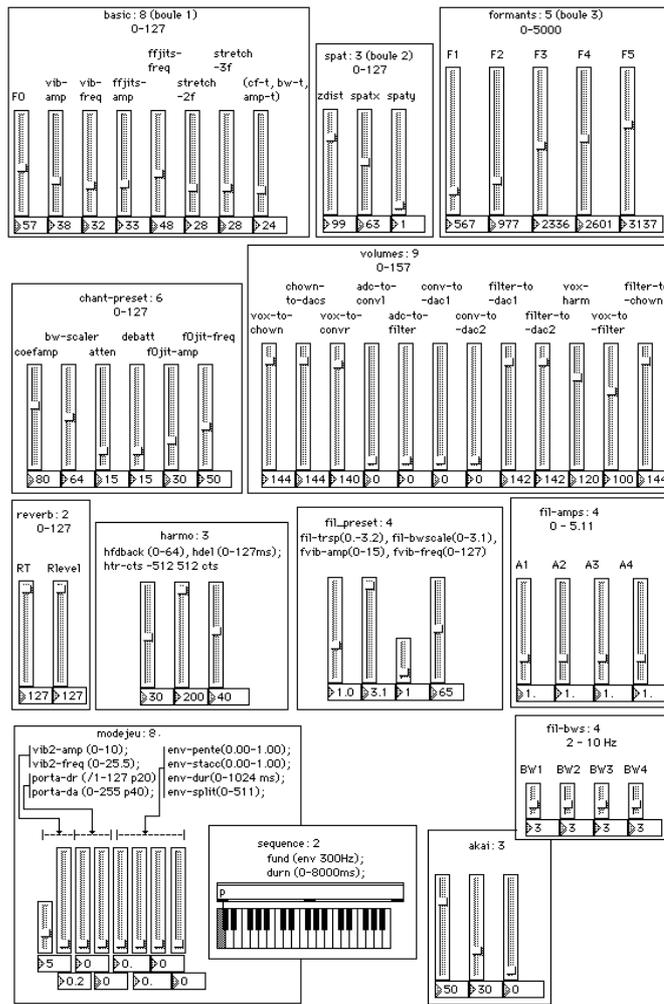


figure 37 : liste des contrôles disponibles depuis Max sur Macintosh pour le contrôle du patch de synthèse sur la SIM (exemples sonores n° 72 à 76).

Annexe VII : Editeur Galaxy

pour DX7

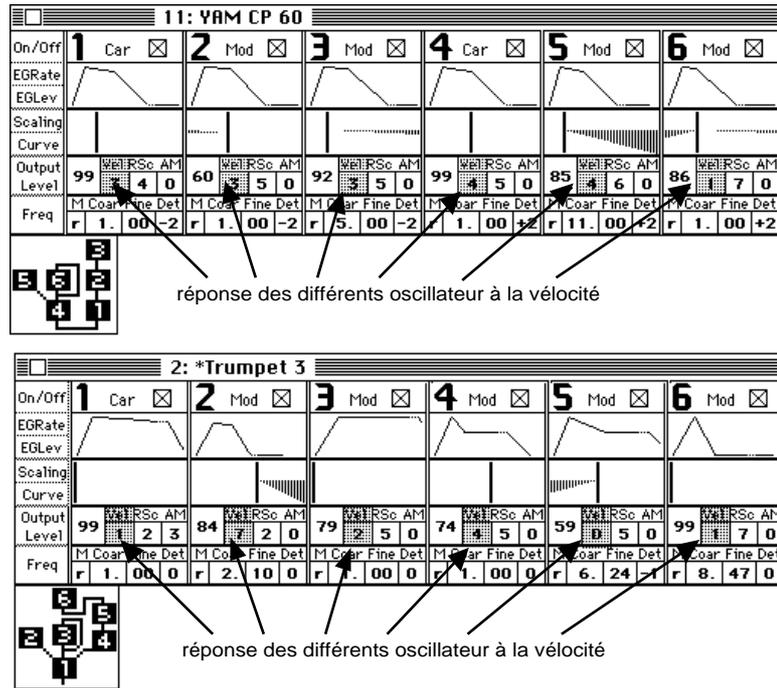


figure 38 : réglages d'un son de piano et d'un son de trompette sur le DX7

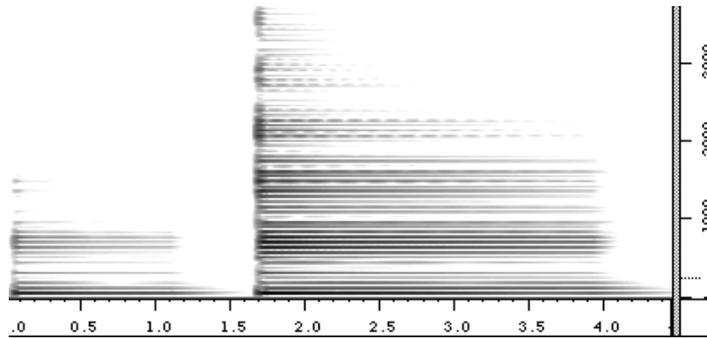


figure 39 : sonagramme d'un son de piano joué sur un DX7 avec une faible vélocité (à gauche) et avec une forte vélocité (à droite)

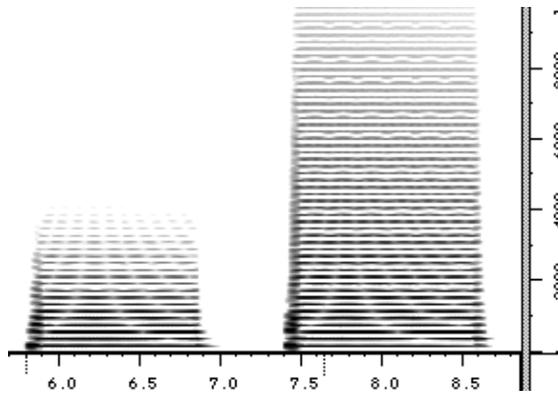


figure 40 : sonagramme d'un son de trompette joué sur un DX7 avec une faible vélocité (à gauche) et avec une forte vélocité (à droite)

Annexe VIII : Détail des sons synthésisés par forme d'onde dans « En Trance »

Dans la section 1B, la technique de synthèse par forme d'onde a servi à produire trois des quatre types de sons qui y sont utilisés : les sons *cell-dist*, *V04* et *V91*. Ces sons diffèrent par les choix des formes d'onde, des enveloppes et des harmonies employées. Tous les sons sont issus d'accords créés par un ensemble de distorsions de séries harmoniques mais selon les sons à produire, ce sont certaines hauteurs seulement qui sont prélevées dans ces accords.

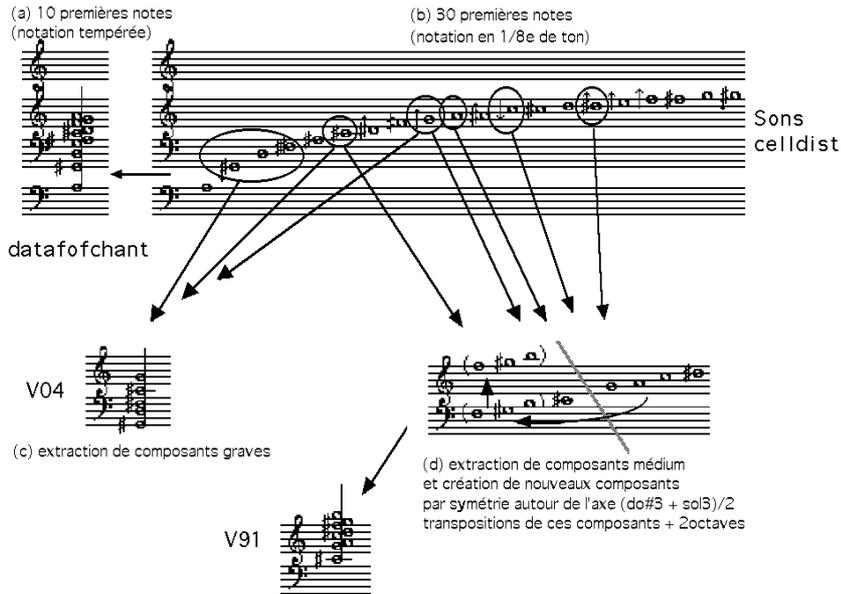


figure 41 : extraction de groupes de notes à partir des harmonies de la section 1B (ex. son. 63).

Les sons *V04* n'utilisent que certains partiels sélectionnés dans cette série. Ce sont des sons situés dans un registre médium. On les trouve au début des cycles de la section 1B. Les sons *cell-dist* sont formés des trente premiers partiels de ces séries. Ce sont des sons graves qui apparaissent aux points culminants des cycles. Les sons *V91* utilisent des hauteurs qui ne font pas partie de la série mais qui en sont extraites par des projections de notes par symétrie autour d'un pivot, comme l'indique la figure. Ils sont situés dans un registre haut médium et apparaissent à la fin des cycles où ils jouent un rôle de résonance.

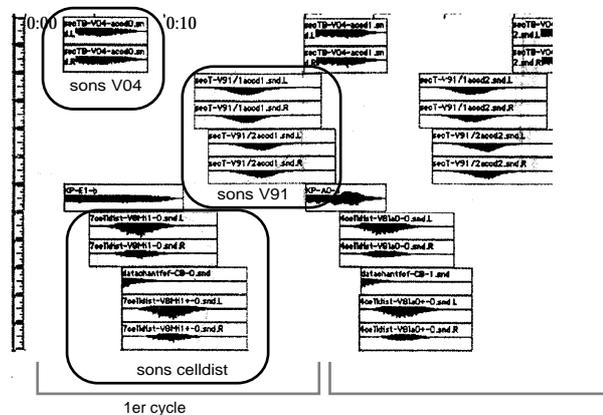


figure 42 : agencement des sons pour le mixage de la section 1B (40 premières secondes) (exemple sonore n° 63).

Pour les sons **V91**, les formes d'onde sont des transitions progressives entre une forme d'onde brisée et une forme d'onde en triangle. Ces formes d'onde sont pauvres en harmoniques et fournissent des sons assez purs. Si le son est court, la forme d'onde contient des harmoniques de rangs élevés. La largeur de bande des filtres a été réduite à 200 Hz, de façon à produire un son doux et à atténuer les harmoniques élevés.

Pour les sons **V04**, les trois formes d'onde utilisées ont été décrites d'après leur contenu harmonique. Nous avons utilisé la progression suivante : la première table comporte seulement la fondamentale ; la deuxième table ne comporte que le deuxième et le cinquième harmonique ; la troisième table comporte la fondamentale et le cinquième harmonique. Ainsi, pendant la durée du son, le cinquième harmonique apparaît et reste présent jusqu'à la fin. Par contre, vers le milieu du son, la fondamentale disparaît momentanément au profit du second harmonique, créant ainsi une impression d'octaviation vers le haut.

L'enveloppe de fréquence des oscillateurs suit le trajet de la fondamentale provenant du son de violoncelle. Par contre, les trajets d'amplitude des oscillateurs ont été calculés par l'interpolation entre deux courbes ayant été réalisées par l'assemblage de fragments de fonctions sinusoïdales.

Au fur et à mesure que l'on progresse dans la section 1B, les enveloppes sont de plus en plus rapides et percussives. A l'intérieur d'un son, les notes les plus graves sont celles qui ont l'attaque la plus rapide.

- **La section 2B** est une section qui utilise cinq techniques de synthèse différentes : la synthèse par forme d'onde, la synthèse additive, la synthèse par modèles de résonance, le filtrage et la synthèse croisée.

La synthèse par forme d'onde utilise des valeurs de paramètres proches de celles utilisées pour les sons **V04**. Les accords joués sont situés dans un registre aigu. L'enveloppe de fréquence des oscillateurs est celle de la fondamentale du violoncelle sur laquelle a été ajouté un glissement d'un demi-ton vers le bas dans le dernier tiers de la durée du son.

Les sons obtenus sont des sons très doux qui vont accompagner la voix dans la partie mélodique. Ils durent environ 5 secondes, leur enveloppe dynamique est toujours assez lente et ils sont animés d'un vibrato et d'un trémolo assez marqués dans leur phase finale.

- **La section 3A** est formée d'un seul type de sons. Les sons ont été construits par synthèse par forme d'onde sur des séries harmoniques ayant subi des distorsions.

Les paramètres de la synthèse sont les mêmes que ceux utilisés dans la section 1B pour les sons **V91**.

Pour le mixage, les sons ont été dupliqués et transposés d'un demi-ton vers le haut. De cette façon, les interactions entre les partiels proches ont généré une certaine rugosité dans le son global.

- **La section 3D'** est formée de deux couches de sons jouant simultanément : une couche de sons filtrés et une couche de sons synthétisés par forme d'onde variable. Les hauteurs jouées dans la section 3D' correspondent à des successions d'accords qui sont progressivement étirés pour donner l'impression d'une descente en continu vers les graves.

Les paramètres de synthèse sont proches de ceux utilisés pour les sons **V91**.

Annexe IX : Extraits des partitions de « En Trance »

4 $\text{♩} = 66$

fl
basso

ob
senza imbroccatura

cl
senza bocchino

sopr
microfono microfono

perc
ARMONICA
A CORDA
perc
una
miniera:
DOLBY NR 10
SUPERBET

tast
II

vn
I

vn
II

vla

vc

cb

figure 43 : début de la pièce « En Trance », section IA, mesures 1 à 10 (exemple sonore n° 62).

The image shows a page of handwritten musical notation, page 271, covering measures 211 to 220. The score is for a symphony orchestra and includes a vocal part. The instruments listed on the left are: fl (flute), ob (oboe), cl (clarinet), fg (bassoon), cr I (trumpet I), cr II (trumpet II), tr (trombone), tne (tenor horn), sopr (soprano), perc (percussion), tast I (piano I), tast II (piano II), vn I (violin I), vn II (violin II), via (viola), vc (cello), cb (double bass), and el (double bass). The notation is dense with various musical symbols, including notes, rests, dynamics (e.g., *pp*, *f*, *sf*), and articulation marks. There are several handwritten annotations and corrections throughout the score. At the bottom of the page, there are handwritten notes: "W", "VBBg", "22-45b", and "en haut". A small note at the bottom right reads: "* sezione in questo caso non si interviene un soffio quasi un soffio che 'sporca' il suono della tromba".

figure 44 : premier cycle de la section 2B, mesures 211 à 220.

This image shows a page of a musical score for five woodwind instruments: flute (fl), oboe (ob), clarinet (cl), bassoon (fg), and cor (cr). The score is written in a single system with five staves. The music is in a complex, rhythmic style, featuring many sixteenth and thirty-second notes, often beamed together. There are numerous slurs, ties, and dynamic markings throughout. The dynamic markings include *f sempre* (forte, always) and *sf* (sforzando). There are also some handwritten annotations and performance instructions. The notation includes various ornaments, grace notes, and complex rhythmic patterns. The instruments are listed on the left side of the staves: fl, ob, cl, fg, and cr. The score is a page from a larger work, as indicated by the page number 272 at the top.

fl
 ob
 cl
 fg
 cr I
 cr II
 tr
 tne
 sopr
 perc
 tast I
 tast II
 vn I
 vn II
 vla
 vc
 cb
 el

VIB
 DOVE
 VIB
 (stronger con)
 MIAH
 (non sin)
 (non sin)
 (non sin)

- 51 -

figure 46 : section 3D', mesures 503 à 512 (10 mesures avant la fin de la pièce)

(exemple sonore n° 69).

Annexe X : Fonction

*transkaija*¹

La fonction *transkaija* appelle un programme d'interpolation de paramètres musicaux quelconques, interpolation dirigée par la dimension temporelle. Conçu par Kaija Saariaho, et originellement écrit dans Formes par Xavier Rodet, le programme a été adapté et étendu. Les contrôles sur l'interpolation, complexes, se font à travers un fichier <input-file>. Les paramètres de contrôle peuvent évoluer au cours du temps de l'interpolation; les fonctions décrivant cette évolution doivent se trouver dans le fichier <function-file>.

Principe de l'interpolation

Le programme fait une transition d'un motif rythmique à un autre, en répétant des motifs intermédiaires, produits par interpolation des deux motifs de départ et d'arrivée, et en suivant une courbe (un parcours) d'interpolation donnée par l'utilisateur. Cette courbe est parcourue en fonction du temps correspondant à l'enchaînement des motifs rythmiques produits à partir du temps de départ. Les motifs de départ et d'arrivée sont reproduits sans altération, et chaque motif intermédiaire est obtenu pour le temps correspondant au début du motif. L'utilisateur doit donner une durée totale pour le résultat final (cette durée est respectée de façon approximative).

Parallèlement à cette interpolation rythmique, on peut interpoler dans la même transition, et suivant une autre courbe d'interpolation, des motifs d'une autre dimension musicale (des amplitudes, des hauteurs, etc...). Ces motifs ne sont pas forcément de même longueur que les motifs rythmiques; l'association des événements rythmiques et des autres paramètres (toujours interpolés en fonction du temps), se fait en "tournant" de façon indépendantes sur les motifs de chacune des dimensions musicales interpolées.

Il est possible par ailleurs de faire fusionner plusieurs événements rythmiques du premier motifs en un seul du deuxième motifs (ou inversement, de faire se diviser un événement du premier motif). Dans ce cas, lorsqu'un événement suit de trop près l'événement précédent, il est "sauté" (on peut alors sauter ou non les paramètres correspondant des motifs autres que rythmique).

De plus, des événements rythmiques peuvent se croiser d'un motif à un autre (dans ce cas les paramètres associés ne suivent pas les croisements, car c'est l'ordre d'occurrence qui compte pour les associations). C'est à travers la description d'associations de chacun des événements du premier motif avec ceux du second, que l'on peut contrôler ces effets.

Chaque courbe d'interpolation peut être remplacé par un "motif" de courbes d'interpolation, sur lequel on "tourne" alors pour associer une courbe différente à chacun des éléments d'un motif (ou plus exactement à chacune des associations liant deux éléments des motifs de départ et d'arrivée).

Les valeurs interpolées peuvent ne pas être retenues directement dans le résultat final : il est possible de les utiliser comme des index permettant d'accéder à des "tables de discrétisation". L'espace continu entre les valeurs de départ et d'arrivée est ainsi partitionné en intervalles égaux, et à chaque intervalle correspond une valeur arbitraire.

Enfin, il est possible d'enchaîner plusieurs transitions de ce type.

¹ D'après la documentation de la fonction Transkaija.

hios1.acs

The image shows a musical score for a piece titled 'hios1.acs'. It consists of six staves of music. The first staff has a circled note at the beginning, labeled 'motif de départ'. The fourth staff has a circled group of notes, labeled 'motif de destination'. The music is written in a rhythmic style with various note values and rests.

figure 43 : exemple d'interpolation rythmique utilisé dans la pièce « Hybris » pour l'ostinato au point culminant de la pièce (cf. figure IV-48).

Exemple de fichier de contrôle de la fonction *Transkaija* pour réaliser une interpolation de patterns :

```
(duration frequency balance)
(20. ;duration

; duration
(.125 )
(.1 )
((1 1))
droite.fun
0.08

; frequency
(mil)
(mi3 lad3 sol3 mi4q1 fa4)
( (1 1) (1 2) (1 3) (1 4) (1 5) )
droite.fun
-1.
s
(( ) '())

; balance
(0. )
(1. .75 .5 .25 0. .25 .75)
((1 1) (1 2) (1 3) (1 4) (1 5) (1 6) (1 7))
droite.fun
-1.
s
( )
)
```

Annexe XI : Liste des sons du disque compact joint

Annexe XI : Liste des sons du disque compact joint

PLAGE	DURÉE	NOM DU SON	COMMENTAIRE
		CHAPITRE I	
1	0:00:09	1-diapason	son de diapason (La-440)
2	0:00:02	2-NylonGtrSusA3	son de guitare, corde nylon, note La3 (a : son entier, b : attaque)
3	0:00:08	3-CelloSoloSusfC2	son de violoncelle tenu joué à l'archet, note Do1 (a : son entier, b : partie entretenue, c: partie résonante)
4	0:00:03	4-voix-parlée	extrait de voix parlée (a : phrase, b : 2 syllabes)
5	0:00:03	5-a-e-i-o-u	extrait de voix parlée : les voyelles
6	0:00:10	6-Farinelli	extrait de la musique originale du film <i>Farinelli</i>
7	0:00:28	7-multi6-8	3 multiphoniques de saxophone et leurs resynthèses après analyse de Terhardt
8	0:00:12	8-voix-mel	mélismes vocaux
9	0:00:18	9-voix-mel	analyse resynthèse additive (a : son original, b : resynthèse, c : résidu bruité)
10	0:00:11	10-paradoxe f	son paradoxal : en doublant la vitesse de lecture, le son semble baisser (JC Risset)
		CHAPITRE II	
11	0:00:04	01-bass-a	(Chant) synthèse de la voyelle «a», voix de basse (a : sans vibrato, b : avec vibrato)
12	0:00:03	02-domisoldo-sopa	(Chant) phrase de voix chantée (voix de soprano, règles automatiques)
13	0:00:02	03-intpolvowel	(Chant) interpolation de voyelles
14	0:00:16	04-bruit-etfiltré	(Chant) filtrage de bruit blanc par différents modèles de résonances (début : bruit non filtré)
15	0:00:04	05-cor5-bw-jitter	(Chant) synthèse d'un modèle de cor par Fof entretenues
16	0:00:04	06-CB-att	(Chant) synthèse d'un modèle de contrebasse par Fof percussives, dosage des amplitudes des résonances en fonction de leur largeur de bande
17	0:00:08	07-vari-bws	(Chant) variations de la durée de résonance sur deux modèles
18	0:00:03	08-tuba->long	(Chant) synthèse d'un modèle de tuba par Fof percussives, variation de la durée de résonance
19	0:00:01	09-slap-moy-vari	(Chant) synthèse d'un modèle de tuba par Fof percussives, variation de la fréquence moyenne des résonances
20	0:00:21	10-cymb-moy-var	(Chant) synthèse d'un modèle de cymbalum par Fof percussives, variation de la fréquence moyenne des résonances
21	0:00:12	11-intpol-gloc-vib	(Chant) interpolations entre un vibraphone et une glockenspiel, synthèse par Fof percussives
		CHAPITRE III	
22	0:00:03	1-add	(Csound) synthèse additive
23	0:00:11	2-h	(Csound) synthèse additive d'une série d'accords
24	0:00:21	3-v	(Csound) synthèse additive d'une progression en glissandos
25	0:00:09	4-clocomplet	(Csound) synthèse avec variations sur un modèle percussif
26	0:00:16	5-diphone-vibs	(Diphone) synthèse de sons avec vibratos
27	0:00:09	6-excplet	(Csound) synthèse de deux spectres entrecroisés
28	0:00:07	7-joshtest-red	(Csound) synthèse à partir d'une analyse de Terhardt réalisée sur un son d'orchestre (pièce « Paradigmes » de Joshua Fineberg)
		CHAPITRE IV	

29	0:00:11	Pass01-10	Passages, figure IV-5
30	0:00:06	Pass02-40	Passages, figure IV-6
31	0:00:08	Pass03-1-53	Passages, figure IV-8
32	0:00:09	Pass04-2-40	Passages, figure IV-9
33	0:00:14	Pass05-3-52	Passages, figure IV-10
34	0:00:26	Pass06-4-30	Passages, figure IV-11
35	0:00:20	Pass07-6-20	Passages, figure IV-12
36	0:00:14	Pass08-2-0-45	Passages, figure IV-13
37	0:00:17	Pass09-2-1-15	Passages, figure IV-14: textures
38	0:00:09	Pass10-2-4-20	Passages, figure IV-15: flute-> voix
39	0:01:03	Pass11-5-50-th	Passages, figure IV-20 : thèmes
40	0:00:09	PassEl-deploiemt	Passages, figure IV-21 : déploiement
41	0:00:40	Passvibrill	Passages, figure IV-25 : vibrato/trille
42	0:00:05	Modres02-CB	Hybris: modèle de contrebasse
43	0:00:05	modres04-tam	Hybris: modèle de tamtam
44	0:00:04	modres06-clopla	Hybris: modèle de cloche plaque
45	0:00:08	Hy01-son01-8-CB	Hybris: figure IV-36(début)
46	0:00:07	Hy02-son05-62-70Tam	Hybris: figure IV-37
47	0:00:08	Hy03-son75-84	Hybris: figure IV-38
48	0:00:08	Hy04-son90-97	Hybris: figure IV-39
49	0:00:30	Hy05-son208-238	Hybris: figure IV-43(extrait)
50	0:00:20	Hy06-son332-352	Hybris: figure IV-48
51	0:00:08	Hy07-son432cymb	Hybris: figure IV-55: tuba cymbalisé
52	0:00:05	01-flutbas-244m	son de flûte contrebasse
53	0:00:10	02-kasper02m	son de guitare basse électrique jouée à l'archet
54	0:00:06	03-mtlA1GCSCymroll	(Audiosculpt) croisement d'un son de guitare jouée avec distorsion et d'un roulement de cymbale
55	0:00:06	04-CelloSoloSusfC2	son de violoncelle tenu joué à l'archet, note Do1 (a : son entier, b : partie entretenue, c: partierésonante)
56	0:00:06	05-cellosnd-V1b2	(Csound) synthèse par forme d'onde à partir d'un modèle de violoncelle
57	0:00:15	06-celldist-V8E0-0	(Csound) synthèse par forme d'onde, modèle de violoncelle, accord Mi-0 avec distorsion harmonique
58	0:00:11	07-envsol-3f2c	(Csound) synthèse additive (modèle de violoncelle)
59	0:00:07	08-secTB-V04-accd0	(Csound) synthèse par forme d'onde (modèle de violoncelle)
60	0:00:13	10-v08g-accd0	(Csound) synthèse par forme d'onde
61	0:00:17	11-datachantfof-CB-0	(Csound) synthèse percussive (modèle de contrebasse)
62	0:00:53	13-Z-1A-S-12	En Trance : partie électronique de la section «1A»
63	0:00:54	14-Z-1B-T-12	En Trance : partie électronique de la section «1B»
64	0:00:58	15-Z-AB-12	En Trance : partie électronique de la section «2C»
65	0:00:26	16-Z-Ca-12	En Trance : partie électronique de la section «3C»
66	0:00:58	17-Z-3Dp-12	En Trance : partie électronique de la section «3D' »
67	0:00:16	18-romitell-rock	En Trance : transition entre les sections «2B» et «2C»
68	0:00:50	19-1B-sect-T	En Trance : extrait de la section «1B»
69	0:01:29	20-K	En Trance : section «3D'»
		CHAPITRE V	
70	0:00:10	01-corea	extrait d'une improvisation de Chick Coréa
71	0:00:20	02-ELP	extrait d'une improvisation de Keith Emerson
72	0:00:19	05-voixbasic	Le Messenger : variation des paramètres de base
73	0:00:18	06-chantvowel	Le Messenger : interpolation de voyelles
74	0:00:19	07-voixpan	Le Messenger : variation des paramètres de spatialisation (réduit ici à la stéréophonie)
75	0:00:31	08-chantallctrl	Le Messenger : variation de tous les paramètres
76	0:00:41	09-messenger-all	Le Messenger : extrait sonore