

Méthodes de synthèse sonore et applications en informatique musicale

Thomas Hézard

Institut de Recherche et de Coordination Acoustique/Musique
Equipe Analyse/Synthèse de Sons
Equipe Acoustique Instrumentale

thomas.hezard@ircam.fr

Bibliographie

L'audionumérique de C. Roads



▶ <u>Informatique musicale</u> de F. Pachet et J.P. Briot

Le son musical de J. Pierce



2

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Plan de la présentation

- Historique de la synthèse sonore et de l'informatique musicale
- Synthèse additive
- Synthèse soustractive
- ▶ TD / TP dirigés Matlab
- Synthèse par modulation
- Synthèse par modèles physiques
- Panorama des autres méthodes de synthèse
- ▶ TD / TP dirigés Matlab

Plan de la présentation

- Historique de la synthèse sonore et de l'informatique musicale
- > Synthèse additive
- Synthèse soustractive
- ▶ TD / TP dirigés Matlab
- ▶ Synthèse par modulation
- Synthèse par modèles physiques
- ▶ Panorama des autres méthodes de synthèse
- ▶ TD / TP dirigés Matlab

- ► Historique de la synthèse sonore et de l'informatique musicale
- ▶ Synthèse additive
- ▶ Synthèse soustractive
- ▶ TD / TP dirigés Matlab
- ▶ Synthèse par modulation
- ▶ Synthèse par modèles physiques
- ▶ Panorama des autres méthodes de synthèse
- ▶ TD / TP dirigés Matlab

> 5 Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

Introduction historique

▶ Précurseurs et fondamentaux

1641

l^{ère} machine à calculer de Blaise Pascal



6

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Introduction historique

Précurseurs et fondamentaux

1751



Invention de l'électricité par Benjamin Franklin



Introduction historique

▶ Précurseurs et fondamentaux

1789

Publication du mémoire de Joseph Fourier



▶ Précurseurs et fondamentaux

1821

Charles Babbage et Ada Lovelace présentent la « machine à différence »



Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

Introduction historique

▶ Précurseurs et fondamentaux

1863

Publication du traité de Hermann von Helmholtz





► 10 Méthodes de synthèse sonore 1 - Thomas Hézard

22/11/2012

Introduction historique

Précurseurs et fondamentaux

1877

Emile Berliner invente le premier microphone

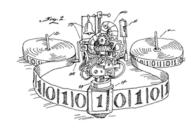


Introduction historique

▶ Précurseurs et fondamentaux

1937

Machine de Turing



9

12

Précurseurs et fondamentaux

1944

Mark-I, le premier ordinateur numérique (Harvard)

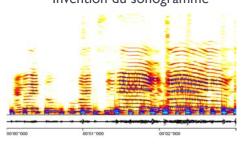


Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

Introduction historique

▶ Précurseurs et fondamentaux

Invention du sonogramme



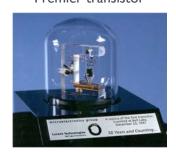
▶ 14 Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard 22/11/2012

Introduction historique

Précurseurs et fondamentaux

1947

Premier transistor



Introduction historique

▶ Premières expériences et premières fondations

1917-1918

Thérémin et Ondes Martenot



16



13

▶ Premières expériences et premières fondations

CSIRAC

Csirac.flv

17

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Introduction historique

▶ Premières expériences et premières fondations

1957

Max Mathews met au point MUSIC I aux Bell Labs



I8

20

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Introduction historique

▶ Premières expériences et premières fondations

1961

Première synthèse de voix chantée aux Bell Labs Daisy Bell

Daisy.flv

Introduction historique

▶ Premières expériences et premières fondations

1964

Premier synthétiseur Moog



▶ Premières expériences et premières fondations

1967

John Chowning met au point la synthèse FM



Méthodes de synthèse sonore 1 - Thomas Hézard

Introduction historique

▶ Premières expériences et premières fondations

1968

Jean-Claude Risset compose Computer Suite for Little Boy



shepard tone(Jean-Claude Risset).flv

22

24

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Introduction historique

▶ Premières expériences et premières fondations

1969

Jean-Claude Risset publie « An introductory catalog of computer-synthesized Music »

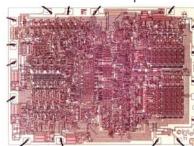


Introduction historique

▶ Premières expériences et premières fondations

1971

INTEL 4004: I er microprocesseur



2I

Vers le numérique

1975

Yamaha acquiert le brevet de la synthèse FM En 1983 :Yamaha DX7



25

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Introduction historique

Vers le numérique

1975-76

Début des travaux scientifiques à l'IRCAM (Boulez, Berio, Risset...)



26

28

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Introduction historique

Vers le numérique

1976-81

Premiers synthétiseurs numérique (TR, 4A, 4 \times ...)



Introduction historique

Vers le numérique

1978-79

Premier Walkam de Sony Premiers CD



Vers le numérique

> 29

31

Xavier Rodet (IRCAM) : CHANT (FOF)



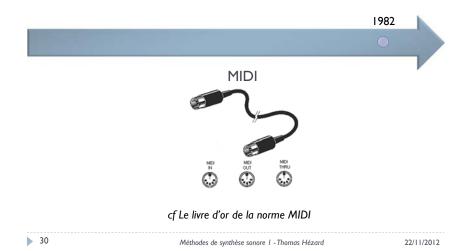
Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

1983

Introduction historique

La révolution numérique



Introduction historique

La révolution numérique

Karplus et Strong
Synthèse physique (cordes pincées) par guide d'onde

1. Performer's strike
2. Propagates

5. Hits end point, attenuates, reverses.
4. Propagates

3. Hits end point, attenuates reverses.

Introduction historique

La révolution numérique

32

J-M Adrien (IRCAM) : Synthèse modale



Méthodes de synth

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

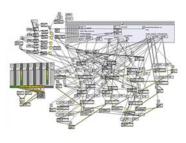
22/11/2012

1985

La révolution numérique

1986

Miller Pucket créé la première version de Max à l'IRCAM



Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

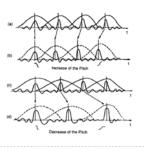
22/11/2012

Introduction historique

La révolution numérique

1986

PSOLA, développé à l'origine par FranceTelecom



34

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Introduction historique

La révolution numérique

Années 90

2 mouvements parallèles importants :

hardware => software institutions => home studio

Introduction historique

La révolution numérique

1993

Sensorband

sensorband

Atau Tanaka at the Luminaire.flv

36

33

La révolution numérique

1999-2001

Mauro Lanza utilise massivement la synthèse par modèles physiques



Méthodes de synthèse sonore 1 - Thomas Hézard

22/11/2012

Introduction historique

La révolution numérique

De nos jours

Evolutions actuelles:

- Contrôle gestuel
- Intelligence artificielle
- Ensemble électronique
- Musique pour réseaux

> 38

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Introduction historique

- Avancées théoriques et techniques à retenir :
 - Invention de l'électricité
 - Séries de Fourier
 - « Thèse additive » du son
 - Naissance de l'informatique
 - ▶ Premiers transistors et premiers microprocesseurs
- Lieux à retenir
 - ▶ Harvard
 - ▶ Bell Labs
 - **▶ IRCAM**

Introduction historique

- ▶ Chercheurs/compositeurs à retenir
 - ▶ Joseph Fourier (1768-1830)
 - ► Hermann Ludwig von Helmholtz (1821-1894)
 - ▶ Alan Turing (1912-1954)
 - Pierre Schaeffer (1910-1995)
 - Max Vernon Mathews (1926-)
 - ▶ John Kelly (1923-1965) & Carol Lochbaum
 - ▶ Robert Moog (1934-2005)
 - → Pierre Boulez (1925-)
 - ▶ John Chowning (1934-)
 - ▶ Jean-Claude Risset (1938-)

...

40

> 37

- ▶ Historique de la synthèse sonore et de l'informatique musicale
- Synthèse additive
- ▶ Synthèse soustractive
- ▶ TD / TP dirigés Matlab
- ▶ Synthèse par modulation
- ▶ Synthèse par modèles physiques
- ▶ Panorama des autres méthodes de synthèse
- ▶ TD / TP dirigés Matlab

41

Méthodes de synthèse sonore I -Thomas Hézard

22/11/2012

La synthèse additive

▶ Principe fondamental

Il est théoriquement possible d'approcher n'importe quelle forme d'onde complexe en additionnant des formes d'ondes élémentaires.



Séries de Fourier!

42

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

La synthèse additive

> Synthèse d'une onde stable au cours du temps parfaitement périodique

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N} A_k s_k(t)$$

$$s_k(t) = \sin(2\pi f_k t + \phi_k)$$

$$f_k = kf_0$$

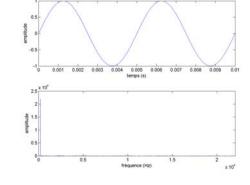
▶ 2N+I paramètres :
$$\begin{cases} A_i \\ \phi_k \\ f_0 \end{cases}$$

La synthèse additive

Premier exemple

- Addition des harmoniques d'ordre impaire avec $A_k=rac{1}{k}$
- $f_0 = 200$
- ▶ I harmonique

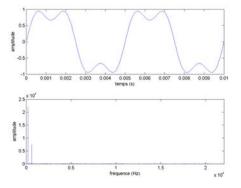




Premier exemple

- Addition des harmoniques d'ordre impaire avec $A_k = \frac{1}{k}$
- $f_0 = 200$
- ▶ 2 harmoniques





45

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

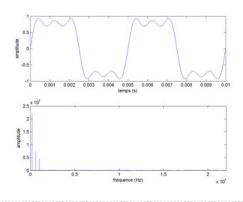
22/11/2012

La synthèse additive

Premier exemple

- Addition des harmoniques d'ordre impaire avec $A_k=rac{1}{k}$
- $f_0 = 200$
- > 3 harmoniques





46

48

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

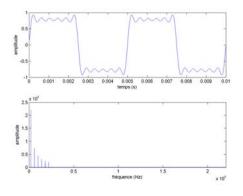
22/11/2012

La synthèse additive

Premier exemple

- Addition des harmoniques d'ordre impaire avec $A_k=rac{1}{k}$
- $f_0 = 200$
- ▶ 6 harmoniques



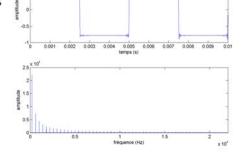


La synthèse additive

Premier exemple

- Addition des harmoniques d'ordre impaire avec $A_k=rac{1}{k}$
- $f_0 = 200$
- ▶ 50 harmoniques

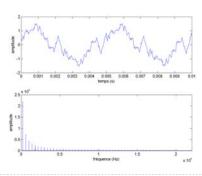




▶ Effet de la phase

- Addition des harmoniques d'ordre impaire avec $A_k = \frac{1}{k}$
- $f_0 = 200$
- Phase aléatoire sur chaque harmonique
- ▶ 50 harmoniques





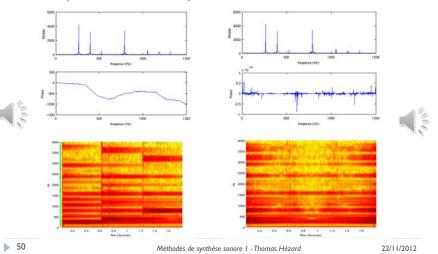
49

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

La synthèse additive

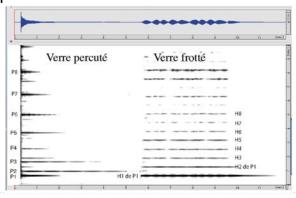
▶ Petite parenthèse sur la phase



La synthèse additive

▶ Harmoniques vs. Partiels

- ⇔ Son apériodique vs Son périodique
- ⇔ Impulsion vs Entretien



La synthèse additive

Modèle généralisé

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N} A_k s_k(t)$$

$$s_k(t) = \sin(2\pi f_k t + \phi_k)$$

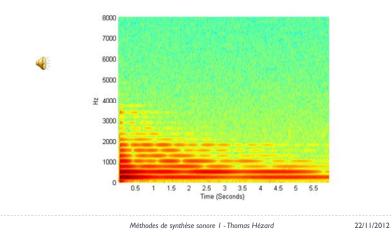
- lacksquare f_k sont des fréquences quelconques
- ightharpoonup 3N paramètres : $\left\{ egin{array}{l} A_k \ f_k \ \phi_k \end{array}
 ight.$

52

- Analyse
 - Il suffit de calculer les coefficients de la série de Fourier!

La synthèse additive

 Synthèse d'une onde variant au cours du temps « localement périodique »



53

Méthodes de synthèse sonore $\ensuremath{\mathit{I}}$ -Thomas Hézard

22/11/2012

La synthèse additive

> Synthèse d'une onde variant au cours du temps

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N} A_k(t) s_k(t)$$

 $s_k(t) = \sin(2\pi f_k(t)t + \phi_k)$

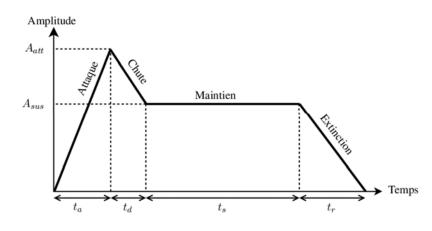
Attention : différent de la FM/AM, les fonctions $A_k(t)$ et $f_k(t)$ varient lentement !

La synthèse additive

54

56

▶ Enveloppe d'amplitude ADSR



- ▶ Contrôle de la synthèse additive
 - Un évènement
 - > = N partiels (souvent autour de 24 pour les sons instrumentaux)
 - > = N x 2 enveloppes (amplitudes et fréquences)
 - Une partition d'orchestre
 - > = 10 000 évènements
 - \rightarrow = 20 000 x N enveloppes (480 000 si N = 24)
 - Dù trouver tous ces paramètres?
 - Rentrés à la main par le compositeur
 - ▶ Logiciel de composition (semi)automatique
 - Données d'analyse d'un autre domaine que la musique
 - Analyse de sons musicaux pour la re-synthèse (avec modifications)

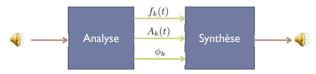
57

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

La synthèse additive

Analyse-resynthèse d'un son variant dans le temps



- ▶ Grand nombre de méthodes d'analyse
 - Approximation polynomiale (ou splines) de l'enveloppe
 - Modélisation exponentielle de l'enveloppe (sons percussifs)
 - ▶ Suivi de fréquence des partiels (filtrage adaptatif...)
 - **...**
 - rf biblio + travaux d'Anssi Kalpuri
 - Signal Processing Methods for the Automatic Transcription of Music (PhD)

> 58

60

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Synthèse additive

- ▶ Extensions de la synthèse additive
 - Musique spectrale : Gondwana de Tristan Murail

Tristan Murail Gondwana (1 2).flv

Speaking Piano

Speaking Piano.flv

- ► Historique de la synthèse sonore et de l'informatique musicale
- Synthèse additive
- ▶ Synthèse soustractive
- ▶ TD / TP dirigés Matlab
- ▶ Synthèse par modulation
- Synthèse par modèles physiques
- ▶ Panorama des autres méthodes de synthèse
- ▶ TD / TP dirigés Matlab

La synthèse soustractive

▶ Paradigme source-filtre



61

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

La synthèse soustractive

▶ Rappels sur le filtrage numérique

Domaine temporel

Soient e[n] un signal de source et h[n] une réponse impulsionnelle de filtre. Le filtrage linéaire de e par h donne le signal s[n] et s'écrit, à l'aide de l'opérateur de convolution \star :

$$s[n] = (e \star h)[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h[k]e[n-k] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h[n-k]e[n]$$

Domaine fréquentie

On note E(f), H(f) et S(f) les TFD correspondantes. On note de plus E(z), H(z) et S(z) les transformées en z. On a alors les relations suivantes :

$$S(z) = H(z).E(z)$$

$$S(f) \ = \ H(f).E(f)$$

62

64

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

La synthèse soustractive

▶ Rappels sur le filtrage numérique

Equation aux différences

Soit H(z) la fonction de transfert (en z) d'un FLID. H(z) s'écrit, de façon générale

$$H(z) = \frac{\sum_{r=0}^{M} b_r z^{-r}}{1 + \sum_{k=1}^{N} a_k z^{-k}}$$

ce qui correspond à l'équation aux différences

$$y[n] = \sum_{r=0}^{M} b_r x[n-r] - \sum_{k=1}^{N} a_k y[n-k]$$

La synthèse soustractive

Modèle de synthèse soustractive

- Une source
- Un filtre

La source et le filtre peuvent être de toute sorte (à condition que leur convolution soit stable). Suivant les applications, on pourra utiliser des modèles paramétriques de source et de filtre plus ou moins complexes. Nous voyons ici quelques modèles paramétriques simples permettant déjà de synthétiser des sons assez variés.

La synthèse soustractive

Modèles de sources classiques

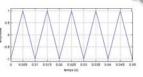




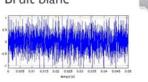
Signal dent de scie



Signal triangulaire



Bruit blanc



65

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

Modèles de filtres

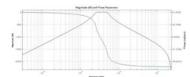
▶ Fonction de transfert

$$H(z) = \frac{\sum_{r=0}^{M} b_r z^{-r}}{1 + \sum_{k=1}^{N} a_k z^{-k}}$$

La synthèse soustractive

M+N+I paramètres:

Réponse en fréquence



Méthodes de synthèse de filtres RIF et RII

Méthode des fenêtres, échantillonnage en fréquence, optimisation, transformée bilinéaires etc.

Paramètres = gabarit (nb de paramètres dépend du type de filtre)

66

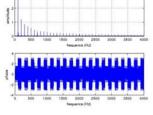
68

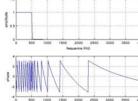
Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

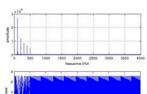
22/11/2012

La synthèse soustractive

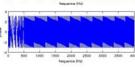
▶ Filtrage







22/11/2012





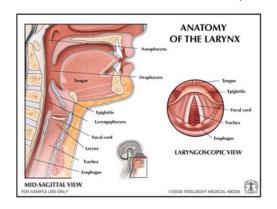


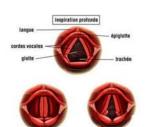
La synthèse soustractive

Démo Pure Data

Synthèse soustractive

Modélisation source-filtre de la parole





http://catalogue.ircam.fr/sites/Voix/index.html

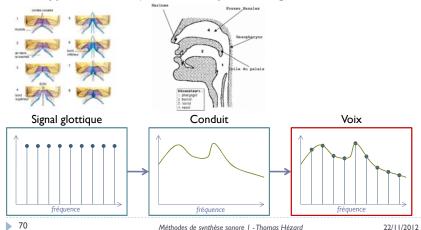
Méthodes de synthèse sonore I -Thomas Hézard

22/11/2012

Synthèse soustractive

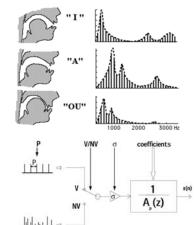
Modélisation source-filtre de la parole

Hypothèse sous-jacente : indépendance glotte-conduit



Synthèse soustractive

Modélisation AR de la parole



 Le filtre correspondant au conduit vocal est assimilé à un filtre AR, c-à-d à un filtre dont la TZ s'écrit

$$H(z) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{P} a_k z^{-k}}$$

 Le signal de synthèse est obtenu par filtrage d'une source périodique ou bruitée

$$X(z) = \sigma \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^P a_k z^{-k}} U(z)$$

Synthèse soustractive

- Analyse conjointe de la source glottique et du filtre vocal
 - problème complexe...
 - est utilisée (avec quelques améliorations) dans la téléphonie mobile
 - > permet de faire de l'extraction de filtre vocal
 - **...**

72

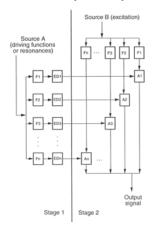
Vocoder et synthèse croisée

Vocoder_Moog.flv

69

Synthèse soustractive

▶ Vocoder : système d'analyse/resynthèse soustractive



73

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

Synthèse soustractive

Vocodeur de phase :

Analyse = Transformée de Fourier Court Terme (TFCT)

$$x[n] \xrightarrow{\mathsf{TFCT}} X(n,f) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \left(w[n-m]x[m]\right) e^{-2i\pi f m}$$
 Echantillonnage spectral
$$w[n] \text{ est la fenêtre d'analyse}$$

$$X\left[n,\frac{k}{N}\right] = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \left(w[n-m]x[m]\right) e^{-2i\pi\frac{km}{N}}$$

$$\frac{k}{N} \text{ est une fréquence réduite.}$$

Il est possible de sous-échantillonner en temporel (dépend de la largeur de bande de la fenêtre d'analyse)

74

76

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

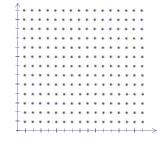
22/11/2012

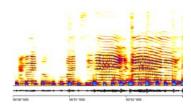
Synthèse soustractive

▶ Vocodeur de phase :

Analyse = Transformée de Fourier Court Terme (TFCT)

$$x[n] \longrightarrow X \left[n, \frac{k}{N} \right]$$





Synthèse soustractive

Vocodeur de phase : Synthèse

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X\left[n, \frac{k}{N}\right] e^{i2\pi \frac{kn}{N}}$$

$$\dots$$

$$= N \sum_{r=-\infty}^{+\infty} w[rN]x[n+rN]$$

 $\,\,\,$ On retrouve $\,x[n]$ (à un facteur près) si $w[rN]=0\,\,\forall r\neq 0$

Synthèse soustractive

> Synthèse croisée à l'aide du vocodeur de phase

$$x[n] o X \left[n, rac{k}{N}
ight] \longrightarrow S \left[n, rac{k}{N}
ight] = X \left[n, rac{k}{N}
ight] . Y \left[n, rac{k}{N}
ight] \longrightarrow s[n]$$

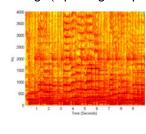
On peut donc faire du filtrage qui varie dans le temps ou même « mélanger fréquentiellement » deux signaux. C'est ce qu'on appelle la « synthèse croisée ».

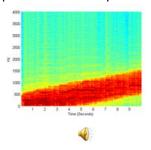
Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

- ▶ Historique de la synthèse sonore et de l'informatique musicale
- ▶ Synthèse additive
- ▶ Synthèse soustractive
- ▶ TD / TP dirigés Matlab
- ▶ Synthèse par modulation
- ▶ Synthèse par modèles physiques
- ▶ Panorama des autres méthodes de synthèse
- ▶ TD / TP dirigés Matlab

Synthèse soustractive

- > Synthèse croisée à l'aide du vocodeur de phase
- Utilisations possibles :
 - iltrage (équilibrage fréquentiel) qui varie dans le temps





Vocoder Moog!

78

Méthodes de synthèse sonore I - Thomas Hézard

22/11/2012

> 77



Méthodes de synthèse sonore et applications en informatique musicale

Thomas Hézard

Institut de Recherche et de Coordination Acoustique/Musique
Equipe Analyse/Synthèse de Sons
Equipe Acoustique Instrumentale

thomas.hezard@ircam.fr

- ▶ Historique de la synthèse sonore et de l'informatique musicale
- ▶ Synthèse additive
- ▶ Synthèse soustractive
- ▶ TD / TP dirigés Matlab
- > Synthèse par modulation
- Synthèse par modèles physiques
- Panorama des autres méthodes de synthèse
- ▶ TD / TP dirigés Matlab

2

 $\textit{M\'ethodes de synth\`ese sonore 2-Thomas H\'ezard}$

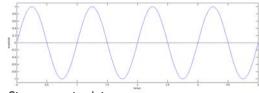
06/12/2012

- ▶ Historique de la synthèse sonore et de l'informatique musicale
- Synthèse additive
- ▶ Synthèse soustractive
- ▶ TD / TP dirigés Matlab
- > Synthèse par modulation
- Synthèse par modèles physiques
- ▶ Panorama des autres méthodes de synthèse
- ▶ TD / TP dirigés Matlab

Synthèse par modulation

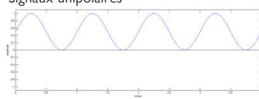
Vocabulaire

Signaux bipolaires



$$s(t) = \sin(2\pi f t)$$

Signaux unipolaires



$$s(t) = \frac{1 + \sin(2\pi ft)}{2}$$

Modulation en anneaux

- Multiplication d'un signal porteur par un signal modulant.
 - $s(t) = p(t) \times m(t)$
- > Souvent, le signal modulant est une sinusoïde
 - $s(t) = p(t) \times \sin(2\pi f_0 t)$

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

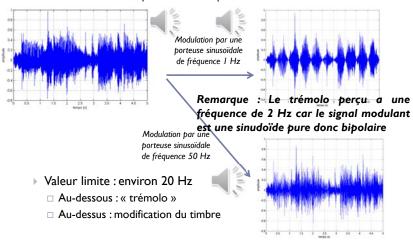
06/12/2012

6

8

Synthèse par modulation

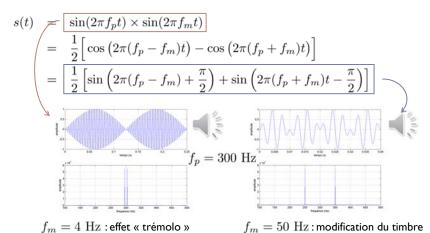
Influence de la fréquence de la porteuse sinusoïdale



Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

Synthèse par modulation

Modulation en anneaux de deux sinusoïdes



Synthèse par modulation

Modulation d'amplitude : Synthèse AM

 Multiplication d'une sinusoïde porteuse par une sinusoïde modulante unipolaire

$$\begin{split} s(t) &= \sin(2\pi f_p t) \times (1 + \alpha \sin(2\pi f_m t)) \\ &= \sin(2\pi f_p t) + \frac{\alpha}{2} \Big[\cos\left(2\pi (f_p - f_m)t\right) - \cos\left(2\pi (f_p + f_m)t\right) \Big] \\ &= \sin(2\pi f_p t) + \frac{\alpha}{2} \left[\sin\left(2\pi (f_p - f_m) + \frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(2\pi (f_p + f_m)t - \frac{\pi}{2}\right) \right] \end{split}$$

ightharpoonup 3 paramètres $\left\{ \begin{array}{l} f_p \ {
m fr\'equence \ porteuse} \\ f_m \ {
m fr\'equence \ modulante} \\ \alpha \ {
m indice \ de \ modulation} \end{array} \right.$

5

$$\begin{cases} f_p &= 300 \text{ Hz} \\ f_m &= 10 \text{ Hz} \\ \alpha &= 1 \end{cases} \\ \end{cases} \begin{cases} f_p &= 300 \text{ Hz} \\ f_m &= 10 \text{ Hz} \\ \alpha &= 0.5 \end{cases} \\ \end{cases} \begin{cases} f_p &= 300 \text{ Hz} \\ f_m &= 10 \text{ Hz} \\ \alpha &= 0.5 \end{cases}$$

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

Synthèse par modulation

$$\begin{cases} f_p = 300 \text{ Hz} \\ f_m = 80 \text{ Hz} \\ \alpha = 1 \end{cases} \qquad \begin{cases} f_p = 300 \text{ Hz} \\ f_m = 80 \text{ Hz} \\ \alpha = 0.5 \end{cases}$$

Synthèse par modulation

Modulation de fréquence : Synthèse FM

▶ Composition de deux sinusoïdes

$$s(t) = \sin (2\pi f_p t + I_m \sin(2\pi f_m t))$$

= $\sin (\phi(t))$

Fréquence instantanée

$$\omega(t) = 2\pi f(t) = \frac{d\phi}{dt}(t)$$
$$= 2\pi f_p + I_m 2\pi f_m \cos(2\pi f_m t)$$

$$f(t) = f_p + \delta_f \cos(2\pi f_m t)$$
 avec $\delta_f = I_m f_m$

Modèle

Flodele
$$> s(t) = \sin\left(2\pi f_p t + \frac{\delta_f}{f_m}\sin(2\pi f_m t)\right) \quad \text{3 paramètres}: \left\{ \begin{array}{l} f_p \\ f_m \\ \delta_f \text{ (ou } I_m) \end{array} \right.$$

Synthèse par modulation

Décomposition fréquentielle

$$s(t) = \sin\left(2\pi f_p t + I_m \sin(2\pi f_m t)\right)$$

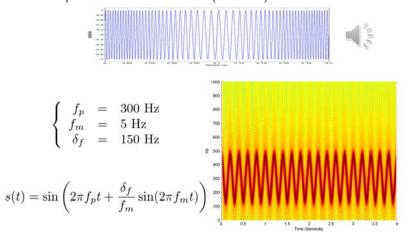
$$s(t) = J_0(I_m)\sin(2\pi f_p t)$$

$$+ \sum_{k=1}^{+\infty} J_k(I_m) \left[\sin\left(2\pi (f_p + k f_m) t\right) + (-1)^k \sin\left(2\pi (f_p - k f_m) t\right)\right]$$

$$J_n(x) = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{(-1)^k (x/2)^{n+2k}}{k! \Gamma(n+k+1)} \text{ fonctions de Bessel}$$

$$\begin{cases} f_p = 300 \text{ Hz} \\ f_m = 5 \text{ Hz} \\ \delta_f = 150 \text{ Hz} \end{cases}$$

▶ Fréquence modulante faible (< 20 Hz) : vibrato



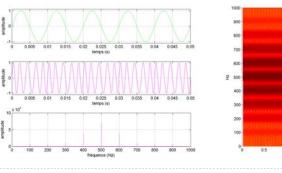
Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

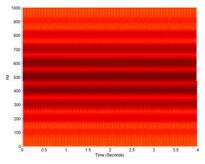
Synthèse par modulation

Fréquence modulante élevée (> 20 Hz) : son complexe

$$\begin{cases} f_p &= 500 \text{ Hz} \\ f_m &= 100 \text{ Hz} \\ \delta_f &= 100 \text{ Hz} \end{cases}$$







14

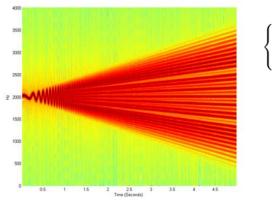
16

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

06/12/2012

Synthèse par modulation

Passage du vibrato à la modification de timbre



$$\begin{cases} f_p &= 2000 \text{ Hz} \\ f_m &= [1, 50] \text{ Hz} \\ I_m &= 10 \text{ Hz} \end{cases}$$



Synthèse par modulation

Paramètres variant dans le temps, sons complexes

$$s(t) = \sin\left(2\pi f_p(t)t + I_m(t)\sin\left(2\pi f_m(t)t\right)\right) \quad \begin{cases} f_p(t) = a_p + b_p & t \\ f_m(t) = a_m + b_m & t \\ I_m(t) = a_i + b_i & t \end{cases}$$











13

Scripts Matlab

N Parametres *********		% Paramétres ********	
Fe = 44100;	* Fréquence d'échantillonnage (Hz)	Fe = 44100;	% Fréquence d'échantillonnage (Hz)
Dursig = 4;	& Durée du signal (s)	Dursig = 4;	* Durée du signal (s)
FportDeb = 500:	* Fréquence porteuse à t = 0	FportDeb = 500;	% Fréquence porteuse à t = 0
FportFin = 500;	* Fréquence porteuse à t = Dursiq	FportFin = 500;	% Fréquence porteuse à t = Dursig
FmodDeb = 10;	* Fréquence de modulation à t = 0	FmodDeb = 10;	% Fréquence de modulation à t = 0
FmodFin = 10;	* Fréquence de modulation à t = Dursig	FmodFin = 10;	* Fréquence de modulation à t = Dursiq
alphaDeb = 1;	* Indice de modulation à t = 0	IndMDeb = 10;	% Indice de modulation à t = 0
alphaFin = 1;	* Indice de modulation à t = Dursig	IndMFin = 10;	% Indice de modulation à t = Dursig
&		£ ************************************	

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

- ▶ Historique de la synthèse sonore et de l'informatique musicale
- ▶ Synthèse additive
- ▶ Synthèse soustractive
- ▶ TD / TP dirigés Matlab
- ▶ Synthèse par modulation
- Synthèse par modèles physiques
- ▶ Panorama des autres méthodes de synthèse
- ▶ TD / TP dirigés Matlab

Synthèse par modulation

▶ Démonstration Pure Data

▶ 18 Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

Synthèse par modèles physiques

Modèles de signaux vs. Modèles physiques

Conséquences vs. Causes

Contrôlabilité vs. Précision

Efficacité vs. Coût de calcul

Calcul des paramètres vs. Inversion du modèle

▶ Modèles mathématiques de la mécanique et de l'acoustique de la production sonore dans les instruments de musique

17

20

06/12/2012

Synthèse par modèles physiques

Plusieurs approches

- Résolution numérique des équations mécaniques et acoustiques
 - Juliette Chabassier : Modélisation et simulation numérique d'un piano de concert http://www-rocq.inria.fr/who/Juliette.Chabassier/Accueil.html
- Eléments finis
- Synthèse modale
 - Modalys (IRCAM) http://forumnet.ircam.fr/701.html
- Modèle virtuel Cordis-Anima (Claude Cadoz, ACROE)
 - http://www-acroe.imag.fr/ACROE/recherche/cordis-anima/cordis-anima.html
- Modèles par guides d'ondes
 - ▶ Julius Orion Smith III https://ccrma.stanford.edu/~jos/

Synthèse par modèles physiques

- Propagation du son dans un tube acoustique idéal
 - Tube axisymétrique sans pertes
 - Ondes planes





- Notations
 - ▶ Surface S(x)
 - Pression p(x,t), $P(x,\omega)$
 - Débit $u(x,t), U(x,\omega)$

Célérité du son c

Masse volumique ρ

21

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

06/12/2012

> 22

24

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

06/12/2012

Synthèse par modèles physiques

- Equation des ondes
 - Conservation de la quantité de mouvement ID

$$S(x)\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}$$

Conservation de la masse ID

$$\rho \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = -\frac{S(x)}{c^2} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t}$$

▶ Equation sur le débit

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{S(x)} \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right] = \frac{1}{S(x)c^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \xrightarrow{\text{tube droit}} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}$$

▶ Equation sur la pression

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2}$$

Synthèse par modèles physiques

▶ Résolution de l'équation ID : solution de d'Alembert

$$\begin{array}{rcl} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} & = & c^2 \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} \\ & \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} & = & 0 \\ \left(\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} - c \frac{\partial p(x,t)}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + c \frac{\partial p(x,t)}{\partial x}\right) & = & 0 \end{array}$$

$$p(x,t) = \underbrace{p^+\left(t + \frac{x}{c}\right)}_{\text{onde aller}} + \underbrace{p^-\left(t - \frac{x}{c}\right)}_{\text{onde retour}}$$

On résout de même

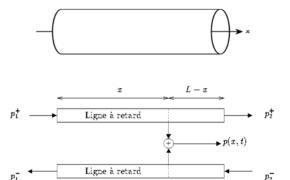
$$u(x,t) = u^+ \left(t + \frac{x}{c}\right) + u^- \left(t - \frac{x}{c}\right)$$

Synthèse par modèles physiques

- Impédance caractéristique
 - ightharpoonup On définit l'impédance caractéristique $\ Z(x)=rac{
 ho c}{S(x)}$
 - On obtient alors $\begin{array}{ccc} p^+(t+x/c) & = & Z(x) \ u^+(t+x/c) \\ p^-(t-x/c) & = & & Z(x) \ u^-(t-x/c) \end{array}$

Synthèse par modèles physiques

Modélisation guide d'ondes



25

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

06/12/2012

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

26

28

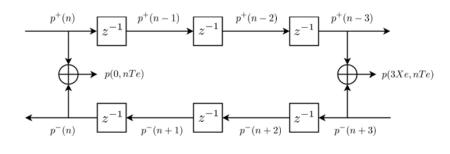
06/12/2012

Synthèse par modèles physiques

Discrétisation

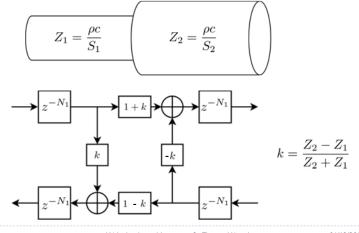
- En espace $x \to x_m = mX_e$
- $\qquad \qquad \text{En temps} \quad t \to t_n = nTe$

$$p(t_n, x_m) = p^+(n-m) + p^-(n+m)$$



Synthèse par modèles physiques

▶ Jonction de deux cylindres de rayons différents

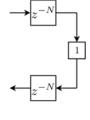


Synthèse par modèles physiques

▶ Tube ouvert, tube fermé

Extrémité ouverte : $p^+ = -p$ \Leftrightarrow $\boxed{z^{-N}}$

ightharpoonup Extrémité fermée : $p^+=p^ \Leftrightarrow$



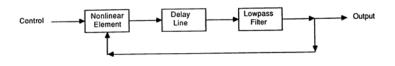
> 29

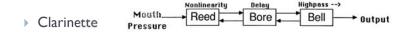
Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

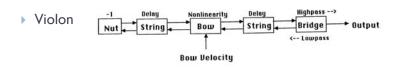
06/12/2012

Synthèse par modèles physiques

▶ Instrument complet







▶ 30

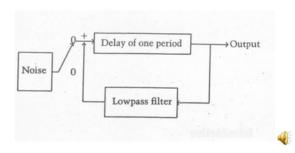
32

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

06/12/2012

Synthèse par modèles physiques

Une implémentation des guides d'ondes pour les cordes :
 Algorithme de Karplus-Strong



- ▶ Historique de la synthèse sonore et de l'informatique musicale
- ▶ Synthèse additive
- ▶ Synthèse soustractive
- ▶ TD / TP dirigés Matlab
- ▶ Synthèse par modulation
- ▶ Synthèse par modèles physiques
- Panorama des autres méthodes de synthèse
- ▶ TD / TP dirigés Matlab

Autres méthodes de synthèse

- ▶ Echantillonnage et tables d'onde
 - ▶ Changement de la vitesse de lecture
 - Bouclage
 - ▶ Transposition
- ▶ Tables d'ondes multiples
 - Fondu enchaîné
 - ▶ Empilement

33

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

06/12/2012

Autres méthodes de synthèse

- ▶ Lecture d'échantillons
 - ▶ Très utilisée en MAO
 - ▶ Combinée avec la synthèse soustractive
 - Inconvénient : très lourd (stockage)
- ▶ Exemple d'applications : le Prophet VS (Sequential Circuit)



t;Vector Synthe

34

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

06/12/2012

Autres méthodes de synthèse sonore

- ▶ Filtrage non-linéaire
 - Distorsion non linéaire (waveshaping)
 - Distorsion de phase
- Synthèse analogique virtuelle
 - ▶ Orosys / Two Notes http://www.two-notes.com/

Autres méthodes de synthèse

- ▶ Synthèse granulaire (Gabor 1947, Xenakis 1971)
 - Extension de la synthèse additive
 - ▶ Grains sonores de l'ordre quelques ms
 - Contrôle
 - Densité des grains
 - ▶ Hauteur
 - Longueur
 - Enveloppe

36

- ▶ Contrôle semi-automatique
- ▶ FOF est une sorte de synthèse granulaire

Autres méthodes de synthèse

- > Synthèse granulaire
 - Concret PH, I. Xenakis (1958, Exposition Internationale de Bruxelles)



▶ Contrôle de synthèse granulaire à la Wiimote



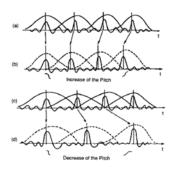
37

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

06/12/2012

Autres méthodes de synthèse

- ▶ PSOLA = granulaire adapté à la voix ?
 - ▶ Concept de PSOLA



38

40

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

06/12/2012

Autres méthodes de synthèse

▶ PSOLA

- Traitement
 - Modification de la durée
 - Modification de la hauteur
- Synthèse
 - ▶ MBROLA :Thierry Dutoit
 - Acapela-tv: http://www.acapela.tv



Autres méthodes de synthèse

- Synthèse graphique
 - > Synthèse TFCT à partir d'une image
 - Dessiner un spectrogramme
 - Exemple: Mycène Alpha (I. Xenakis, 1978) crée avec l'UPIC



▶ Logiciel libre : Coagula

Autres méthodes de synthèse

Mélanger tout ça : à vous de jouer !

- ► Historique de la synthèse sonore et de l'informatique musicale
- Synthèse additive
- ▶ Synthèse soustractive
- ▶ TD / TP dirigés Matlab
- ▶ Synthèse par modulation
- ▶ Synthèse par modèles physiques
- ▶ Panorama des autres méthodes de synthèse
- ▶ TD / TP dirigés Matlab

4I

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard

06/12/2012

42

Méthodes de synthèse sonore 2 - Thomas Hézard