

SÉMANTIQUE UNIFIÉE POUR LA STRUCTURATION DES OBJETS AUDIO-NUMÉRIQUES SELON DES CRITÈRES PERCEPTIFS, EN VUE D'UNE NOTATION POUR LA MUSIQUE ÉLECTROACOUSTIQUE

Thomas Meyssonnier

Univ. Bordeaux, LaBRI, UMR 5800, F-33400, Talence, France

CNRS, LaBRI, UMR 5800, F-33400, Talence, France

thomas.meyssonnier@labri.fr

Myriam Desainte-Catherine

Univ. Bordeaux, LaBRI, UMR 5800, F-33400, Talence, France

CNRS, LaBRI, UMR 5800, F-33400, Talence, France

INRIA, F-33400, Talence, France

myriam.desainte-catherine@labri.fr

RÉSUMÉ

Nous travaillons dans le cadre global de la recherche d'une notation pour la musique électroacoustique. Les systèmes de notation existants sont fondés sur l'appréciation humaine des critères perceptifs, reliés implicitement aux propriétés des représentations numériques du son. Nous cherchons donc un système de représentation qui permettra par la suite d'explicitier ces relations. Suite à une analyse détaillée de la problématique dans ses spécificités, nous proposons un formalisme minimal permettant de représenter de façon unifiée les objets audio-numériques, selon des critères perceptifs. Nous expliquons comment les propriétés de ce formalisme permettent une structuration analogue du sonore et du musical, selon des critères spectromorphologiques, ainsi qu'une classification hiérarchique des schémas structurels émergents dans cette représentation. Nous poursuivons en présentant un exemple d'utilisation du formalisme, qui montre ses possibilités en termes de structuration. Nous concluons par un tour d'horizon des perspectives ouvertes par cette étape clef de la tâche globale.

1. INTRODUCTION

Le cadre général est celui de la recherche d'une notation pour la musique électroacoustique, qui à l'heure actuelle est le plus souvent non-notée, dans le but de proposer des outils conceptuels pour l'analyse et la composition. En effet les systèmes de notation, en musique comme ailleurs, ont permis historiquement, en permettant d'objectiver, de rationaliser et de comparer les contenus, de développer des systèmes de pensée beaucoup plus élaborés.

Par rapport aux systèmes traditionnels de notation, le problème dans ce cas présente des besoins spécifiques qui sont déjà exprimés dans les prémisses de la théorie Schaefferienne [1] :

- Les éléments employés n'ayant pas en général un timbre standard défini de façon consensuelle (à l'inverse de la musique instrumentale), il est nécessaire de pouvoir décrire également les critères concrets

ou sonores et pas seulement des valeurs abstraites ou musicales. Notamment la distinction de la *forme* et de la *matière* implique de s'intéresser à l'évolution du *spectre* au cours du *temps*.

- Le discours musical pouvant porter sur des valeurs arbitraires, et pas forcément les valeurs traditionnelles de hauteur, durée et intensité, il est nécessaire de pouvoir structurer cette notation avec une flexibilité suffisante pour pouvoir faire émerger les valeurs souhaitées selon l'intention de l'auteur.
- Le cadre d'écoute étant *acousmatique*, c'est à dire que le son ne renvoie pas nécessairement à une ou des causes dans une réalité extérieure, il est nécessaire d'exprimer les oeuvres selon la façon dont elles seront entendues et non pas selon la façon dont elles sont produites.

Denis Smalley [12] souligne dans son système *spectromorphologique* l'importance pour l'analyse de la distinction entre le matériau spectral et la forme temporelle de son évolution, ces deux aspects complémentaires étant inévitablement et de façon indissociable à la base de tout phénomène de la perception sonore.

1.1. Travaux de référence

A partir des travaux de Pierre Schaeffer, on a vu apparaître plusieurs systèmes de notation pour la musique électroacoustique comme celui de Lasse Thoresen [14] (qui représente graphiquement les structures spectromorphologiques¹), ou encore celui de Jean-Louis Di Santo [7] (qui a donné lieu au logiciel *Acousmoscribe*), qui repose sur des symboles associés aux différentes dimensions du phénomène sonore. On a également vu le logiciel *EAnalysis* de Pierre Couprie [5] qui permet d'associer librement des éléments graphiques à des critères d'analyse (consensuels ou personnels).

D'une manière générale, ces systèmes reposent sur l'appréciation humaine de critères sonores et musicaux, qui même si leur formulation est tout à fait objective ne sont

¹ . C'est à dire que l'axe vertical représente le domaine des hauteurs et l'axe horizontal celui du temps, comme sur un sonagramme. Néanmoins ici la représentation est sémantiquement structurée de façon iconographique.

pas pour autant définis de façon formelle dans leur relation avec des représentations audio-numériques.

1.2. Transposition audio-numérique

Ceci nous motive à rechercher une sémantique unifiée et plus générale qui permette de formuler sur le plan audio-numérique ces systèmes de représentation des critères perceptifs, de façon à dégager les *structures* et les *classes* qui émergent de ces systèmes.

En effet, il s'agit là d'une étape-clef qui permettra par la suite de formuler les systèmes de représentation du sonore et du musical (comme le solfège du son de Schaeffer) et ainsi de pouvoir formaliser et automatiser le passage entre une notation humainement lisible et un enregistrement audio-numérique.

Nous nous référons largement à des concepts d'informatique et de synthèse sonore, mais précisons bien que l'objectif visé n'est pas de produire un nouveau langage pour la synthèse sonore, les langages existants permettant de résoudre de façon efficace la plupart des problèmes techniques. Il s'agit plutôt de proposer un outil conceptuel intermédiaire et spécialisé qui permettra de faire le lien entre les systèmes musicologiques et les langages informatiques existants.

1.3. Démarche empirique

La cognition auditive humaine se comportant comme une *boîte noire* dont on ne peut pas simplement déduire les propriétés en analysant ses composantes, on ne cherchera pas à construire un *analyseur* puisque cela supposerait connues ces propriétés.

Au lieu de cela on proposera un modèle pour la *synthèse* qui permettra des expérimentations empiriques afin d'identifier progressivement, dans un cadre formel unique, les schémas de structuration du sonore et du musical qui sont signifiants dans l'audition humaine.

Dans ce but on se livre tout d'abord à une analyse de la problématique, pour en dégager les spécificités et déterminer les principes sous-jacents à sa résolution. A partir de là on propose un formalisme minimal, dont on décrit les principales catégories. Un exemple est fourni, qui montre le modèle en action et éclaire ses principes de fonctionnement. En conclusion, on présente les perspectives de développement qui deviennent envisageables à partir de cette étape initiale indispensable.

2. ANALYSE DE LA PROBLÉMATIQUE

Définir une notation suppose de lui donner une sémantique permettant de l'interpréter (au sens logique et non au sens musical du terme), objectivement et sans ambiguïté. On propose donc ici un formalisme généraliste permettant d'exprimer cette sémantique, dans le respect des contraintes spécifiques du problème.

2.1. Représentation structurée

On cherche à faire le lien entre une représentation du sonore à bas niveau (séquence d'échantillons) et une représentation du musical à haut niveau (c'est à dire humainement lisible). Le formalisme doit donc pouvoir structurer le sonore sur un nombre arbitraire de niveaux d'échelle, à partir de ses objets élémentaires.

Cette structuration des éléments permet de *nommer* et de *classer* dans des catégories des plus spécifiques aux plus générales les structures jugées pertinentes, selon les critères jugés pertinents dans l'intention de l'auteur.

2.2. Paradigme descriptif

Le problème revient à *décrire* un objet structuré (et non un processus computationnel), on préfère donc une formulation *déclarative* (expression fonctionnelle dérivée du λ -calcul de Church [2]) et non *procédurale*. On cherche en outre à éliminer les effets de bord de façon à préserver le sens des expressions indépendamment du contexte.

2.3. Objets élémentaires

Puisqu'on cherche à écrire le musical et le sonore selon la façon dont ils seront entendus, on doit restreindre le choix des objets élémentaires du langage (par rapport à ceux utilisés en général dans la musique par ordinateur) à des objets possédant deux propriétés fondamentales :

1. Ils doivent eux-mêmes être *irréductibles* par l'audition humaine, c'est à dire qu'ils ne sont pas déjà une structure composée d'éléments plus petits.
2. Ils doivent être individuellement *porteurs de sens* dans l'audition humaine, c'est à dire qu'à eux seuls ils constituent déjà un objet audio-numérique complet.

Des objets de ce type sont présents dans la synthèse audio-numérique depuis ses débuts, et on peut s'appuyer sur des définitions consensuelles en se référant par exemple à un langage comme Csound [6].

On vise à décrire les objets de façon spectromorphologique, donc selon le critère *spectral* et le critère *temporel*. Le critère spectral se traduit par des *générateurs de signaux* et le critère temporel par des *fonctions temporelles* (enveloppes à interpolation et modulateurs périodiques à basse fréquence) qui viennent moduler dynamiquement les paramètres de ces générateurs.

2.4. Schémas structurels

On propose des opérateurs simples qui sont suffisamment flexibles pour permettre une expressivité aussi complète que possible, par assemblage des objets élémentaires.

Du point de vue de la perception, une somme de signaux renvoie à l'union d'un ensemble d'objets sonores, alors que le produit d'un signal par un nombre renvoie à une modulation du volume. Ces deux opérations semblent suffisantes pour modéliser une grande diversité de sons,

et situent le formalisme dans la catégorie de la synthèse additive.

De façon à pouvoir opérer à des niveaux structurels plus abstraits, on emploie la notion de *meta-paramètre*² ce qui implique de pouvoir effectuer des transformations arithmétiques et d'opérer sur des collections d'objets.

La structuration de ces éléments peut être effectuée au moyen des formes classiques des langages fonctionnels (comme par exemple LISP [9]) : forme lambda, liaison de variables, etc... A partir de là on peut exprimer des structures composites d'une complexité arbitraire.

La définition de fonctions au moyen de la forme lambda permet une expression analogue à celle d'un langage à objets qui se limiterait à ses constructeurs de classe, ce qui dans ce cas est suffisant puisque le problème est d'ordre descriptif. Dans cette analogie les dépendances successives des fonctions représentent un mécanisme d'*héritage de classe*.

2.5. Limites de la démarche

L'approche proposée consiste à reconstruire intégralement les œuvres musicales à partir d'objets et de structures élémentaires. Cela semble en effet nécessaire si le but visé est de représenter la musique au moyen d'une notation symbolique abstraite.

Néanmoins cela suppose que les critères musicaux, des plus abstraits aux plus concrets, puissent être représentés comme des formes mathématiques ; or il est probable (à un degré variable suivant les cas) qu'une œuvre repose sur des aspects *plastiques*, et non purement *structurels*, pour lesquels une explication de ce type ne sera pas pertinente.

L'impact de ce phénomène devra être évalué expérimentalement, mais on peut d'ores et déjà s'attendre à ce que la transcription d'une œuvre au moyen du modèle résulte en une *idéalisat*ion *schématique* dont l'utilité se limite à rendre plus lisibles les critères d'analyse mis en évidence (et non à effectuer un rendu complet de l'œuvre).

3. DESCRIPTION DÉTAILLÉE DU FORMALISME

Sans chercher à faire une liste exhaustive des éléments du langage, on décrit ici les différentes catégories d'opérateurs et on donne des exemples. Le formalisme est extensible et pourra être complété ultérieurement au besoin, à condition de respecter la cohérence de cette classification.

On a tout d'abord deux grands types d'opérateurs :

- Les opérateurs standard des langages fonctionnels
- Les opérateurs spécifiques à la synthèse sonore

Globalement la syntaxe fait référence à celle de LISP, qui constitue une formulation classique des langages fonctionnels.

Le formalisme est ici exprimé d'une façon qui laisse une place à l'interprétation, et qui définit des principes

2. Par ce terme, on désigne le procédé par lequel un ensemble de paramètres de bas niveau peuvent être collectivement spécifiés par un ensemble (habituellement plus réduit) de paramètres de plus haut niveau.

conceptuels généraux plutôt qu'une grammaire et une algèbre exactes. Cette tâche sera mise en œuvre plus tard (cf 5.3), lorsque le recul fourni par une implémentation expérimentale permettra de le faire en prenant en compte les aspects nécessaires à la mise en pratique.

3.1. Opérateurs fonctionnels standard

On se référera ici à des opérateurs LISP courants afin d'éviter de redéfinir des concepts consensuels.

3.1.1. Opérateurs arithmétiques

On a dégagé plus haut (cf 2.4) la nécessité d'opérer sur des valeurs numériques afin de mettre en place un système de metaparamètres. On utilise donc les opérateurs arithmétiques habituels (somme, produit, fonction puissance, etc...) ainsi que des constantes numériques.

3.1.2. Opérateurs sur les listes

Les collections d'objets sont représentées par des listes. Outre la définition et l'accès aux listes (opérateurs `list`, `cons`, `car`, `cdr`...), on utilise également l'application de fonction sur une liste (famille `map`), la création de listes d'entiers (`range`), ainsi que tous les autres opérateurs nécessaires au traitement des listes.

3.1.3. Opérateurs structurels

L'opérateur `lambda` permet de définir une fonction. Dans la perspective d'une représentation graphique des diagrammes fonctionnels (cf 5.3), on utilise également un opérateur `call` pour faire des appels de fonction, mais celui-ci est équivalent à une paire de parenthèses dans la syntaxe LISP.

L'opérateur `let` permet d'introduire des variables, et on utilise également un opérateur `labels` ainsi qu'un opérateur conditionnel `if` dans le but de pouvoir définir des formes lambda récursives. A partir de là il est possible de définir des formes itératives arbitraires.

3.2. Opérateurs pour la synthèse sonore

Les opérateurs spécifiques à la synthèse sonore représentent des *abstractions temporelles* (c'est à dire des fonctions du temps), qui sont signifiantes d'un point de vue humain ; la réalisation effective des constructions formulées supposera ensuite une traduction vers une représentation numérique à bas niveau (suite d'échantillons atemporels) par l'intermédiaire d'un langage dédié à la synthèse sonore.

Le formalisme a pour but de *spécifier* l'algorithme de synthèse sonore, et repose sur l'hypothèse qu'on peut faire abstraction de sa réalisation concrète (qui pourra employer des méthodes diverses suivant l'implémentation, à condition de rester équivalente d'un point de vue perceptif).

3.2.1. Opérateurs structurels

De façon à mettre en place le mécanisme d'abstraction temporelle des éléments de synthèse sonore, nous avons besoin d'un environnement dans lequel ces éléments ont un sens concret, qui permet donc de résoudre ces spécifications dépendantes d'une variable temporelle en objets audio-numériques qui ne dépendent plus du temps.

La synthèse sonore entraîne dans cette perspective d'implémentation des modalités spécifiques. En effet le calcul des échantillons doit être exécuté dans une boucle temporelle, afin d'appliquer les fonctions spécifiées sur une base discrétisée du temps. En pratique cette boucle devra être optimisée puisque ce calcul est de loin le plus exigeant en termes de ressources.

Cet impératif d'optimisation implique entre autres l'impossibilité dans ce contexte d'effectuer un appel dynamique à une fonction externe (en effet celle-ci devrait également être l'objet d'une optimisation, ce qui est impossible si elle n'est pas connue a priori).

Cela nous conduit à introduire une forme spécifique `synth` pour marquer ce type d'environnement, qui sémantiquement se comporte de façon analogue à la forme `lambda`, mais à la différence qu'elle permet la résolution de l'abstraction temporelle. Elle sera en pratique partiellement évaluée de façon à réaliser l'optimisation nécessaire.

Cette forme définit un *instrument virtuel* qui marque la limite entre le sonore et le musical, et possède la propriété d'avoir une intégrité temporelle (c'est à dire que son contenu est défini sur un support temporel unique commun à toutes ses composantes, en conséquence de l'unicité de la boucle temporelle). On ne peut imbriquer les formes `synth`, puisqu'il est incohérent de résoudre plusieurs fois l'abstraction temporelle. Tout générateur de signal ainsi que toute fonction temporelle doivent finalement être contenus dans une telle forme pour pouvoir être résolus en un ensemble de valeurs atemporelles. L'évaluation de la forme `synth` retombe nécessairement sur un ensemble de générateurs de signaux (temporels), qui lors de l'appel produiront l'objet audio-numérique (atemporel) spécifié.

L'appel à cet instrument virtuel se fait au moyen de l'opérateur `play`, analogue à `call` mais qui requiert en paramètre supplémentaire une date de début du fragment audio-numérique correspondant (on exprime cette date en secondes, relativement au début de l'enregistrement tout entier) ; la résolution de l'abstraction temporelle suppose en effet de situer l'objet résultant dans une temporalité plus globale.

Comme cet opérateur est le seul qui puisse représenter un résultat effectif, le programme tout entier devra s'évaluer à une liste de fragments, éventuellement structurée récursivement pour marquer les sous-ensembles de fragments associés (de plus cette définition récursive permet éventuellement de ne produire qu'un fragment simple). A noter que cette structuration est purement sémantique, et ne sera pas nécessairement apparente dans le résultat concret (dans lequel les fragments apparaîtront de façon chronologique, quel que soit l'ordre dans lequel ils ont été

donnés).

L'analogie du point de vue sémantique entre ces deux opérateurs et ceux qui définissent les fonctions permet essentiellement de formuler la structuration du sonore de la même façon que la structuration du musical.

3.2.2. Générateurs de signaux audio

En ce qui concerne l'aspect spectral du son, comme on l'a vu plus haut (cf 2.3), on l'exprime au moyen de générateurs de signaux à fréquence audio. Ces générateurs étant l'objet d'une contrainte de minimalisme dans la perception, ils se ramènent en fait à seulement deux types :

- L'opérateur `(osc f phi)` permet de définir un générateur sinusoïdal de fréquence `f` et de phase `phi`, ces deux paramètres pouvant éventuellement être définis par des fonctions temporelles.
- Pour la synthèse de sons bruités, on utilise des opérateurs `nlp`, `nhp` et `nbp` qui représentent des composantes de bruit blanc filtré (en passe-bas, passe-haut et passe-bande). Les paramètres, qui sont ceux qui définissent les filtres, peuvent là aussi être des fonctions temporelles.

Ces générateurs peuvent être superposés par sommation et modulés en amplitude par produit avec un nombre ou une fonction temporelle (cf 2.4).

3.2.3. Fonctions temporelles

Les fonctions temporelles génèrent des signaux à basse fréquence dont le but est de moduler les paramètres des générateurs de signaux audio. On reconnaît deux types :

- Les variations continues peuvent être notées par des enveloppes à interpolation avec l'opérateur `(env levels times)` où `levels` est la liste des niveaux atteints aux points-clef et `times` est la liste des durées qui séparent les points-clef. La longueur de `times` est donc celle de `levels`, moins un. Ces valeurs sont forcément numériques (ce ne sont pas des fonctions temporelles).
- Les variations périodiques peuvent être notées par différents oscillateurs à basse fréquence (sinusoïdaux, en carré, en triangle, etc...) paramétrés au minimum par une fréquence et une phase, et éventuellement d'autres valeurs suivant les types (par exemple la largeur d'impulsion pour les oscillateurs carrés). Ces paramètres peuvent à leur tour être donnés par des fonctions temporelles.

En outre n'importe quel nombre peut être converti en fonction temporelle constante, et il est possible d'effectuer des opérations arithmétiques sur les fonctions temporelles.

On définit également un opérateur supplémentaire `dyn` qui représente l'enveloppe dynamique globale d'un instrument donné. En plus des propriétés de `env`, elle possède la propriété de définir le support temporel commun de l'instrument tout entier (puisque finalement c'est ce critère dynamique qui détermine sur quel intervalle le signal est potentiellement non-nul, ce qui est équivalent). Il en découle

nécessairement qu'un instrument doit posséder un et un seul `dyn`, et que celui-ci doit commencer et terminer à 0.

3.2.4. Opérateur de sommation

Les générateurs de signaux peuvent être assemblés dans des listes dont on peut faire la somme au moyen de l'opérateur `sum`, résultant dans la superposition des signaux. Cette superposition de signaux étant elle-même un signal, on peut employer `sum` sur plusieurs niveaux successifs.

C'est par ce procédé qu'on peut structurer les composants d'un instrument virtuel, en créant des regroupements qui peuvent éventuellement être définis par des paramètres communs et des fonctions communes.

4. EXEMPLE D'UTILISATION DU FORMALISME

Le texte se réfère à l'algorithme donné en exemple (fig. 1), qui illustre par un cas d'usage simple la méthodologie et les principes de fonctionnement du modèle.

4.1. Objectif visé

On se fixe un ensemble de contraintes qui définissent un problème compositionnel :

- produire une séquence de fragments de hauteurs différentes et à intervalles réguliers
- employer un timbre ayant le spectre d'un dents-de-scie (de bande limitée) et doué d'une dynamique ADSR

4.2. Méthode de résolution

Le problème se résout par sa décomposition en problèmes élémentaires :

1. On définit tout d'abord une enveloppe dynamique ADSR (`adsr`) comme une spécialisation de l'objet `dyn`.
2. L'allure spectrale recherchée est définie en deux temps :
 - (a) Définition d'une forme générale (`organ`) permettant de créer des assemblages itératifs arbitraires de partiels sinusoïdaux, à partir de deux fonctions qui à l'indice d'itération associent les coefficients de fréquence (`freqf`) et de gain (`gainf`) du partiel.
 - (b) Définition du dents-de-scie (`saw`) comme spécialisation de `organ` en précisant les fonctions de fréquence et de gain de façon appropriée. A noter qu'on aurait pu, pour engendrer une dynamique spectrale, employer par exemple une fonction de gain dont la valeur est une fonction temporelle (une enveloppe ou un modulateur). A supposer qu'on ait souhaité exprimer ces valeurs en extension, on aurait pu employer des fonctions qui accèdent au n-ième élément d'une liste statique.

3. Définition d'un instrument virtuel (`instr`) qui assemble les deux éléments précédents (ici en se ramenant à un nombre minimal de paramètres, mais on pourrait de façon analogue créer un instrument beaucoup plus variant).
4. Définition d'une fonction (`iter`) permettant à partir d'une fréquence de base et d'une liste de coefficients de fréquence, d'engendrer une séquence de fragments à une certaine date et avec un certain intervalle de temps.
5. Finalement l'évaluation globale retombe sur un appel à `iter`, ce qui produit une séquence de fragments à partir de l'instrument `instr`.

4.3. Commentaire

On voit dans cet exemple simple comment la notation permet de structurer la partition suivant un certain nombre de critères qui définissent des catégories. Ici les définitions s'enchaînent d'une façon très linéaire, mais dans des cas plus complexes cette approche permet de définir une hiérarchie de classes sur plusieurs niveaux qui rend explicites, dans les objets résultants, les critères communs et ceux qui sont différents.

On voit également comment le sonore et le musical se définissent d'une façon analogue, par la structuration d'objets élémentaires. La différence entre les deux n'est qu'une différence de niveau d'échelle, le musical étant nécessairement défini à partir du sonore et non l'inverse. A noter que la limite entre les deux peut être fluctuante suivant l'intention de l'auteur, étant donné qu'il est possible de regrouper des structures dans un seul instrument ou au contraire de décomposer un instrument en composantes plus petites.

5. PERSPECTIVES

Ce modèle formel constitue un outil indispensable pour fonder la recherche d'une notation symbolique pour la musique électroacoustique. En permettant de formuler plus clairement les questions qui entrent en ligne de compte, il débouche sur un ensemble de pistes de développement qui constitueront les étapes suivantes vers l'objectif global.

5.1. Identification de structures

A partir du modèle généraliste de base, la préoccupation majeure sera d'identifier des schémas structurels pertinents. On pourra suivre plusieurs pistes :

- modélisation des systèmes d'analyse existants : solfège Shaefferien [1], spectromorphologie [12], unités sémiotiques temporelles [4], fonctions musicales [11], etc... On pourra ensuite identifier les analogies (structures communes) entre ces différents modèles, et mesurer leur expressivité en termes audio-numériques.
- recherches dans la littérature acoustique de modèles existants de phénomènes acoustiques connus (par

```

(let ((adsr (lambda (a d s r dur)
             (dyn (list a d (- dur (+ a d)) r) (list 0 1 s s 0))))
      (organ (lambda (nb f0 freq gainf)
              (sum (mapcar
                   (lambda (i)
                     (* (osc (* f0 (call freq i)) 0)
                        (call gainf i)))
                     (range 1 nb)))))))

(let ((saw (lambda (nb f0)
            (call organ nb f0 (lambda (n) n) (lambda (n) (/ 1 n))))))

(let ((instr (synth (vol dur freq)
                   (* vol
                     (call adsr 0.01 0.02 0.7 0.2 dur)
                     (call saw 8 freq))))))

(let ((iter (lambda (flist freq t0 dt)
            (mapcar
             (lambda (f i)
               (play (+ t0 (* i dt)) instr 0.5 (/ dt 2) (* freq f)))
             flist
             (range 0 (- (length flist) 1))))))

(call iter (list 1 1 1 1.5 1 1.5 2) 200 1 1))))

```

Figure 1. Exemple d'algorithme

exemple, Bernard Cohen [3] utilise dans son étude un modèle de l'inharmonicité des cordes de piano et comparaison des formulations afin de dégager des schémas structurels communs.

- expérimentation empirique avec l'aide de compositeurs et de professionnels de la synthèse sonore dans le but de découvrir des formes générales communes à un grand nombre d'auteurs.

De cette façon on pourra produire une bibliothèque de composantes structurelles pouvant être combinées pour produire différentes catégories de sons.

5.2. Composantes élémentaires

Il sera nécessaire à court terme de compléter la base de composantes élémentaires de façon à rendre possible la reproduction de n'importe quel fragment audio-numérique.

Pour cela il faudra effectuer une recherche approfondie sur les modèles de bruit, à commencer par celui de Pierre Hanna [8] qui propose un critère supplémentaire de *densité spectrale* dans la description des bruits.

On développera également un modèle compatible de filtres (linéaires, délais) qui permettra de mieux décrire les enveloppes spectrales (notamment pour les bruits, mais également en référence aux formants de la voix humaine et à la perception des espaces acoustiques).

5.3. Perfectionnement du langage

Sur le moyen terme, au niveau linguistique, on cherchera notamment à formuler de façon récursive l'ensemble des formes itératives les plus courantes, ce qui permettra de simplifier la notation dans un grand nombre de cas.

On cherchera également à évaluer le potentiel expressif du langage, et notamment sa Turing-potence. Cette dernière pourra être montrée le plus probablement par l'équivalence avec le λ -calcul.

Une expression plus formelle, sous la forme d'une grammaire accompagnée de sa correspondance algébrique, sera finalisée dès que les impératifs pratiques de l'implémentation concrète et leur impact sur le formalisme auront été clairement identifiés.

De plus on proposera une interprétation équivalente du formalisme sous la forme de diagrammes de blocs, afin d'améliorer la lisibilité.

5.4. Implémentation logicielle

De même, à moyen terme, et afin de pouvoir plus facilement expérimenter avec le formalisme, on proposera une ou plusieurs implémentations logicielles dans des langages permettant à la fois la synthèse sonore et la manipulation de fonctions, comme SuperCollider [13] ou OpenMusic [10].

En effet il paraît hors de propos de chercher à résoudre à nouveau les nombreux problèmes techniques liés à la synthèse sonore, alors que beaucoup de langages existants

fournissent des opérateurs équivalents à ceux que nous employons.

Ce logiciel pourra être muni d'une interface graphique pour représenter le langage sous la forme de diagrammes de blocs, et également proposer une vue chronologique à plusieurs voix en s'inspirant de la notation de Jean-Louis Di Santo [7].

5.5. Potentiel pour l'analyse

Au long terme, et sous réserve que le projet donne des résultats satisfaisants, on pourra tenter d'identifier automatiquement les composantes élémentaires dans un objet audio-numérique donné. Si cela est possible, il serait envisageable de produire des méthodes de reconnaissance semi-automatiques (et plus probablement totalement automatiques) des schémas structurels qu'on a pu qualifier et que l'on juge pertinents.

Dans cette éventualité on disposerait alors d'un outil permettant l'extraction semi-automatique (voire automatique) d'un ensemble de critères d'analyse. Afin d'évaluer la possibilité d'une réalisation pratique, il faudra effectuer une recherche approfondie sur les outils disponibles (comme le suivi de partiels et la reconnaissance de motifs). Il s'agit bien évidemment d'un objectif très ambitieux sur lequel un succès partiel à long terme serait déjà satisfaisant.

5.6. Evaluation des limitations

Comme on l'a vu (cf 2.5), on peut anticiper qu'une approche purement symbolique ne permettra pas en général de restituer totalement une œuvre musicale. La formulation présentée ici et les développements ultérieurs du projet permettront néanmoins de prendre la mesure de cette limitation et de remettre en question d'une façon mieux définie les possibilités d'une telle méthodologie.

Il s'agit probablement d'une instance d'une question beaucoup plus générale, transversale à un grand nombre de domaines de la science (voire autres), qui semble devoir se résoudre par l'apparition de nouveaux paradigmes (par exemple le connexionnisme dans la représentation de connaissances). Ceci dépasse très largement le cadre de ce projet, et nous pouvons simplement espérer, de ce point de vue, apporter une modeste contribution à un travail éminemment collectif.

6. REFERENCES

- [1] Chion, M. *Guide des objets sonores*. Ina/Buchet-Chastel, Paris, 1983.
- [2] Church, A. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lambda-calcul>
- [3] Cohen, B. *Analyse du profil harmonique*. Mémoire de stage, Université de Bordeaux, 2012.
- [4] Coll. *Les unités sémiotiques temporelles*, MIM, Marseille, 1996.
- [5] Couprie, P. "EAnalysis : aide à l'analyse de la musique électroacoustique", *Journées d'Informatique Musicale*, Mons, Belgium, 2012.
- [6] Csound. <http://www.csounds.com/>
- [7] Desainte-Catherine, M. Di Santo, J-L. "L'acousmoscribe, un éditeur de partitions acousmatiques", *Electroacoustic Music Studies*, Buenos Aires, 2009.
- [8] Hanna, P. *Modélisation statistique de sons bruités : étude de la densité spectrale, analyse, transformation musicale et synthèse*. Thèse, Université de Bordeaux, 2003.
- [9] McCarthy, J. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lisp>
- [10] OpenMusic. <http://repmus.ircam.fr/openmusic/>
- [11] Roy, S. *L'analyse des musiques électroacoustiques : modèles et propositions*. L'Harmattan, Paris, 2003.
- [12] Smalley, D. "Spectromorphology : explaining sound-shapes", *Organised Sound*, vol. 2 n°2, Cambridge, 1997.
- [13] SuperCollider. <http://supercollider.github.io/>
- [14] Thoresen, L. " Spectromorphological Analysis of Sound Objects ", *Electroacoustic Music Studies*, Beijing, 2006.