

Option Electronique et Signal pour la Musique : nano-projets

S. Reynal, L. Fiack

Printemps 2024

Contents

1	Production demandée et évaluation	2
2	Sujets autour de la synthèse sonore ou de traitements audio	2
2.1	Synthétiseur de Karplus-Strong (dit "par modèle physique") .	3
2.2	Synthétiseur FM	3
2.3	Synthétiseur par méthode additive	3
2.4	Synthétiseur soustractif (aka mini-moog) :	4
2.5	Synthétiseur granulaire	4
2.6	Algorithme de stretch et pitch-shift	5
2.7	Modification de la voix chantée par la méthode PSOLA (Pitch Synchronous OverLap and Add)	5
3	Sujets autour de la MIR	5
3.1	Convertisseur audio vers MIDI (extraction automatique de partition à partir d'un MP3)	5
3.2	Classification en genres musicaux par Deep Learning	6
3.3	Séparation de sources d'un morceau de musique par la méthode de "NMF informée"	6
3.4	Séparation automatisée de la voix et de l'accompagnement	6
3.5	Visualisation automatique de la structure d'un morceau de musique	6
3.6	Algorithme Shazam	7
4	Sujets art et sciences : danse, musicologie, composition automatique, ...	7
4.1	Musique et mathématiques	7
4.2	Composition automatique de musique avec OpenMusic (production de partitions)	8
4.3	Systèmes de gammes en orient et en occident	8

5 Sujets expérimentaux autour de l'acoustique	8
5.1 Mesure et amélioration des caractéristiques acoustiques d'une salle - application à la chambre sourde et/ou à la cabine d'écoute	8
5.2 Mesure des caractéristiques réverbérantes d'une salle - application à la réverbération artificielle	8
5.3 Mesure du diagramme de rayonnement d'un instrument de musique	9
6 Sujets autour de l'électronique audio : conception de circuits	9
6.1 Conception d'un préamplificateur class A pour microphone électrodynamique	9
6.2 Etude des systèmes de liaison filaire entre Console FOH et scène : sym, asym, boîtes de DI	9

1 Production demandée et évaluation

Il faut produire :

- un rapport écrit de quelques pages (étude théorique, éventuellement état de l'art, présentation critiques des résultats),
- une réalisation pratique : selon le sujet, il peut s'agir de l'implémentation d'un algorithme en python/matlab/scilab/octave/Java/C/C++ etc, de la création d'un patch avec PureData ou Max/MSP, de la réalisation d'une carte électronique, de la conduite d'une expérience (mesure, acoustique des salles, prise de son) etc.
- une démo lors de la dernière séance.

Certains sujets ci-dessous sont fournis avec des exemples écrits pour **matlab** : il est tout à fait possible de tester ces exemples avec un logiciel concurrent et gratuit comme Scilab (scilab.org) ou GNU Octave (octave.org).

2 Sujets autour de la synthèse sonore ou de traitements audio

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.

2.1 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

et/ou suivre le sujet détaillé ici :

http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/projet_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.

2.2 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).

2.3 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 τ_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 ω_i ne sont pas nécessairement dans un rapport harmonique.

On pourra suivre le sujet détaillé suivant : http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/projet_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.

2.4 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.

Pour commencer :

<https://www.roland.com/uk/blog/guide-to-subtractive-synthesis/>

2.5 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.

2.6 Algorithme de stretch et pitch-shift

Il s'agit d'étudier un algorithme permettant de modifier un son, soit en durée (stretch : titre 'étiré' sans modification de la hauteur tonale), soit en hauteur tonale (pitch-shift : titre plus aigu ou plus grave, sans modification de la durée). C'est ce type d'algorithmes qui est utilisé dans Live Ableton, Traktor, ... pour mixer des clips audio ou des tracks dont les tempos ou les tonalités ne "matchent" pas initialement.

Il s'agit ici, modestement, d'exploiter le code des algorithmes existants et d'être capable, à la fin du projet, d'expliquer comment il fonctionne. Je vous propose d'utiliser la technique du [vocoder](#) de phase. Plusieurs exemples de code existent déjà, dont par exemple une implémentation en python : <https://github.com/haoyu987/phasevocoder>.

2.7 Modification de la voix chantée par la méthode 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/docs/sigmus/projet_PSOLA.pdf et http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/projet_PSOLA.zip.

3 Sujets autour de la MIR

3.1 Convertisseur audio vers MIDI (extraction automatique de partition à partir d'un MP3)

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 :

https://reynal.etis-lab.fr/docs/sigmus/projet_chroma.pdf

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

3.2 Classification en genres musicaux par Deep Learning

Le but de ce projet est de réaliser une classification en genre musical à partir du signal audio. La classification sera réalisée à l'aide d'un réseau de neurones profonds constitué de couches convolutives. L'apprentissage et l'évaluation de ce réseau de neurones seront réalisés sur la base de données Free Music Archive. Le système fera une classification monolabel (un seul genre prédit par morceau) sur 8 classes de genres.

Voir le sujet détaillé ici : http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/Projet_ENSEA_classification_en_genres_musicaux.pdf

3.3 Séparation de sources d'un morceau de musique par la méthode de "NMF informée"

Il s'agit de séparer les différentes sources qui composent un signal de musique dans le cas où l'on dispose uniquement d'un signal monophonique. C'est un problème qui a de nombreuses applications telles que la transcription automatique des morceaux de musique, la reconnaissance d'instruments, ou l'estimation de la mélodie.

Sujet détaillé : http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/projet_separation_sources_nmf.pdf et les divers scripts matlab pour démarrer http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/projet_separation_sources_nmf.zip

3.4 Séparation automatisée de la voix et de l'accompagnement

La séparation de la voix chantée est une étape essentielle pour plusieurs applications telles que l'identification de chanteur, la transcription de la mélodie, la recherche par fredonnement.

Sujet détaillé : http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/projet_separation_voix.pdf et divers documents matlab http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/projet_separation_voix.zip

3.5 Visualisation automatique de la structure d'un morceau de musique

Les morceaux de musique sont structurés à différentes échelles de temps (battements, temps, accords, mesure, phrase, section etc.). L'estimation de la structure consiste à décrire l'organisation des éléments qui constituent un morceau de musique à un niveau macro-temporel. Ce problème a de nombreuses applications, dont l'indexation dans de grandes bases de données, la

classification des musiques par genre ou la génération de résumés audio, et a attiré l'attention de nombreux chercheurs ces dernières années.

Sujet détaillé : http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/projet_structure.pdf et les documents matlab utiles pour démarrer http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/projet_structure.zip

3.6 Algorithme Shazam

L'objectif est de reproduire l'algorithme d'identification audio par technique de fingerprint de Shazam tel que publié [ici](#) ; il faudra construire :

- une base de morceaux faites de ses morceaux personnel (votre collection musicale)
- une fonction A permettant l'extraction des fingerprints d'un titre donné et le stockage de ceux-ci dans un fichier ;
- une fonction B de batch appelant la fonction A sur tout les morceaux de la base, et créant un fichier unique stockant tous les triplets [fingerprint, morceau d'origine, temps d'origine] ;
- une fonction C de reconnaissance audio, celle-ci enregistrera le signal audio du micro (fonction matlab audiorecorder), appellera la fonction A pour obtenir les fingerprints et appellera la fonction D de reconnaissance ;
- une fonction D qui recherchera le meilleur appariement entre fingerprint d'entrée et ceux stockés dans la base.

4 Sujets art et sciences : danse, musicologie, composition automatique, ...

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 Composition automatique de musique avec OpenMusic (production de partitions)

Il s'agit d'exploiter l'environnement OpenMusic, un logiciel de programmation graphique (similaire à puredata) dédié à la composition musicale, qui permet de générer des morceaux de musique à partir de règles de programmation (transpositions, figures rythmiques, etc.).

Download : <https://openmusic-project.github.io/openmusic/download.html>

Prise en main du logiciel OpenMusic : <http://repmus.ircam.fr/openmusic/home>

4.3 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/sigmus/tp_gammes.pdf

Vous y trouverez également un Notebook Mathematica d'introduction : http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/mathematica_gammes.nb

5 Sujets expérimentaux autour de l'acoustique

5.1 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 appréhender 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.

5.2 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).

5.3 Mesure du diagramme de rayonnement d'un instrument de musique

Il s'agit de réaliser un dispositif expérimental capable de mesurer le diagramme de rayonnement d'un instrument (guitare, clarinette,...) dans la salle semi-anéchoïde et de comparer les résultats obtenus avec un modèle simplifié de diagramme de directivité.

6 Sujets autour de l'électronique audio : conception de circuits

6.1 Conception d'un préamplificateur class A pour microphone électrodynamique

Il s'agit d'un sujet pour fans d'électronique analogique, consistant à réaliser un préamplificateur à transistor classe A pour microphone électrodynamique (donc non polarisé). Il s'agira de réfléchir à un cahier des charges simples (quel critère ? SNR ? consommation ?), de choisir le schéma le plus approprié pour ce type d'application, et finalement de concevoir puis de réaliser le circuit.

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

References

- [HEZ2013] T. Hezard, Transparents de cours sur les différentes techniques de synthèse sonore : http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/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/docs/sigmus/projet_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/docs/sigmus/lecture_pitch_chroma_amea_2013_6.pdf
- [DAV2008] B. David, Polycopié de cours d'introduction à la modélisation des instruments et à la synthèse sonore. http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/acmus_ensea02.pdf
- [APAP101] A. Papadopoulos, Mathématique et musique chez J.S. Bach, http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/math_100_101_Papadopoulos.pdf.
- [ANDR] M. Andreatta, Quelques aspects théoriques d'une approche algébrique en musique, http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/math_112_Andreatta.pdf.
- [FISH] M. Fisher, Leonhard Euler et la musique, http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/math_112_Fischer.pdf.
- [APAP112] A. Papadopoulos, Consonance musicale et complexité mathématique, http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/math_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/sigmus/math_112_Tacquard.pdf.
- [WEI] N. Weiss, Quelques propriétés de la technique de Boulez de multiplication des blocs sonores, http://www-reynal.ensea.fr/docs/sigmus/math_114_Weiss.pdf.