Institut
Mines-Telecom

Synthèse sonore

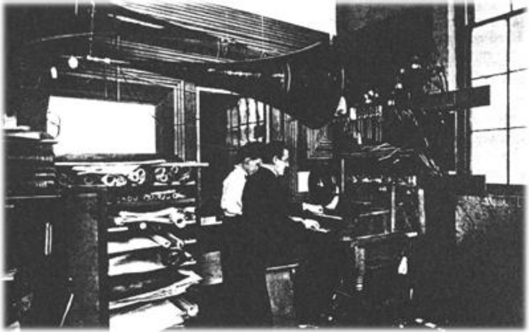
Yves Grenier (G. Richard, B. David)

IAD/IMA PS

La synthèse sonore

- Définition :
  - Procédés et algorithmes destinés à produire des sons musicaux
- Intérêt de la synthèse sonore
  - Synthétiseurs (jouer de n'importe quel instrument à partir d'un clavier ou d'un ordinateur)
  - Aide à l'apprentissage d'un instrument
  - Karaoké
  - Facture instrumentale (entendre un instrument avant de le construire)
  - Mieux comprendre la physique des instruments de musique

Historique : les précurseurs



- 1897 : Le Telharmonium (ou Dynamophone), Thaddeus Cahill
- Appareil polyphonique pouvant produire des sons de n'importe quelle fréquence et de n'importe quelle intensité, avec leurs harmoniques
- Oscillateurs : alternateurs pilotés par des moteurs électriques
- Quelques chiffres : 200.000 $, 200 tonnes, 18 mètres de large

Historique : l'essor


1920 : le Theremin

AUDIO VIDÉO

1928 : les Ondes Martenot VIDÉO AUDIO extrait de Turangalîla (VIème mouv.), Jardin du sommeil d'amour, Messian

1930 : le Trautonium VIDÉO

1935 : l'Orgue Hammond AUDIO

1954 : le premier synthétiseur : RCA Mark I AUDIO (Harry F.Olsen, Herbert Belar Columbia-Princeton)

1970 : l'ère commerciale : Synclavier (1972), Yamaha DX7 (1983) Piano électrique Marimba, ...

TELECOM ParisTech

Les differentes approches

- Analyse/synthèse d'un modèle de signal, utilisation de formes d'ondes qui seront ensuite utilisées pour fabriquer le son
  - Synthèse Additive
  - Synthèse Granulaire
  - Synthèse à table d'ondes
- Analyse/synthèse d'un modèle de production, utilisation d'un modèle, d'élements sources et des opérateurs
  - Synthèse FM (Modulation de fréquence)
  - Synthèse source-filtre
- Modèle physique : vise à reproduire le comportement réel de l'instrument à travers une modélisation physique
  - Synthèse par discrétisation des équations de propagation
  - Synthèse par lignes de transmission (ex. Karplus-Strong)

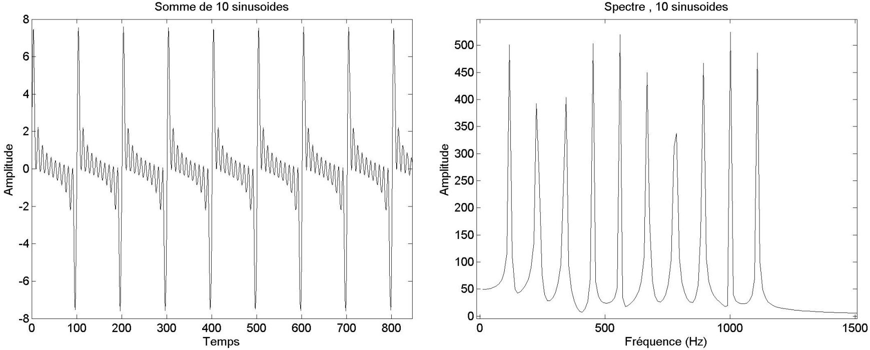
Plan du cours

Analyse/synthèse d'un modèle de signal

- Synthèse additive
  - Sommes de formes d'ondes élémentaires :
    - Sinusoïdes
    - Grains temps/fréquence
    - FOF
- Exemples d'instruments
  - Orgue Hammond
  - Synclavier

Synthèse additive (1/2)

Synthèse réalisée en additionnant des sinusoïdes dynamiquement en fréquence, en amplitude et en phase



ECOUTE addition progressive des harmoniques

ECOUTE résultat final

Synthèse additive (2/2)

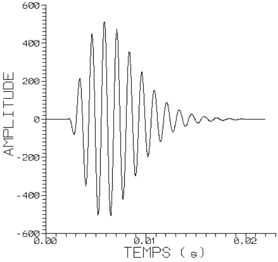
- Utilisation d'une décomposition « sinusoïdes + bruit »
- Exemples sur des signaux de piano :
  - Signal original ECOUTE
  - Signal S (somme de sinusoïdes) ECOUTE
  - Signal B (Bruit) ECOUTE
  - Même note avec vibrato ECOUTE
  - Note transposée à la tierce ECOUTE

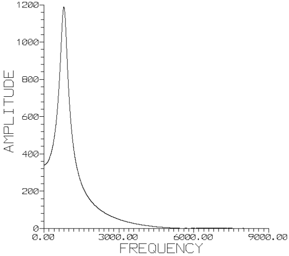
Formes d'Ondes Formantiques ou FOF (1/2)

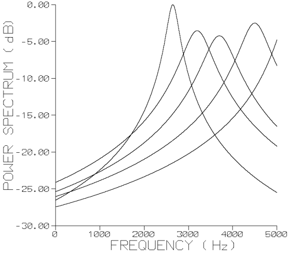
Analyse/synthèse par FOF

$$f(t) = \Lambda(t)\sin(2\pi f_c t + \varphi)$$

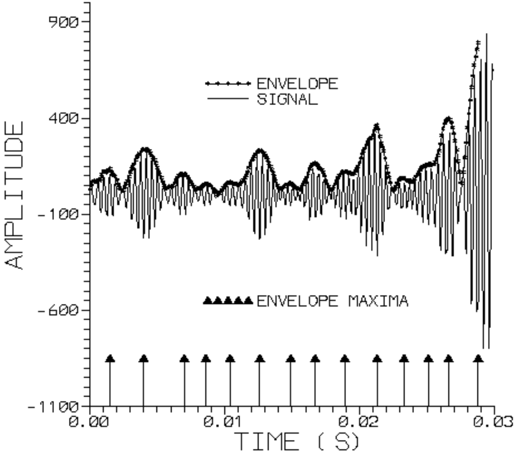
$$\Lambda(t) = \begin{cases} 0 & \text{si} \quad t \leq 0 \\ \frac{1}{2}A(1-\cos(\beta t))e^{-\alpha t} & \text{si} \quad 0 < t \leq \frac{\pi}{\beta} \\ Ae^{-\alpha t} & \text{si} \quad t > \frac{\pi}{\beta} \end{cases}$$







Formes d'Ondes Formantiques ou FOF (2/2)



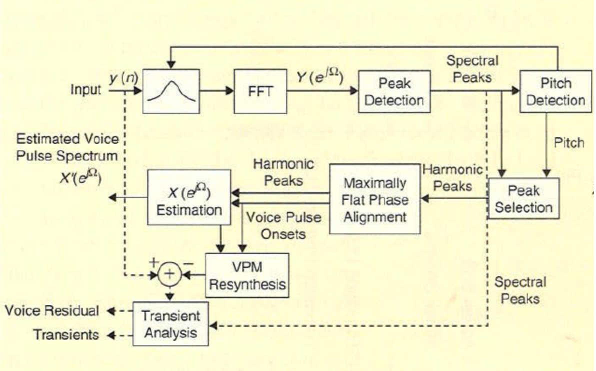
ECOUTE d'après Potard, Rodet, IRCAM

Synthèse par tables d'ondes

- Dite par « échantillonnage »
- Dictionnaire de son numérisés
  - une ou plusieurs périodes
  - Instruments réels et/ou formes classiques
- Très répandue (carte sons d'entrée de gamme)
- Nécessité de :
  - transposition de hauteurs, ré-échantillonnage
  - gestion des boucles

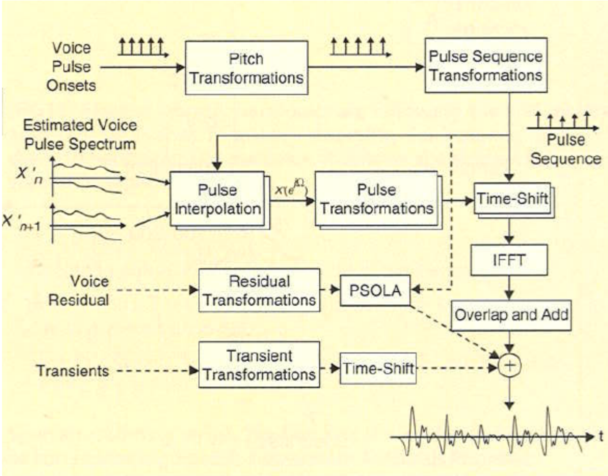
Synthèse par concaténation (1/2)

Schéma d'analyse (d'après Bonada et al.)



Synthèse par concaténation (2/2)

Schéma de synthèse (d'après Bonada et al.)



Vocaloid (Yamaha)

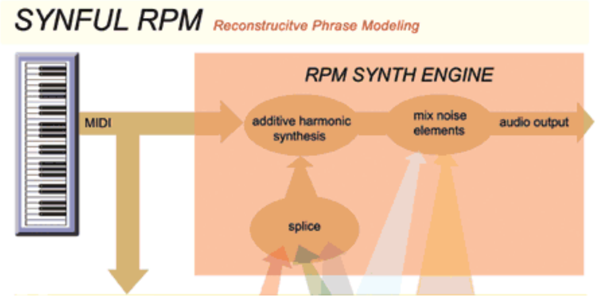
Knightmare Sweet Dreams

Hatsune Miku

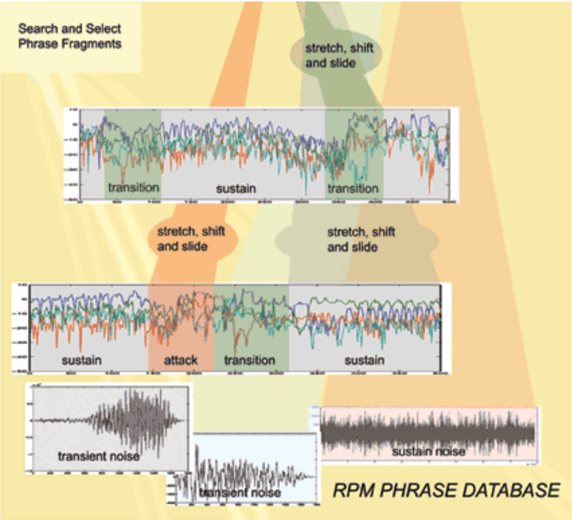
www.dailymotion.com/video/xwd5of_cv01-hatsune-miku-world-is-mine-live-in-tokyo-japan-1080p-full-hd_music

Reconstructive Phrase Modelling (1/2)

Utilisée dans le logiciel Synful



Reconstructive Phrase Modelling (2/2)



TELECOM ParisTech

Synful, exemples

ECOUTE Quartet, Beethoven

ECOUTE Le Sacre du Printemps, Stravinski

TELECOM ParisTech

La synthèse FM (1/4)

- Chowning, 1973,
- FM = modulation de fréquence
- Utilisation d'un modèle, d'élements sources et d'opérateurs
- Historiquement la plus populaire
- Encore très utilisée
- Principe :
  - inspiré de la transmission des ondes Hertziennes mais avec porteuse et modulante du même ordre de grandeur
  - modulation de phase et fréquence instantanée

$$\varphi(t) = 2\pi f_p t + I \sin(2\pi f_m t)$$

$$f_i(t) \equiv \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = f_p + I f_m \cos(2\pi f_m t)$$

La synthèse FM (2/4)

Expression du signal temporel

$$x(t) = A\sin(\varphi(t)) = A\sin\left(2\pi f_p t + I\sin(2\pi f_m t)\right)$$

$$\begin{aligned} x(t) = \; & AJ_0(I)\sin(2\pi f_p t) \\ & + A\sum_{n=1}^{\infty} J_n(I)\sin\left(2\pi(f_p + n f_m)t\right) \\ & - A\sum_{n=1}^{\infty} J_n(I)(-1)^n \sin\left(2\pi(f_p - n f_m)t\right) \end{aligned}$$

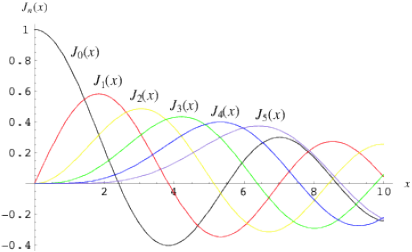
où $J_n(.)$ est la fonction de Bessel de 1ère espèce, d'ordre n

TELECOM ParisTech

La synthèse FM (3/4)

Fonctions de Bessel de 1ère espèce

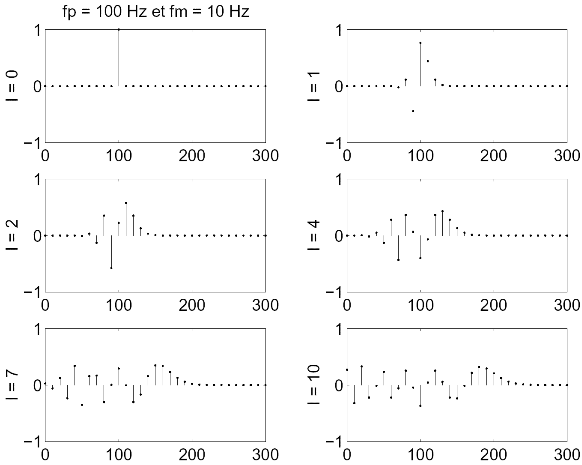
- Forme de vagues amorties et retardées
- Bandes plus larges quand l'ordre augmente
- Variations du spectre imprévisibles si I est élevé



Index de modulation I

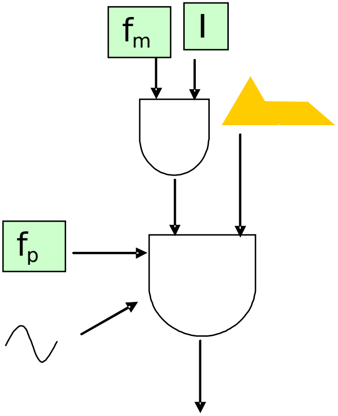
Synthèse FM (4/4)

Variations du spectre avec I

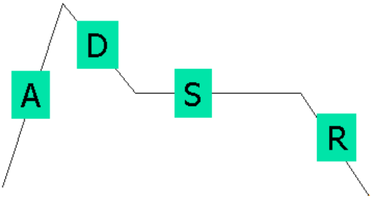


Réalisation d'une synthèse FM

Décomposition en opérateurs

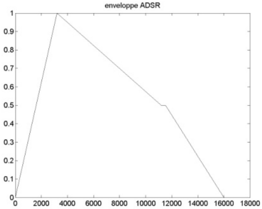


Enveloppe ADSR

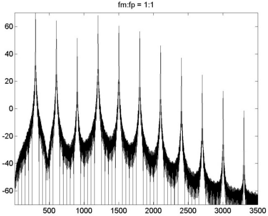


Exemples simples

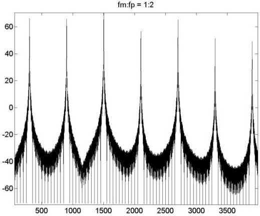
Enveloppe



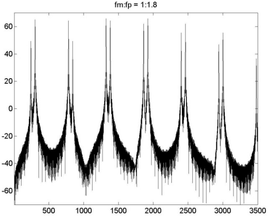
$\frac{f_p}{f_m} = \frac{1}{1}$ Son cuivré



$\frac{f_p}{f_m} = \frac{1}{2}$ Son boisé



$\frac{f_p}{f_m} = \frac{1}{1.8}$ Son inharmonique



Exemple plus complet

- Synthèse de voix chantée (Chowning)
- Pour créer des formants, ajouter 3 synthèses FM
- Exemples de valeurs pour le Do4

f_m	A	I
262	0.4	0.1
524	0.8	0.1
2700	0.15	1.6

Voix chantée en synthèse FM

Synthèse FM : conclusions

- Très populaire
- Faible nombre d'opérateurs
  - grande variétés de timbres
  - à faible coût
  - facilement manipulable
- Difficulté des méthodes d'analyse pour retrouver les paramètres : fortement non linéaire !
  - approximation (algorithme de Justice)

Analyse FM : algorithme de Justice

Représenter un signal $x(n)$ comme le résultat d'une modulation de fréquence :

$$x(n) = A\cos\left(2\pi f_p n + I\cos(2\pi f_m n)\right)$$

Passer en signal analytique ($\mathcal{H}$ est la transformée de Hilbert) :

$$\tilde{x}(n) \equiv x(n) + jy(n) \text{ où } \{y(n)\} = \mathcal{H}\left(\{x(n)\}\right)$$

$$\tilde{x}(n) = A\exp\left(j\varphi(n)\right) \Longrightarrow \varphi(n) = 2\pi f_p n + I\cos(2\pi f_m n)$$

- déplier la phase
- obtenir f_p par régression linéaire : $\hat{f}_p = \arg\min|\varphi(n) - 2\pi f_p n|$
- estimer la fréquence $f_m$sur le résidu : $s(n) = \varphi(n) - 2\pi\hat{f}_p n = I\cos(2\pi f_m n)$

Modélisation physique

- De nombreuses approches plus ou moins complexes
  - Modèle Karplus-Strong
  - Modèle par guide d'ondes
  - Résolution basée sur les principes fondamentaux de la mécanique

Modélisation physique

(d'après Bensoam, IRCAM)

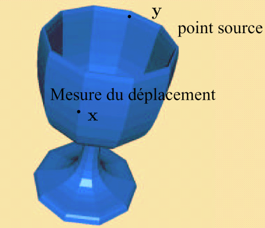
- Basée sur les principes fondamentaux de la mécanique
  - Conservation de la masse
  - Conservation de la quantité de mouvement
  - Conservation des moments
  - 1er principe de la thermodynamique (énergie)
  - 2nd principe de la thermodynamique (entropie)
  - Conduit aux équations du mouvement
- Appliquables, en toute généralité, à des systèmes physiques de géométries et de constitution quelconques
- On rajoute des relations supplémentaires pour traduire la nature physique des milieux envisagés

Simulation

- Discrétisation en temps des équations
- Discrétisation de l'espace de simulation (i.e. la forme de l'instrument)
- Expérience de simulation

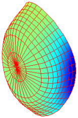
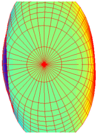
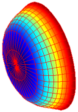
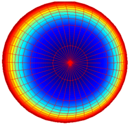
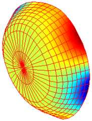
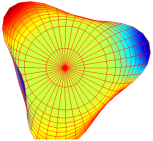
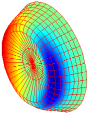
$$\text{Force } f(t) \text{ appliquée en } y \Longrightarrow \text{Réponse } P(x,y,t)$$

$$U(x,t) = P(x,y) * (t)$$



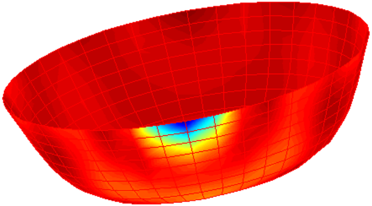
Synthèse d'un bol tibétain (1/2)

Simulation des modes 1 à 7 d'un bol tibétain (Bensoam, IRCAM)

Synthèse d'un bol tibétain (2/2)

Bol tibétain frappé sur le haut

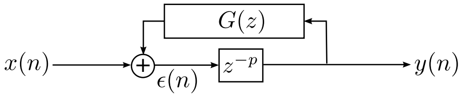


Déplacement

Acceleration

Karplus-Strong (1/2)

Modèle simple de résonateur, avec un filtre passe-bas $G(z)$



$$Y(z) = z^{-p}\varepsilon(z) = z^{-p}\left(X(z) + G(z)Y(z)\right)$$

$$Y(z) = \frac{z^{-p}}{1 - z^{-p}G(z)} X(z)$$

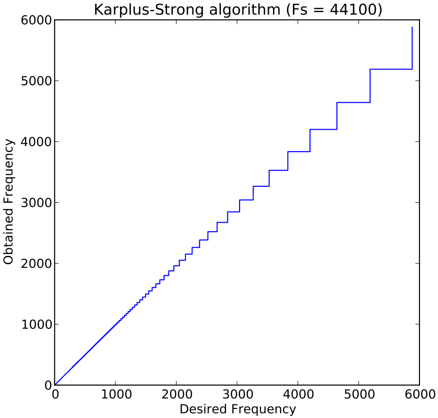
On choisira un passe-bas simple : $G(z) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}z^{-1}$:

$$Y(z) = \frac{z^{-p}}{1 - \frac{1}{2}z^{-p} - \frac{1}{2}z^{-p-1}} X(z)$$

La période est environ $p + \frac{1}{2}$

Karplus-Strong (2/2)

La période est $p + \frac{1}{2}$, les fréquences obtenues sont $\frac{2f_s}{2p+1}$ (f_s est la fréquence d'échantillonnage)



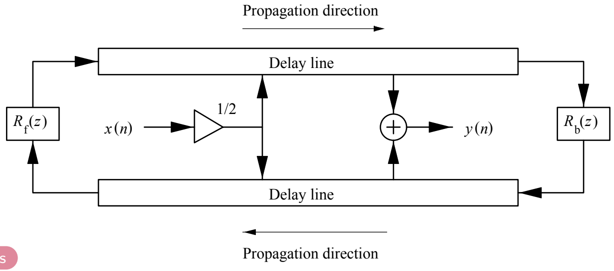
Ligne de transmission

Analogie avec la vibration d'une corde ou la propagation d'une onde sonore dans un tuyau.

$$\frac{1}{C^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$$

$$p(t) = p_1(x - Ct) + p_2(x + Ct)$$

Ligne de transmission bi-directionnelle



Jeux interdits

Conclusion

- De nombreuses techniques existent
- Complexité des approches très variable
- Nécessité d'un compromis entre précision, expressivité et complexité
- La synthèse à partir d'une partition (par exemple MIDI) n'est pas encore de naturelle et musicale

Merci de votre attentionl