

# Option Acoustique Musicale : nano-projets

November 23, 2016

## 1 Sujets autour de la synthèse sonore

Pour tous les sujets autour de la synthèse sonore, je conseille la lecture préalable des documents suivants sur la synthèse sonore [HEZ2013] et [DAV2008]. Je demande toujours une petite étude bibliographique (état de l'art, quelques articles, éventuellement un ou deux \*très bons\* sites web, donc pas wikipedia...), une étude théorique qui figurera dans le rapport, et l'implémentation de la méthode, soit sous matlab, soit en programmation (Java ou C), soit sous PureData ou Max/MSP.

### 1.1 Synthétiseur FM

Mettre en oeuvre la technique de synthèse sonore par modulation de fréquence, inventée en 1967 par John Chowning, et popularisée dans les 80's grâce au célèbre synthétiseur DX7 de Yamaha (Depeche Mode, The Cure, Tear for fears, etc.). Le principe fondamental consiste à générer un son riche en harmonique en modulant un signal sinusoïdal par un autre oscillateur sinusoïdal de fréquence différente. Il existe de nombreux raffinements : modulations multiples et en cascade, auto-modulation...

Biblio spécifique : l'article historique de J. Chowning [CHOW].

*Travail à réaliser* : réaliser une étude théorique de la synthèse FM (principe de la modulation FM, compréhension du spectre généré à l'aide des fonctions de Bessel, topologie des oscillateurs), implémenter la méthode et proposer quelques exemples de synthèse (sons naturels et sons artificiels).

### 1.2 Synthétiseur de Karplus-Strong (dit "par modèle physique")

Il s'agit d'une méthode de synthèse sonore par modèle physique, c'est-à-dire utilisant les équations de la physique pour modéliser la production du son par l'instrument. La méthode KS utilise les ingrédients suivants : propagation dans des guides d'onde (simulés sous forme de ligne à retard  $z^{-n}$ ), filtrage passe-bas et enfin, boucle de (contre-)réaction. C'est une méthode qui fonctionne très bien avec les instruments à corde pincée (guitare, clavecin), ainsi que les percussions.

On pourra étudier l'algorithme détaillé ici :

[http://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Karplus\\_Strong\\_Algorithm.html](http://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Karplus_Strong_Algorithm.html)

et/ou suivre le sujet détaillé ici :

[http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/tp\\_karplus.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/tp_karplus.pdf)

*Travail à réaliser* : réaliser une étude théorique de la synthèse KS, puis implémenter la méthode et proposer quelques exemples de synthèse pour la guitare ou pour des percussions.

### 1.3 Synthétiseur par méthode additive

Synthèse sonore d'un instrument par la technique additive utilisée dans de nombreux synthétiseurs des années 80. Le principe consiste à construire un signal musical complexe en additionnant plusieurs partiels à des fréquences et amplitudes judicieusement choisies, puis en modulant les partiels en amplitude (enveloppe ADSR). Par exemple, si l'on se restreint à une enveloppe "decay", on aurait une construction du type

$$x(t) = \sum_i a_i \sin \omega_i t e^{-t/\tau_i}$$

où  $\tau_i$  est le temps de "decay" associé au  $i$ ème partiel, et qui rend compte de l'absorption différente par les matériaux des aigus et des graves. Les fréquences  $\omega_i$  ne sont pas nécessairement dans un rapport harmonique.

On pourra suivre le sujet détaillé suivant : [http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/tp\\_synthese\\_additive.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/tp_synthese_additive.pdf)

*Travail à réaliser* : Implémenter un algorithme de synthèse additive. Il doit être facile d'éditer les paramètres. On pourra choisir un instrument, analyser ses partiels et affiner les paramètres de synthèse en fonction de cette analyse.

### 1.4 Synthétiseur soustractif (aka mini-moog) :

La synthèse soustractive est une technique de synthèse simple et puissante, utilisée dès les 60's dans les synthétiseurs Moog, et remise au goût du jour au milieu des 90's avec la généralisation de l'utilisation des échantillonneurs à loop par les DJ's. Elle repose sur l'utilisation de filtres pour modifier le spectre sonore par suppression d'harmonique. Le signal source riche en harmoniques (somme d'oscillateurs simples ou échantillonnage numérique d'un instrument) passe à travers une série de filtres dont les paramètres (fréquence de coupure, résonance, ...) varient généralement au cours du temps. Si la source d'origine a un spectre riche et si le filtre est flexible, la synthèse soustractive permettra de reproduire de nombreux sons naturels (tels que les voix et les instruments traditionnels), ainsi qu'une large variété de sons et de timbres.

*Travail à réaliser* : Implémenter un algorithme de synthèse soustractive. Réaliser un modèle de synthétiseur utilisant trois oscillateurs (dont on pourra choisir les formes d'ondes parmi sinus, carré, triangle) ainsi qu'un filtre passe-bas du 4ème ordre dont on pourra faire varier la fréquence au cours du temps. Il doit être facilement possible d'éditer les paramètres.

## 1.5 Synthétiseur modulaire

Les synthétiseurs modulaires sont construits à partir d'éléments de base indépendants que l'on peut connecter entre eux. Les différents éléments peuvent être des outils de génération de signaux sonores (sinus, bruit etc.) ou de signaux de commande (enveloppe, fréquence etc.), ou bien des outils de traitement du son (filtre, amplificateur, etc.). Chaque élément prend en entrée un certain nombre de paramètres et, s'il s'agit d'un outil de traitement, un signal à modifier. Le but de ce mini-projet est de programmer un synthétiseur modulaire qui permette de relier des modules entre eux, dans n'importe quel ordre, pour générer des sons originaux.

Le sujet détaillé est disponible ici : [http://www-reynal.ensea.fr/IMG/pdf/Nanoprojet\\_AMEA\\_2012\\_SynthModul.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/IMG/pdf/Nanoprojet_AMEA_2012_SynthModul.pdf)

On pourra cependant commencer par lire les documents sur la synthèse sonore [HEZ2013] et [DAV2008].

*Travail à réaliser* : Réaliser l'implémentation d'un synthétiseur modulaire, soit sous Matlab, sous PureData (ou son équivalent MAX/MSP), soit en Java.

## 1.6 Synthétiseur granulaire

La synthèse granulaire consiste à combiner des "grains" de signaux existants (souvent enregistrés) pour produire un nouveau signal complexe. Les grains sont des échantillons sonores de l'ordre de la milliseconde (10 à 100 ms) dont on contrôle globalement la densité, la hauteur, la longueur, l'enveloppe, etc. le plus souvent sous la forme d'intervalles dans lesquels le programme de synthèse choisit des valeurs de manière aléatoire. Le son obtenu est une sorte de nuage, composé de l'ensemble des grains.

Doc initiale ici : <http://www.soundonsound.com/techniques/granular-synthesis>

Site de ressource sur la SG : <http://www.granularsynthesis.com>

Un exemple de SG appliquée à la voix : <https://www.youtube.com/watch?v=puXWMZ6bUCA>

*Travail à réaliser* : Réaliser l'implémentation d'un synthétiseur granulaire, soit sous Matlab, sous PureData (ou son équivalent MAX/MSP), soit en Java.

## 1.7 Synthèse de sons voisés par filtrage formantique

Ce projet a pour but de réaliser un synthétiseur de voyelles en Matlab. Le synthétiseur s'appuie sur la modélisation source-filtre de la production vocale. La source est générée par un synthétiseur paramétrique et le filtre est une concaténation de filtres passe-bande paramétriques. Après une étape de recherche bibliographique sur les thèmes de la synthèse source-filtre et de la phonétique, il est proposé de réaliser une étude comparative des différents modèles programmés et un dictionnaire de voyelles.

Le sujet détaillé est disponible ici : [http://www-reynal.ensea.fr/IMG/pdf/Nanoprojet\\_AMEA\\_2012\\_SyntheFormantique.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/IMG/pdf/Nanoprojet_AMEA_2012_SyntheFormantique.pdf)

## 1.8 Vocodeur

Le vocodeur est un instrument synthétique dédié à la synthèse vocale à partir d'un signal musical réel (instrument ou voix).

Le principe du vocodeur est de découper un signal musical (dit "signal modulant") en  $N$  bandes fréquentielles à l'aide d'un **banc de filtre**, de suivre l'amplitude des signaux à la sortie de chaque filtre passe-bande et finalement d'utiliser ce suivi d'amplitude pour moduler un signal audio synthétique (dit "signal porteur"). On obtient ainsi une voix artificielle (aka Daft Punk ou Air et leur voix "robotisée") à partir d'une voix réelle.

Bibliographie : pour démarrer, [http://www.sirlab.de/linux/descr\\_vocoder.html](http://www.sirlab.de/linux/descr_vocoder.html) et <http://www.matsc.net/vocator%20i.html>.

# 2 Sujets autour du traitement du signal pour la musique

## 2.1 Convertisseur audio/MIDI

Il s'agit d'étudier un signal audio en utilisant l'une de ces représentations, le chromagramme, puis d'implémenter un algorithme permettant d'extraire la mélodie d'un morceau et de la convertir en codes MIDI. Le sujet détaillé question par question est disponible ici :

[http://www-reynal.ensea.fr/teaching/amea/tp/tp\\_chroma.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/teaching/amea/tp/tp_chroma.pdf)

On pourra commencer par lire les notes de cours correspondantes : [HPAP2013]

Ce sujet est encadré par [helenepapadopoulos@hotmail.com](mailto:helenepapadopoulos@hotmail.com)

## 2.2 Représentation des signaux musicaux : comparaison de la Transformée de Fourier et de la "Constant-Q Transform" pour un signal audio

On se propose dans ce mini-projet d'étudier une représentation fréquentielle du signal autre que la transformée de Fourier conventionnelle : la trans-

formée  $Q$  constante ou constant  $Q$  transform, CQT. Proche de la manière dont fonctionne le système auditif humain, cette représentation est bien adaptée aux signaux de musique. Après avoir compris les avantages d'une telle représentation, elle sera implantée sous matlab (ou PureData). Elle sera ensuite comparée à la TFD traditionnelle en utilisant divers exemples musicaux.

Le sujet détaillé est disponible ici : [http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/tp\\_constantQ.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/tp_constantQ.pdf)

Ce sujet est encadré par [helenepapadopoulos@hotmail.com](mailto:helenepapadopoulos@hotmail.com)

### **2.3 PSOLA (Pitch Synchronous OverLap and Add)**

C'est une technique de traitement du signal numérique utilisée pour le traitement de la parole. Cette technique permet, entre autres, d'effectuer des modifications de la prosodie (évolution de la fréquence instantanée du signal) et de la durée d'un signal de parole. Le but du projet est de réaliser une implémentation Matlab de l'algorithme PSOLA. Le programme sera capable de transposer et de rallonger/raccourcir un signal de parole. La programmation est guidée et certaines fonctions sont fournies.

Le sujet ainsi que les documents nécessaires sont disponibles ici : [http://www-reynal.ensea.fr/IMG/zip/Nanoprojet\\_AMEA\\_2012\\_PSOLA.zip](http://www-reynal.ensea.fr/IMG/zip/Nanoprojet_AMEA_2012_PSOLA.zip)

## **3 Sujets autour de l'électro-acoustique**

### **3.1 Mesure et amélioration des caractéristiques acoustiques d'une salle - application à la chambre sourde et/ou à la cabine d'écoute**

Il s'agit de s'initier à l'acoustique des salles, et notamment à ce qui "fait une bonne cabine d'écoute". Il faudra de comprendre la notion de modes de résonance, et ce qui influence leur position spectrale et leur coefficient de qualité. Dans un premier temps, on construira un dispositif expérimental de mesure des modes acoustiques d'une salle. Puis on cherchera le meilleur positionnement des éléments acoustique d'amortissement pour éviter les modes de résonance et améliorer la réponse de la salle.

### **3.2 Mesure des caractéristiques réverbérantes d'une salle - application à la réverbération artificielle**

Il s'agit ici aussi de s'initier à l'acoustique des salles, mais plutôt sous l'angle de la spatialisation. Il faudra comprendre la notion de modes de résonance, et en quoi ils influencent la réponse temporelle de la salle (la "réverbération"). Dans un premier temps, on construira un dispositif expérimental

de mesure de la réponse impulsionnelle d'une salle (il existe plusieurs techniques utilisant la déconvolution). Puis on concevra un algorithme permettant d'émuler cette réverbération sur machine et on comparera avec la réponse réelle de la salle (amphi, salle de TD, tout peut faire l'affaire).

### **3.3 Conception d'un amplificateur classe A pour casque audio**

Il s'agit d'un sujet pour fans d'électronique analogique, consistant à réaliser une baie d'amplification pour casque à 4 voix. Cette baie sera branchée sur la console du studio de la chambre sourde. Il s'agit de choisir un circuit intégré approprié pour ce type d'application en amplification classe A (exemple : TDA2030), de concevoir le circuit (prévoir une EQ grave/aigu et un potentiomètre de niveau, et la possibilité de passer en mono ou stereo), et finalement de concevoir puis de réaliser le circuit (breadboard ou wrapping).

### **3.4 Conception d'un préamplificateur pour microphone électrodynamique**

Il s'agit d'un sujet pour fans d'électronique analogique, consistant à réaliser un préamplificateur (AOp ou transistors ou CI...) pour microphone électrodynamique (non polarisé). Il s'agira de réfléchir à un cahier des charges simples (quel critères ? SNR ? consommation ?), de choisir le schéma le plus approprié pour ce type d'application, et finalement de concevoir puis de réaliser le circuit (breadboard ou wrapping).

### **3.5 Etude des systèmes de liaison filaire entre Console FOH et scène : sym, asym, boîtes de DI**

Il s'agit de mettre en oeuvre et de mesurer les performances de plusieurs types de liaison filaire entre la console de mixage et la scène lors d'un live : liaison asymétrique, liaison symétrique, boîte de D.I., ... Quelles sont leurs performances respectives ? Leur SNR ? etc. L'accent est vraiment sur la mesure.

On pourra ensuite réaliser un petit circuit symétriseur/désymétriseur à ampli-op, à titre d'illustration.

### **3.6 Techniques de prise de son stéréophonique**

Réaliser une étude bibliographique de la prise de son stéréophonique (couples de microphone, positionnement, techniques particulières liées à tel ou tel instrument), puis mettre cette technique en oeuvre sur un instrument au choix (chambre sourde, ou salle du piano).

Matériel : microphones électrostatiques LEM, carte son, câbles XLR-XLR, pieds, acquisition sous matlab ou Audacity.

WARNING : ce sujet ne peut être choisi que par un seul binôme (en raison du matériel disponible en un seul exemplaire !).

Bibliographie : "la prise de son stéréophonique" (disponible au centre de documentation).

## 4 Sujets autour de la musicologie

### 4.1 Musique et mathématiques

On propose d'analyser au travers de quelques articles de mathématiciens/musicologues, les apports de la théorie des groupes dans : i) l'analyse de la construction d'oeuvres en musique baroque ou classique ; ii) la composition en musique contemporaine chez Boulez.

Travail à réaliser : une étude bibliographique (choisir un ou deux articles au maximum, et approfondir leur étude), puis implémenter quelques exemples illustrant une ou l'autre méthode exposée (sous Matlab, PureData, MAX/MSP ou en Java selon votre goût). Les articles sont disponibles sur le site de l'option, cf bibliographie attenante : [APAP101], [ANDR], [FISH], [APAP112], [TAQ] et [WEI].

### 4.2 Systèmes de gammes en orient et en occident

Réaliser un programme sous matlab ou PureData/MaxMSP permettant de construire et de jouer (à l'aide d'une interface utilisateur simple) différents systèmes de gammes (Bach, Pythagore, dodécaphonique, arabe, Werkmeister, gammes indo-pakistanaïses, ...).

Bibliographie : s'inspirer du sujet de TP "gammes" disponible sur le site [http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/tp\\_gammes.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/tp_gammes.pdf)

Vous y trouverez également un Notebook Mathematica d'introduction : <http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/amea1.nb>

## References

- [HEZ2013] T. Hezard, Transparents de cours sur les différentes techniques de synthèse sonore : [http://www-reynal.ensea.fr/IMG/pdf/AMEA\\_2012-2013\\_poly\\_Synthese.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/IMG/pdf/AMEA_2012-2013_poly_Synthese.pdf)
- [CHOW] John M. Chowning, The Synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation. [http://www-reynal.ensea.fr/IMG/pdf/Article\\_Chowning\\_Synthese\\_FM.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/IMG/pdf/Article_Chowning_Synthese_FM.pdf)
- [HPAP2013] H. Papadopoulos, Transparents de cours sur les représentations temps-fréquences adaptées aux signaux musicaux (chromagramme, etc.). [http://www-reynal.ensea.fr/IMG/pdf/lecture\\_pitch\\_chroma\\_amea\\_2013\\_6.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/IMG/pdf/lecture_pitch_chroma_amea_2013_6.pdf)

- [DAV2008] B. David, Polycoché de cours d'introduction à la modélisation des instruments et à la synthèse sonore. [http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/acmus\\_ensea02.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/acmus_ensea02.pdf)
- [APAP101] A. Papadopoulos, Mathématique et musique chez J.S. Bach, [http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/100\\_101\\_Papadopoulos.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/100_101_Papadopoulos.pdf).
- [ANDR] M. Andreatta, Quelques aspects théoriques d'une approche algébrique en musique, [http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/112\\_Andreatta.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/112_Andreatta.pdf).
- [FISH] M. Fisher, Leonhard Euler et la musique, [http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/112\\_Fischer.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/112_Fischer.pdf).
- [APAP112] A. Papadopoulos, Consonance musicale et complexité mathématique, [http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/112\\_Papadopoulos.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/112_Papadopoulos.pdf).
- [TAQ] R. Taquard, Quelques exemples d'utilisation des mathématiques dans la théorie et la composition musicales, [http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/112\\_Taquard.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/112_Taquard.pdf).
- [WEI] N. Weiss, Quelques propriétés de la technique de Boulez de multiplication des blocs sonores, [http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/114\\_Weiss.pdf](http://www-reynal.ensea.fr/docs/amea/114_Weiss.pdf).