Introduction

L'Institut de Recherche et de Coordination Acoustique Musicale (IRCAM) est un organisme qui a pour objectif de créer une interaction entre recherche scientifique, développement technologique et création musicale contemporaine. En son sein, l'équipe Analyse/Synthèse s'attache à élaborer des procédés de synthèse et de transformation du son. Dans le cadre de la modélisation physique d'instruments, l'équipe a réalisé un programme simulant la trompette et fonctionnant sur machine temps réel.

L'objectif principal de mon stage était de rendre possible son utilisation par des musiciens en portant ce modèle sous jMax, un environnement créé à l'IRCAM et disponible gratuitement sur Internet.

Le second volet de mon travail consistait à implémenter sous jMax un objet de création sonore basé sur les études effectuées par l'équipe Analyse/Synthèse sur les oscillations non linéaires, ainsi qu'un objet permettant la visualisation de signaux.

Afin de poser le contexte du stage, je présenterai l'IRCAM et plus particulièrement l'équipe Analyse/Synthèse. J'exposerai ensuite les différents paradigmes de modélisation d'instruments et définirai les caractéristiques de la structure d'accueil des produits réalisé. Et pour finir, je présenterai le travail réalisé

On trouvera en annexe, une présentation détaillée de l'IRCAM ainsi que le guide d'utilisation de l'un des produits réalisé.

Chapitre 1

Contexte du stage

Afin de décrire le contexte de ce stage, d'une durée de cinq mois (début Avril 1999 à fin Août 1999), voici tout d'abord une présentation succincte (puisqu'elle sera développée en annexe) de l'IRCAM, qui rappelons-le est l'Institut de Recherche et de Coordination Acoustique Musique, puis une description complète de l'équipe Analyse/Synthèse dans laquelle il s'est déroulé, et enfin un descriptif des objectifs fixés.

1.1 Présentation succincte de l'IRCAM

Depuis sa création en 1971 par Pierre BOULEZ sur la demande du président Georges Pompidou, l'Ircam bénéficie du statut d'association reconnue d'utilité publique et possédant son propre conseil d'administration, composé de plusieurs personnalités et de sept représentants des organismes publics directement concernés par le contrôle de son fonctionnement, à savoir le ministère de la Culture, le ministère de la Recherche, le Centre Georges-Pompidou et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

La présidence du conseil d'administration échoit au président du Centre Georges-Pompidou. La responsabilité exécutive est quant à elle assurée par le directeur Laurent BAYLE qui participe également au conseil de direction du Centre Georges-Pompidou.

L'Ircam a été fondé dans le but de susciter une interaction féconde entre recherche scientifique, développement technologique et création musicale contemporaine. Aussi cette articulation constitue-t-elle depuis sa création le principal axe structurant l'ensemble de ses activités. L'un des enjeux majeurs est de contribuer, par les sciences et techniques, au renouvellement de l'expression musicale. Réciproquement, les problèmes spécifiques posés par la création contemporaine donnent lieu à des avancées scientifiques originales tant théoriques, méthodologiques qu'appliquées, dont la portée dépasse largement le seul domaine musical. Cette médiation entre recherche et création musicales comporte en particulier le développement d'outils logiciels pour la composition, à partir de modèles et prototypes élaborés par des équipes de recherche travaillant dans les différents domaines en rapport avec la musique (langages, interfaces homme-machine, temps-réel, psychoacoustique). Les activités sont structurées autour de deux pôles complémentaires, recherche et développement.

1.2 Présentation de l'équipe Analyse/Synthèse

L'équipe Analyse/Synthèse, dirigée par Xavier Rodet, développe des procédés de synthèse et de transformation des sons. Différents modèles de synthèse sont mis au point, à partir de méthodes de traitement de signal (modèles de signaux) ou par modélisation acoustique des sources sonores (synthèse par modélisation physique). Ces travaux donnent lieu au développement d'outils de synthèse et de traitement sonore pour la composition (logiciels Additive, Audiosculpt, Chant, Diphone, Super Vocodeur de Phase, etc.) et trouvent de nombreuses autres applications dans les domaines du traitement de la voix, de la simulation de bruits de voitures, de la segmentation automatique des sons, etc...

La préoccupation essentielle de l'équipe est la conception et le développement d'outils avec lesquels les musiciens transforment des sons existants et en créent de nouveaux. A cette fin, il faut structurer de manière claire et intelligible l'information véhiculée par le son. Cette approche passe par le choix et l'élaboration d'un modèle de production des sons, qui détermine le type de synthèse. Cette structuration est de première importance. Elle permet, d'une part, d'expliquer le comportement des phénomènes sonores et offre, d'autre part, des moyens d'action pour le modifier de manière plus subtile que par des transformations globales. Par exemple, et pour prendre un parallèle avec l'image, il est possible de rendre une photographie plus ou moins floue, d'en changer les couleurs. En revanche, il est plus délicat de modifier la forme des objets ou de procéder à des substitutions, sans réaliser un modèle de l'image : détermination du nombre d'objets représentés, forme des contours, estimation des textures, etc. De la même manière, si on enregistre simplement un son, par exemple de piano, on peut le rendre plus grave ou plus aigu, le ralentir ou l'accélérer. Mais si on élabore un modèle, on peut le modifier plus finement : séparer la résonance de la caisse de l'instrument, les vibrations de la corde frappée, et le bruit du marteau.

En synthèse des sons, l'équipe étudie et propose aux musiciens plusieurs types de modèles, chacun constituant une manière de représenter la réalité sonore. Certains de ces modèles de synthèse ont été créés à l'Ircam, comme le synthétiseur Chant. Chaque modèle se réalise concrètement sous la forme d'un programme, appelé synthétiseur, qui calcule un son à partir de valeurs de paramètres constituant les signaux de contrôle du dispositif. Modifier un son revient à changer le jeu de paramètres qui le représente et créer un son revient à fournir le jeu de paramètres au synthétiseur.

L'analyse des sons consiste à déterminer, pour un modèle particulier, les paramètres d'un son donné. Elle représente une grande partie des activités de recherche de l'équipe. La principale difficulté en analyse des sons est due à la très grande variation des paramètres dans le temps.

1.3 Les différents projets de l'équipe Analyse/Synthèse

1.3.1 Synthèse additive

Depuis dix ans, l'équipe Analyse/Synthèse s'est penchée sur cette technique qui est l'une des plus anciennes et des plus performantes utilisée en synthèse des sons par ordinateur. Un son est représenté par une superposition de sinusoïdes (de fréquence et d'amplitude variables au cours du temps) à laquelle s'ajoute un bruit (de spectre variable au cours du temps). L'équipe a mis au point un algorithme de synthèse, nommé FFT-1, qui divise le coût de calcul des échantillons de son par un facteur de l'ordre de trente et a fait l'objet d'un brevet international. Une version temps réel sous Unix, sur un ordinateur standard, appelée Additive, a été développée également en collaboration avec l'université de Berkeley (USA) et la société américaine Gibson. Cet algorithme a également été porté sur jMax, le système de synthèse temps réel de l'Ircam. L'équipe continue des recherches sur le problème de l'extraction automatique des variations de fréquence et d'amplitude des sinusoïdes. Enfin, elle élabore des stratégies de contrôle de ce type de synthèse, notamment par une description en terme d'enveloppe spectrale des amplitudes. Ces recherches font l'objet d'une collaboration avec le CNET.

1.3.2 Synthèse source-filtre

Initiés il-y-a une douzaine d'années, les travaux sur la synthèse des sons fondée sur le modèle source-filtre portent actuellement sur l'amélioration des procédures d'analyse et sur la mise en forme des programmes de synthèse. Conçue à l'origine pour la synthèse de la voix parlée et chantée (logiciel Chant), cette technique de synthèse est capable de produire des sons instrumentaux variés, par exemple de type trompette ou shakuhachi (flûte indienne). Les efforts de l'équipe portent surtout sur la détection de la hauteur et l'analyse du bruit (souffle de l'instrumentiste, bruit de l'archet sur la corde).

1.3.3 Synthèse par modèles physiques

Synthèse en variables d'état

La modélisation physique d'instruments consiste à simuler les équations de la physique pour synthétiser les sons. Cette technique de synthèse donne d'excellents résultats sonores, mais présente actuellement un inconvénient majeur : elle ne comporte pas de contrepartie analyse. Pour pallier à cette difficulté, l'équipe développe une écriture des modèles physiques dans un formalisme largement utilisé dans le domaine de l'automatique : les variables d'état. Jusqu'à présent les tubes droits des instruments à vent ont été décrits d'une manière physiquement et perceptiblement satisfaisante, en prenant en compte les pertes viscothermiques au cours de la propagation des ondes sonores dans l'air. Après une modélisation simplifiée du rayonnement, ces modèles seront reliés à des excitateurs non-linéaires permettant de simuler les sources. A partir de ces travaux théoriques, l'équipe met actuellement au point un environnement informatique capable de créer automatiquement un synthétiseur donné à partir de la géométrie d'un système de tubes interconnectés.

Oscillations non-linéaires

La synthèse musicale dite par modèles physiques utilise des modèles mathématiques et informatiques des instruments acoustiques. Pour enrichir la création musicale, les modèles ne peuvent être limités à imiter les instruments traditionnels. Il faut donc pouvoir comprendre et garantir le comportement des modèles en toutes circonstances. Depuis plusieurs années l'équipe a donc étudié des classes de systèmes dynamiques non-linéaires qui représentent les traits essentiels de certaines familles d'instruments, en particulier les systèmes à boucles de rétroaction linéaire avec retard (par exemple, réflexion du son à l'extrémité d'un tube acoustique ou d'une corde vibrante) et non-linéarités. Pour la classe clarinette, la non-linéarité est considérée comme instantanée. Pour la classe trompette, la non-linéarité n'est pas instantanée. Des modèles de base des classes clarinette, trompette et voix ont été implantés, notamment en temps réel et donnent déjà des résultats intéressants et dont l'étude continue. Une autre partie de la recherche de l'équipe a porté sur l'étude des oscillations périodiques et chaotiques. L'ensemble des solutions périodiques étant difficile à obtenir, il a fallu mettre en oeuvre des méthodes particulières, par exemple par continuation (homotopie). Enfin, de façon surprenante, les solutions chaotiques se révèlent très intéressantes d'un point de vue musical. L'équipe a abordé le contrôle du passage à ces solutions et cherché à permettre une influence graduelle du caractère chaotique.

1.4 Les logiciels développés par l'équipe Analyse/Synthèse

1.4.1 Super Vocodeur de Phase

Super Vocodeur de Phase est un système modulaire d'analyse, de traitement et de synthèse des sons. L'équipe travaille actuellement à la réalisation d'interfaces graphiques (AudioSculpt) visant à rendre l'utilisation de Super Vocodeur de Phase à la fois intuitive et interactive et intègre progressivement de nouveaux outils d'analyse et de traitement.

1.4.2 AudioSculpt

AudioSculpt pour Macintosh et Power Macintosh est un logiciel d'analyse, de traitement et d'édition spectrale du son basé sur Super Vocodeur de Phase. L'interface graphique utilisée permet facilement de " sculpter " le son en spécifiant directement sur le spectrogramme des régions de filtrage dynamique.

1.4.3 Diphone

Le concept de contrôle par diphone est emprunté au traitement de la parole. L'équipe l'a étendu aux sons musicaux. L'idée est de considérer qu'une phrase peut être segmentée en une succession de sons d'articulation (transition entre phonèmes/transition entre notes) et de sons d'appui (voyelle stable/tenue de note) que l'on appelle des diphones. Actuellement est élaborée une interface graphique permettant au musicien de placer ces diphones dans le temps et de régler les paramètres d'articulation.

1.4.4 Chant, synthèse granulaire

Le générateur FOF (Formes d'ondes formantiques) et les modules de contrôle par règles implantés dans le logiciel Chant ont été portés sur jMax. Un déclenchement précis du générateur FOF peut être à présent maîtrisé et permet de nouvelles applications notamment dans le domaine des techniques dites granulaires. Une autre extension du module FOF fut mise en place permettant l'utilisation d'un échantillon au lieu d'une sinusoïde dans la FOF. Le paramètre de fréquence centrale de la FOF est remplacé par un facteur de transposition de l'échantillon. Ce module (un mélange entre FOF et échantillonnage) est bien adapté à la synthèse granulaire. Les améliorations et optimisations réalisées dans le cadre du portage de Chant sur la SIM (Station d'Informatique Musicale de l'Ircam) ont été ensuite intégrées dans la librairie Chant contrôlée dans PatchWork. Après optimisation sur le Macintosh Chant/Patchwork fonctionne deux à quatre fois plus rapidement.

1.4.5 Xspect

En musique et ordinateur, les signaux sonores sont examinés, mesurés, analysés, etc., par les scientifiques et les musiciens. Sous le nom Xspect, un programme de visualisation et d'analyse de signaux a donc été développé. Ce logiciel est écrit en Xwindows et Motif, et tourne sur diverses plates-formes Unix.

1.4.6 Projet sur la caractérisation des sons

Très peu de travaux ont été consacrés à la caractérisation des signaux sonores autres que la parole. L'équipe commence une étude sur le développement et l'intégration d'outils pour une meilleure gestion et manipulation des éléments sonores. Le but est d'abord de fournir une aide à la création sonore mais aussi, par exemple à la constitution de services multimédias. Les différentes étapes de la recherche sont les suivantes : extraction de paramètres constitutifs et séparation de sources, segmentation, identification et reconnaissance de sons, représentation de scènes sonores réelles et de synthèse dans un langage hiérarchique lié au contenu, manipulation et transformation des objets sonores. Enfin l'application de ces outils dans le contexte du codage sélectif du contenu de scènes en vue d'une compression plus optimale sera étudiée.

1.4.7 Projet Farinelli

Comment recréer la voix d'un castrat par fusion des timbres ? Carlo Broschi, dit Farinelli (1705-1782), est reconnu comme l'un des castrats les plus célèbres. Bien évidemment, nous ne disposons d'aucun enregistrement de cette voix unique. Pour les besoins de son film, Gérard Corbiau a sollicité l'intervention de l'Ircam afin de recréer, par des techniques de traitement numérique des sons, une voix inédite et hors de portée des performances humaines actuelles.

1.5 Liste des participants

Responsables : Xavier Rodet, Philippe Depalle.

Chargés de recherche et de développement : Adrien Lefèvre, Alberto Ricci, Stéphane Rossignol, Diemo Schwarz, Christophe Vergez.

Thésards : Rémi Gribonval (Ecole Normale Supérieure), Marine Oudot (ENST), Geoffroy Peeters (DEA Atiam, Université Paris VI), Stefania Serafin (DEA

Atiam, Université Paris VI), Stéphane Tassart (DEA Atiam), Christophe Vergez (Université Paris VI), Marcello Wanderley (Université Paris VI)

1.6 Collaborations

- Laboratoire d'acoustique musicale de l'Université Paris VI
- Laboratoire de reconnaissance des formes et d'intelligence artificielle de l'Université Paris VI
- Laboratoire d'automatique de l'École Supérieure d'Électricité de Metz
- Center for New Music and Audio Technology de l'Université de Berkeley
- Centre automatique et systèmes de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris
- Ecole Polytechnique
- Ecole Normale Supérieure
- Sup Télécom
- CNET
- Renault
- Zeta / Gibson

1.7 Description du parc informatique de l'équipe Analyse/Synthèse

- Cinq stations Unix de marque SGI (modèles Indy, O2, et Indigo)
- Deux stations Unix de marque Digital (modèles Alpha Station 200/166, Alpha Station 3000/600)
- Six terminaux X de marque NSD (modèles MCX, MCXL, 88k, Explora XA, Explora Pro, et Explorer Pro)
- Cinq Macintosh de marque Apple (modèles PM 8100/80, PM 8600/200, PM 9500/132, PM 9600/200MP et Power Book G3)

1.8 Objectifs du stage

Dans le cadre de sa thèse sur la modélisation physique de la trompette, Christophe Vergez a réalisé un programme fonctionnant sur machine temps réel. L'objectif de ce stage était l'implémentation de ce modèle sous l'environnement jMax et la rédaction d'un rapport de programmation permettant une maintenance aisée de l'objet créé. En plus de ce travail, il m'a ensuite été demandé de créer deux autres objets: un objet permettant la visualisation de signal et un modèle sommaire d'instrument, ainsi qu'un guide d'utilisation de ce dernier objet et une documentation sur la programmation d'objet sous jMax.

Chapitre 2

La modélisation d'instruments

La synthèse numérique de sons consiste essentiellement à calculer des échantillons à partir d'un modèle de synthèse, puis à convertir le signal numérique en signal analogique par l'intermédiaire d'un convertisseur numérique-analogique (DAC).

Cependant cette modélisation doit répondre à diverses contraintes. Il est nécessaire que le modèle de synthèse utilisé soit en adéquation avec la classe de signaux à modéliser.

Pour faciliter l'utilisation de ces modèles par les compositeurs, il est préférable que la synthèse des sons et le contrôle soient faits en temps réel. L'algorithme de synthèse doit être tout à la fois simple, efficace et rapide.

De plus il faut noter, que dans le cadre d'une application musicale il n'y a pas d'intérêts à créer des modèles ayant les mêmes limitations que les instruments, il est donc logique qu'un modèle doive apporter de plus grandes fonctionnalités.

2.1 Modèles de signaux

Pour cette synthèse traditionnelle, on considère le son comme un signal. Il s'agit de recréer certaines propriétés, en particulier spectrale, du signal sonore analysé précédemment.

2.1.1 Méthode d'analyse

Afin de connaître le spectre du signal, on dispose des outils d'analyse spectrale (FFT, transformation dans le plan temps fréquence...). Et pour modéliser l'évolution de ces propriétés, on peut utiliser la reconnaissance des partiels à l'aide des chaînes de Markov cachées (suivant les n derniers états, on calcule les probabilités d'atteindre ce prochain état).

2.1.2 Analyse Additive

Le modèle additif représente un signal comme une superposition de plusieurs sinusoïdes de fréquence et d'amplitude lentement variables. L'analyse additive d'un signal correspond à l'estimation des fréquences, phases et amplitudes respectives de chacunes des sinusoïdes qui, dans le cadre du modèle additif, expliquent au mieux le signal observé.

2.1.3 Méthode de synthèse

Dans le monde des synthétiseurs, la synthèse par modèle de signal a été bouleversée dans les années 80 par la modulation de fréquence (synthétiseur FM). Plus récemment, la synthèse additive a permis de synthétiser des sons beaucoup plus proches des sons réels. Elle consiste, comme son nom l'indique, en une addition de sinusoide.

2.2 Modèles physiques

Le son n'est plus considéré comme un signal a priori mais comme la manisfestation physiques d'un système. Il est donc nécessaire d'effectuer une description précise du système pour identifier les caractéristiques principales.

Les modèles physiques décrivent en même temps les phénomênes acoustiques à l'origine de la génération du son dans l'instrument et l'interaction entre l'instrumentiste et son instrument. Le dispositif est ainsi considérablement simplifié puisque par exemple, il suffit d'injecter le résultat de la mesure du débit du souffle de l'instrumentiste dans le paramètre pour représenter précisément le débit dans le modèle de synthèse. Actuellement les systèmes de synthèse par modèle physique sont le meilleur moyen pour instaurer une relation instrumentale entre l'homme et la machine. Cependant les progrès en matière de contrôle gestuel rendront sans doutes les autres modèles de synthèse compétitifs sur ce plan.

2.2.1 Avantage du modèle physique

L'avantage du modèle physique est, en plus de la relation instaurée entre l'homme et la machine, de permettre de prendre en compte facilement la conservation du timbre par rapport aux autres moyens de synthèse. Par exemple, dans le cas de la trompette, le timbre est modifié par une pression du souffle importante. Le modèle physique conservera cette caractéristique alors qu'avec l'utilisation d'un modèle de signaux la mise en œuvre de cette caractéristique nécessitera l'analyse des spectres sonores correspondant à chaque mode de jeu. De plus le modèle physique permet d'envisager de nouvelles prespectives sonores. En effet, il est possible de modéliser le son d'instrument dont les dimensions dépassent celle imposées par la réalité.

2.2.2 Inconvénient de ce type de modèle

L'utilisation de modèles physiques implique la résolution d'importants systèmes numériques. Cela peut poser des problèmes dans le cadre d'une application temps réel.

Chapitre 3

Structure d'accueil: l'environnement jMax

3.1 Description de l'environnement

jMax est un environnement programmable permettant la réalisation d'applications musicales et multimédia interactives. On peut le représenter comme un langage de programmation visuel. L'utilisateur peut construire une application sous forme de “patch” en connectant des modules. Ces connections représentent des communications de paramètres de contrôle ou d'échantillons sonores, avec un paradigme d'envoi de messages à la manière de langages objets (par exemple SmallTalk).

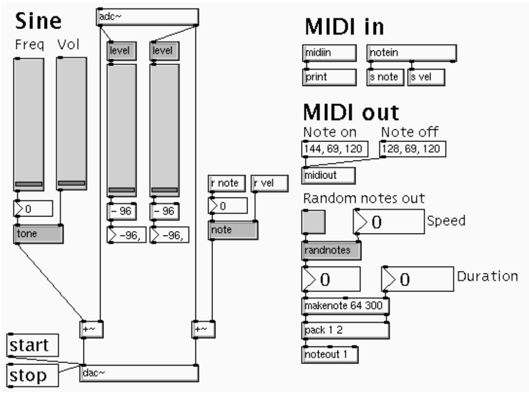

FIG. 3.1 – *Exemple de patch*

Un module peut être une unité de traitement, opérateur arithmétique simple ou transformation complexe du signal; il peut aussi être un conteneur de données, par exemple une ligne à retard, ou un module système d'entrées-sorties audio ou MIDI. Les modules peuvent être des primitives, appelées “objets”, ou bien peuvent eux-mêmes être des patchs, donnant à un patch une structure hiérarchique. Enfin, certains modules permettent l'envoi de message depuis l'interface graphique.

Conçu pour être un système portable, jMax est basé sur une architecture à deux composants: un moteur d'exécution temps réel écrit en C, baptisé FTS (Faster Than Sound), et une interface graphique utilisateur implémentée en Java.

Le “serveur” de traitement temps réel, FTS, effectue le calcul des échantillons sonores et des informations de contrôle. Il comprend en particulier les composants suivants:

- un système à objets qui gère l'exécution, l'édition et le contrôle des patchs
- un interpréteur optimisé des fonctions de traitement du signal
- un gestionnaire d'entrées-sorties, fournissant en particulier un service de configuration flexible. Le système d'entrées-sorties est organisé autour de l'abstraction des “devices”, qui permet d'offrir une interface logicielle indépendante de la plateforme afin d'améliorer la portabilité.

jMax est un système ouvert: un programmeur peut ajouter des extensions qui sont des objets, écrits en langage C, des composants d'interface graphique, écrits en Java ou en XWindows, ou même des scripts, l'interface étant complètement scriptable.

La palette primitive de jMax comprend des modules de contrôle et de traitement du signal élémentaires, réalisés sous forme d'objets ou de patchs, tel que:

- arithméthique simple
- gestion du temps
- gestion des entrées-sorties (DAC, ADC, MIDI, réseau)
- lecture/écriture temps réel de fichiers de sons
- filtres, égaliseurs
- mixeurs
- détection d'événements: suivi d'enveloppe, détection de bruit, détection de fréquence fondamentale
- transformée de Fourier
- oscillateurs et modulateurs
- retards et réverbérations simples
- effets classiques: modulateur en anneau, harmoniseur, “flanger” et “chorus”

Remarque :

Il faut noter que les valeurs des contrôles sont prises en compte avec une période configurable fixée par défaut à 10 millisecondes. Le choix de cette période s'explique par le résultat d'expériences menées sur des musiciens. Celles-ci ont montré qu'une période de modification des paramètres de jeu proche de la dizaine de millisecondes donne souvent des résultats assez satisfaisants.

3.2 Programmation d'objet jMax

3.2.1 Inlet et outlet

Un objet est défini par son nombre d'entrées (inlet), de sorties (outlet) et pour chaque inlet la liste des méthodes associées. Ces inlets et outlets peuvent être de type "contrôle" ou "signal".

Les inlets de type contrôle ont une ou plusieurs méthodes associées. La déclaration de celles-ci s'effectue lors de l'instantiation de l'objet. Il est possible d'associer plusieurs méthodes à un inlet avec un mécanisme similaire à la surcharge des méthodes en C++. Les outlets de type "contrôle" permettent d'envoyer des messages aux autres objets du patch.

Les inlets de type "signal" n'ont pas de méthode associée. Ils servent à récupérer le signal fourni par un autre objet. Dans le cas où un traitement sur le signal est effectué à l'intérieur de l'objet, le signal résultant est envoyé aux autres objets par l'outlet "signal".

3.2.2 Méthode système

Il existe trois méthodes forcément appellées lors de l'utilisation d'un objet. La méthode d'instantiation est la première méthode appellée par l'environnement. Elle spécifie le nombre d'inlet, d'outlet, la taille mémoire de l'objet et la liste des méthodes associées aux inlets et les types de message correspondants. Dans le cas d'un objet traitant le signal, on définit aussi dans cette méthode le nom de la fonction de traitement du signal (fonction DSP).

La seconde méthode appellée est la méthode d'initialisation de l'objet. On y effectue généralement les réservations d'espaces mémoires et les initialisation des paramètres de l'objet. Il est aussi possible de récupérer des arguments saisis avec le nom de l'objet dans la "boîte" de l'interface graphique.

Lors de la suppression de la "boîte" contenant le nom de l'objet, la méthode de suppression est appellée. Elle permet de libérer les espaces mémoires alloués.

Dans le cas d'objet traitant le signal on utilise deux méthodes supplémentaires. La méthode "put" est appellée lorsque l'on lance le traitement du signal (envoi du message "start" à l'objet dac∼). Elle permet de connaître la fréquence déchantillonnage et la taille des paquets d'échantillons servant à transporter le signal. Il faut remarquer qu'il n'est pas possible de prendre connaissance de ces paramètres avant l'execution de cette méthode. Cette méthode lance aussi la fonction DSP qui est appellée périodiquement par le système, la fonction DSP étant celle qui s'occupe du traitement du signal.

Chapitre 4

Modèle de trompette

Le but principal de ce stage est l'implémentation, sous l'environnement jMax, du modèle de trompette, élaboré par Christophe Vergez au cours de sa thèse. Après une description de ce modèle, j'exposerai le travail algorithmique et de programmation que j'ai effectué pour atteindre ce but.

4.1 Description de l'instrument

La trompette, appartenant à la famille des cuivres, est constituée d'une embouchure sur laquelle viennent se poser les lèvres de l'instrumentiste, suivie d'un tube de longueur variable (la variation étant obtenue via les pistons), tube qui finit en s'évasant pour former le pavillon. Il est essentiel de préciser la particularité de la trompette: les lèvres sont partie intégrante de l'instrument en ce sens qu'elles constituent l'excitateur de ce dernier. Elles créent l'oscillation et ont donc un rôle primordial dans la production du son.

4.2 Description du modèle

4.2.1 Le corps de l'instrument

Ce que l'on nomme le corps de l'instrument est l'ensemble constitué de l'embouchure, du tube et du pavillon. Dans ce modèle, on a approximé cet ensemble par un résonateur linéaire. En considérant que les ondes se propageant dans le tuyau ont une longueur d'onde grande devant le diamètre de ce dernier, on émet l'hypothèse que l'onde est plane. On peut ainsi proposer la décomposition de l'onde évoluant dans l'instrument comme la somme d'une onde plane aller et d'une onde plane retour; ceci permettant d'aborder le problème dans le cadre des guides d'ondes. L'instrument peut donc être vu commme:

- un retard correspondant au temps de propagation d'une onde dans la partie cylindrique.
- des fonctions de réflexion qui caractérisent les extrémités (embouchure et pavillon).

En se plaçant à l'embouchure, on peut calculer la pression de retour considérée comme la réponse de l'instrument à la pression incidente. Cette réponse de l'instrument est représentée par la fonction de réflexion de l'instrument "vu" de l'embouchure figure 4.2.

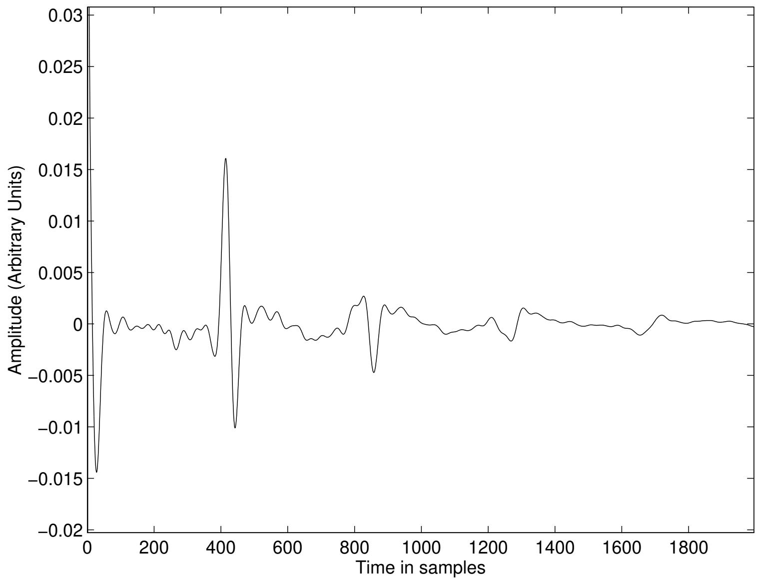

FIG. 4.1 – *Fonction de réflexion vu depuis l'embouchure de l'instrument*

Dans le but d'un fonctionnement temps réel du modèle, seules les deux premières réflexions (embouchure et première due au pavillon) ont été retenues afin de réduire le coût de calcul des convolutions à effectuer (Figure 4.2). De plus, on peut remarquer en examinant le tube d'une trompette que celui-ci ne comporte pas de brusques changements de section. Ce constat nous amène à considérer que la partie de la fonction de réflexion liée au tube est la fonction nulle. Suite à ces remarques, nous utiliserons la fonction de réflexion dîte "simplifié" représentée sur la figure 4.2.

La prise en compte de la forme du pavillon sur le son produit par le modèle s'effectue par l'ajout d'un filtre rayonnement au système.

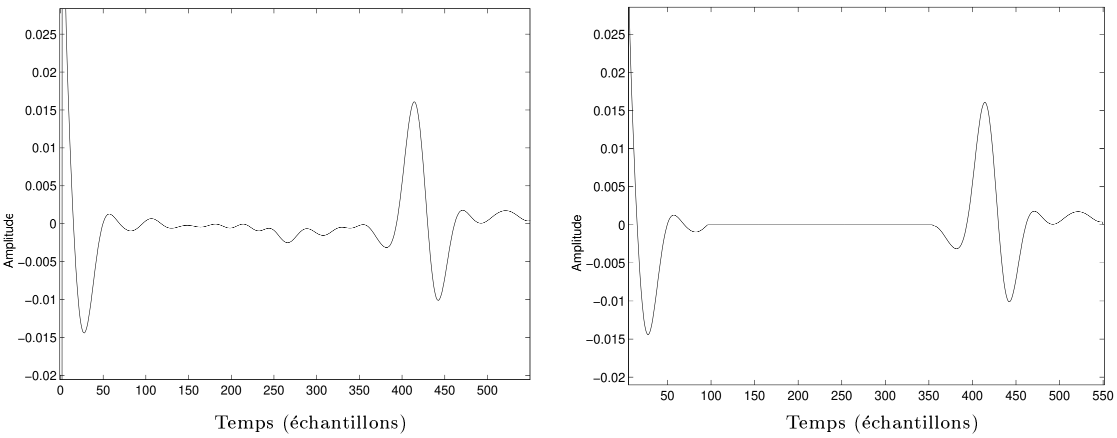

FIG. 4.2 – *Fonction de réflexion et fonction de réflexion simplifiée*

4.2.2 Modélisation de la lèvre

Les lèvres jouent le rôle d'excitateur: la pression dans la bouche est à l'origine de la formation d'un jet d'air passant entre les lèvres et dont l'évolution dépend des forces auxquelles ces dernières sont soumises.

Le voeu d'avoir un modèle simple qui permette une application en temps réel nous a guidé le choix vers un modèle à une masse (Figure 4.3).

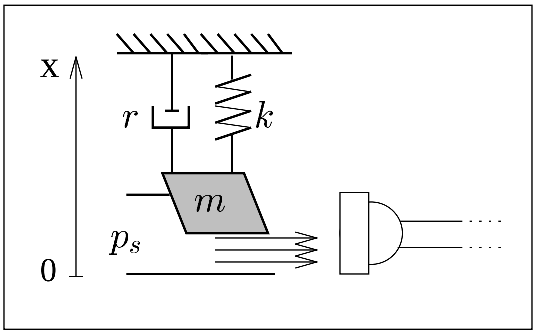

FIG. 4.3 – *Modèle à une masse simulant la lèvre*

Des visualisations stroboscopiques de lèvres de trompettiste pendant le jeu instrumental appuie ce choix. Il est apparu que l'amplitude l'oscillation de la lèvre inférieure est souvent négligeable en comparaison de l'amplitude de l'oscillation de la lèvre supérieure. Les expériences réalisées à l'IRCAM avec la bouche artificielle et les lèvres en latex confirment qu'une lèvre à souvent une oscillation d'amplitude très supérieure à celle de l'autre lèvre. En conséquence le modèle prend en compte et modélise l'oscillation de la lèvre supérieure uniquement. La lèvre inférieure est cependant prise en compte par ses effets sur la dynamique de la lèvre supérieure lorsque les deux lèvres sont fermées.

La lèvre est donc modélisée par une masse parallélipipédique homogène indéformable m, attaché à un ressort de raideur k et à un amortisseur de constante r. Le choix de la forme parrallélipipédique s'explique par le souhait d'insister sur le rôle déstabilisateur de la sur-pression statique dans la bouche.

Caractéristiques de la lèvre

- sa géométrie parallélépipédique indéformable qui ne peut bouger que selon la direction (Ox): sur chaque face en contact avec l'air s'applique une force de pression.
- sa masse m
- sa viscosité r
- sa raideur k

4.2.3 Commandes

L'ensemble des valeurs qui définissent le modèle peut être classé en plusieurs catégories:

Les variables de jeu correspondent aux grandeurs largement "modulées" par le musicien pour jouer; ce sont la pression dans la bouche, les caractéristiques mécaniques de la bouche et la longueur du tube

Les "constantes du musicien" sont rattachés aux caractéristiques moins contrôlables par le musicien (ex.:morphologie): ce sont notamment l'épaisseur des lèvres, les changements de caractéristiques mécaniques lors du contact...

Les "constantes du corps de l'instrument" sont données par la longueur des lèvres (imposée par l'embouchure) et les grandeurs déterminant les fonctions de réflexion et de rayonnement.

Les constantes sont soit des constatntes physiques telles que la masse volumique de l'air, la célérité du son dans l'air, soit des constantes de la mise en œuvre telle que la fréquence d'échantillonnage.

4.3 Implantation du modèle sous jMax

4.3.1 Cahier des charges

Le cahier des charges pour l'implantation du modèle comportait les points suivants. D'une part, il était nécessaire que l'on puisse jouer du modèle de trompette ce qui impliquait un fonctionnement en temps réel et un contrôle de l'objet assez aisé.

D'autre part, la maintenance de l'objet devait être facile afin de pouvoir modifier rapidement le programme en cas d'amélioration du modèle.

4.3.2 Caractéristique du programme original

Le moteur de calcul de traitement des échantillons s'appuyait sur un programme C utilisant l'interface logicielle Hear The Music (HTM) élaborée par le Center for New Music and Audio Technologies (CNMAT) situé à Berkeley. L'interface de contrôle comportait une interface graphique composée de sliders, en plus du système décrit précédemment. Cette interface graphique a été écrite par Xavier RODET en Motif/C++. Le moteur de calcul et l'interface graphique tournait sur des machines différentes. La communication entre les deux s'effectuait selon le protocole UDP. Les fonctions utilisées pour la communication UDP appartenaient à une librairie écrite au CNMAT.

4.3.3 Optimisation de l'algorithme

Amélioration de la gestion de la ligne à retard

La première modification effectuée sur l'algorithme consistait en la décomposition de la boucle de traitement du signal en plusieurs boucles. Cette décomposition permet d'éviter de tester le débordement de la zone mémoire allouée à chaque itération. En effet, on connaît le nombre d'itérations effectuées à chaque exécution de la fonction DSP, la position du pointeur d'écriture sur la ligne à retard et la taille de celle-ci. On peut donc calculer le nombre d'itérations nécessaires au pointeur pour atteindre la fin de la zone mémoire allouée. Dans le cas où l'on a un risque de débordement de l'espace mémoire alloué, on active un flag. Ce flag nous permet de savoir s'il est nécessaire de recopier l'espace mémoire, de la taille requise pour effectuer les convolutions liées aux fonctions de réflexion, en début de zone mémoire. Cette modification de l'algorithme permet de passer de 128 à 12 tests.

Modification de la fonction de traitement du signal

Les paramètres de contrôle influent sur les méthodes de génération du signal sonore, en effet le traitement diffère selon les valeurs des paramètres. Par exemple lors de l'occurrence d'une attaque, on effectuera une interpolation sur la pression incidente. Pour réduire les temps de calculs, l'utilisation de pointeurs sur fonction m'a semblé être une solution intéressante. On effectue des tests sur les nouvelles valeurs des paramètres lors de leur modification. Les résultats de ces tests positionnent les pointeurs de fonctions sur les fonctions de traitement appropriées. Cette modification de l'algorithme permet de passer de 7 tests lors de chaque itération de la boucle de traitement DSP à 7 tests, au maximum, lors de la prise en compte des nouvelles valeurs des paramètres. Dans le cas d'une utilisation à une fréquence d'échantillonnage de 32000 Hz et une période de prise en compte des paramètres de 10 millisecondes, une réduction de 320. Cependant cette méthode ne peut s'appliquer sur l'ensemble des paramètres car certains, tel que la position de la lèvre, sont modifiés à l'intérieur de la fonction DSP.

4.3.4 Contrôle de l'objet

Afin de permettre un contrôle total sur le modèle, il a été décidé que tous les paramètres devaient être accessibles depuis l'interface graphique. Cependant pour utiliser le modèle en mode jeu, un objet de contrôle permet de d'effectuer les relations entre les paramètres.

Interface de contrôle

Pour se rapprocher des conditions de jeu du trompettiste, une interface de contrôle constituée d'un saxophone et pédale MIDI a été mis en œuvre. Ce dispositif est représenté sur la figure 4.4.

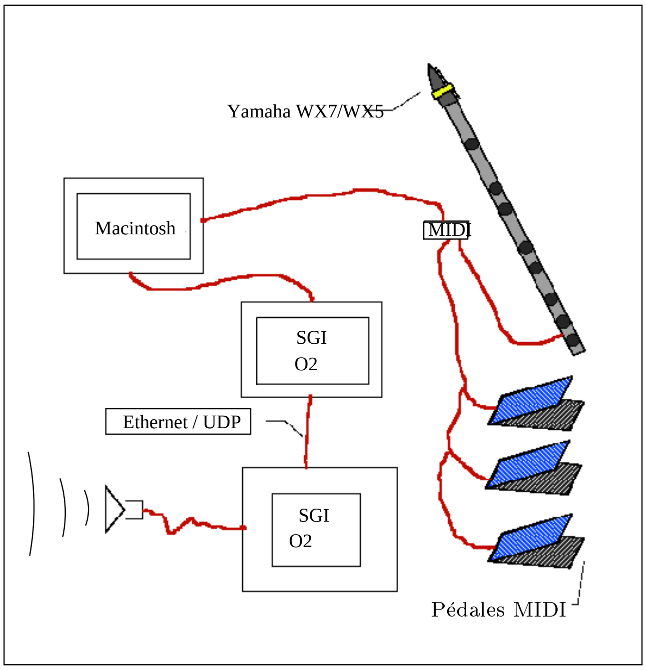

FIG. 4.4 – *Dispositif de contrôle mis en place*

Remarque :

L'ordinateur MacIntosh a pour fonction celle de "séquenceur MIDI". L'utilisation de ce séquenceur permet la création de séquences de contrôle du modèle. Il est possible de récupérer en temps réel les paramètres et d'effectuer une sauvegarde sur le MacIntosh et ainsi faire rejouer au modèle les séquences enregistrées.

4.3.5 Introduction à la norme MIDI

La norme MIDI (Musical Instrument Digital Interface) est une norme de communication entre instruments, couramment utilisée dans le monde musical. Elle utilise une liaison série asynchrone à 31250 bauds. Les mots employés pour les messages sont composés de 10 bits dont 1 bit de départ et 1 de fin de message. Les 8 bits peuvent correspondre à des messages de type contrôle ou de type donnée. Le bit de poids forts correspond au bit de status, il est positionné à 1 pour un message de type contrôle et à 0 pour des données. On peut donc remarquer que les données sont codées sur 7bits (soit 127 valeurs). Il est possible d'utiliser deux mots pour envoyer une donnée sur certain contrôleurs (d'ou 14bits de données).

Inconvénient de la norme MIDI

L'utilisation de la norme MIDI est loin d'apporter toute satisfaction. Les problèmes sont d'ailleurs clairement identifiés et bien connus des musiciens: valeur du paramètre codée par défaut sur 7 bits (donc 127 valeurs disponibles), faible bande passante, limitation de la longueur des cables...

Cependant, notre but étant d'évaluer le potentiel musical du modèle, nous avons opté pour la norme MIDI. Les contrôleurs ont en effet le mérite d'exister et d'être très répandus dans le milieu musical.

4.3.6 Rapport de programmation

Afin de permettre à un successeur de poursuivre le travail que j'ai effectué, j'ai rédigé un rapport de programmation sur ce modèle. Ce rapport décrit les algorithmes, les fichiers, les fonctions et les variables utilisées pour l'élaboration des deux objets composant le modèle. Avec les commentaires des codes sources, ils devraient permettre, je l'espère une maintenance aisée du modèle.

Chapitre 5

Autres objets développés

En plus de l'implémentation du modèle de trompette, j'ai réalisé deux autres objets, actuellement en test auprès des assistants musicaux de l'IRCAM, qui devraient être livrés dans la prochaine distribution de jMax.

5.1 Objet de visualisation de signal

La version standard de jMax n'offre pas d'outils de visualisation de signal en direct. Cela pose des problèmes de compréhension sur l'action de modifications de paramètres lors du développement d'un nouveau modèle. En effet, sans moyen de visualisation directe intégré au logiciel, l'utilisateur peut avoir des difficultés à bien comprendre les dysfonctionnements du système modélisé. Il a bien sur la possibilité d'enregistrer le signal de sortie dans un fichier puis ensuite de le visualiser avec un outil adéquat, mais il perd ainsi l'interactivité entre modification de paramètres et changement de la forme du signal.

Afin d'apporter un confort d'utilisation, il m'a été demandé de créer un objet jMax permettant de visualiser en direct le signal.

Cet objet devait permettre de visualiser en temps réel le signal de sortie, de "geler" la représentation de ce signal. Les paramètres de l'affichage (taille, nom de la fenêtre, nombre de valeurs affichées, période de rafraîchissement) devaient pouvoir être modifié par les possibilités offertes par l'interface graphique de jMax. Il devait aussi pouvoir être utilisé quelque soit la fréquence d'échantillonnage.

Après quelques utilisations de jMax, je me suis aperçu de l'importance du temps processeur occupé par Java, j'ai donc préféré utiliser la librairie X11 plutôt que les méthodes d'affichage graphique de Java. Il est évident que l'utilisation de cette librairie va à l'encontre de la philosophie de la portabilité mais dans le cadre d'une application temps-réel, il m'a semblé logique de préferer la réduction des temps de calcul plutôt que la portabilité.

La création de cet objet m'a permis de prendre connaissance des fonctionnalités offertes par FTS pour la prise en compte des paramètres provenant de l'interface graphique, et pour la gestion de signaux.

Remarque :

Du fait de la structure modulaire des patchs, cet objet permet de visualiser tout signal transitant à l'intérieur d'un patch. Par exemple en le connectant à l'objet FFT il est possible de visualiser celle-ci.

5.2 Modèle d'instrument sommaire

5.2.1 Description du modèle

L'observation d'un instrument à vent tel que la clarinette, nous permet de décomposer celui-ci en plusieurs parties: une embouchure, un tube et un pavillon. Nous pouvons donc imaginer modéliser chacune de ses parties afin de construire un modèle basique d'instrument à vent. Les travaux de Xavier RODET ont montré qu'il était possible de réaliser ce modèle en concevant un système composé d'une oscillation non linéaire, qui sert de fonction d'excitation, couplé à une ligne à retard. Cette comparaison nous amène à concevoir un modèle basique d'instrument représenté par le schéma fonctionnel suivant (Figure 5.1), la partie liée à la fonction de réflexion correspond à l'action du pavillon sur l'onde réfléchie.

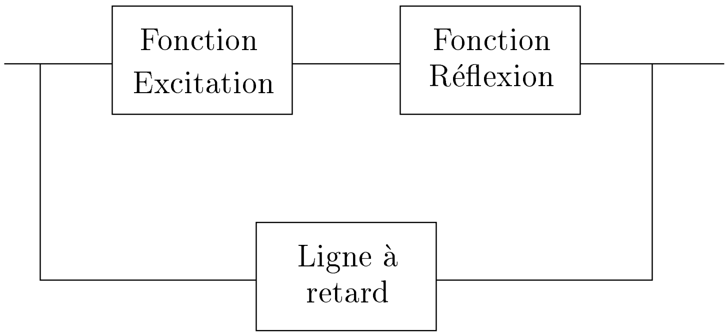

FIG. 5.1 – *Schéma fonctionnel du système modélisant un instrument sommaire*

La fonction d'excitation est la suivante:

$$f(x) = \frac{x^3 + \gamma x^2 + \alpha x}{\beta x^2 + 1} \tag{5.1}$$

α Pente à l'origine
β Pente des asymptotes

γ Facteur de dissymétrie de la fonction

Cette fonction a pour caractéristique d'osciller lorsqu' elle est bouclée sur elle-même.

Une autre caractéristique est le doublement de la période d'oscillation lorsque la valeur de la pente à l'origine est modifiée. Les figures 5.2 et 5.3 montrent l'action de la modification du paramètre α sur la transformée de Fourier du signal de sortie du système composé de cette fonction d'excitation et d'une ligne à retard.

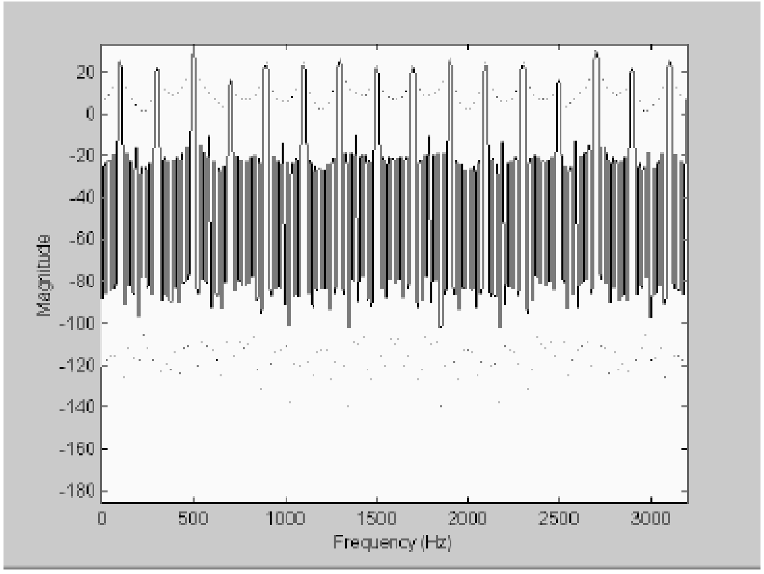

FIG. 5.2 – *FFT avec* $\alpha = -2$, $\beta = 2$, $\gamma = 0$, *Retard de 16 échantillons*

Afin de permettre une application musicale à cet objet, il est nécessaire de laisser à l'utilisateur le moyen de faire varier la fréquence d'oscillation autrement que par doublement de période. Le retard du système est donc modifiable en temps réel pour laisser cette liberté de création. Les figures 5.2 et 5.4 montrent le doublement de la fréquence d'oscillation lors de la réduction du retard par un facteur 2. L'utilisation de retard entier posait cependant des problèmes lors de la modification du retard. Du fait de cette discrétisation des valeurs de retard possibles, les variations de longueur de la ligne à retard s'accompagnait de "clics" très désagréables pour une utilisation musicale. Afin de satisfaire les attentes des artistes, j'ai implémenté les retards fractionnaires. J'ai utilisé pour cela la méthode de Lagrange avec une structure de Farrow d'ordre trois. Cette implémentation permet en plus d'offrir une variation continue de la ligne à retard, ce qui se manisfeste par une modification continue de la tonalité du son généré, et d'affiner la fréquence de ce son pour correspondre à une note.

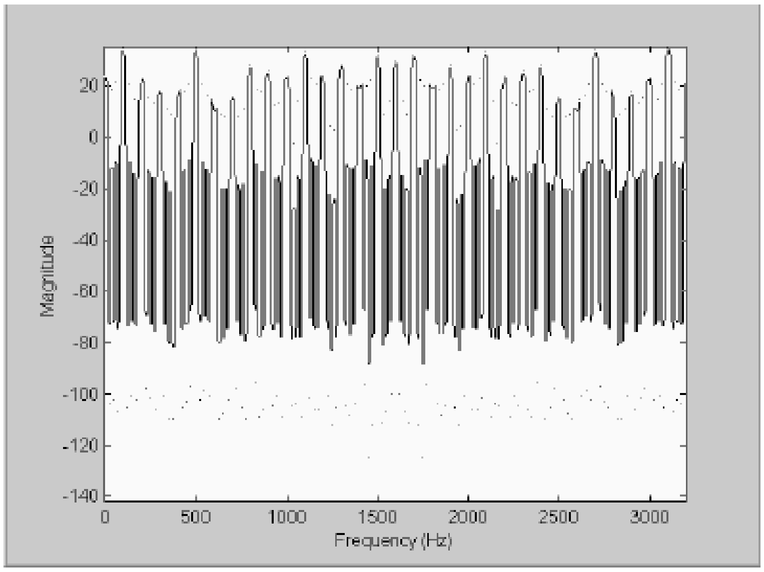

FIG. 5.3 – *FFT avec* $\alpha = -5$, $\beta = 2$, $\gamma = 0$, *Retard de 16 échantillons*

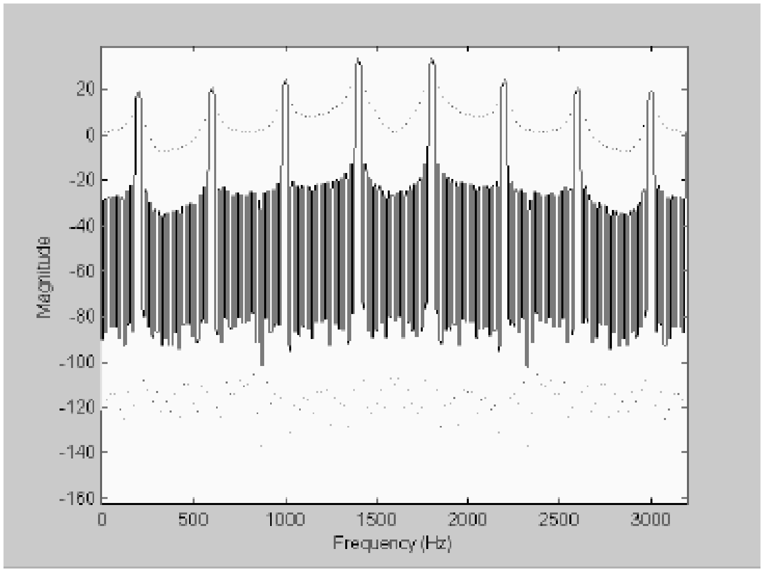

FIG. 5.4 – *FFT avec* $\alpha = -2$, $\beta = 2$, $\gamma = 0$, *Retard de 8 échantillons*

Cependant la richesse en harmonique de l'onde sonore produite par le système ne permet pas de le considérer comme un instrument utilisable. Afin de réduire cette richesse, nous avons mis un filtre résonnant en sortie de l'oscillation non linéaire. Il permet de réduire les amplitudes des harmoniques et produire à la sortie une note, dans le cas où l'on boucle le système à la sortie de ce filtre.

Remarque :

> Le filtre utilisé est un filtre deux pôles deux zéros. Les paramètres modifiables sont la fréquence de résonance et la bande passante. Il est normalisé pour assurer la stabilité du système. Pour assurer la justesse de la note produite, il faut faire correspondre fréquence de résonnance, fréquence de la note recherchée et taille de la ligne à retard.

De plus, afin de permettre une ouverture musicale de l'objet nous avons ajouté des dérivations aux filtres et la possibilité de boucler le système avant ou après action des filtres. Ces modifications du système en temps réel offrent une ouverture du champ de création musicale, dans le cadre de la musique contemporaine.

5.2.2 Contrôle de l'objet

Toutes les variables d'états du système peuvent être contrôlées.

- α la pente à l'origine de la fonction non linéaire; on peut faire une analogie entre ce paramètre et la pression du souffle
- β la pente asymptotique
- γ le facteur de dissymétrie, il permet un enrichissement du son produit.
- la fréquence de résonnance du filtre résonant
- la bande passante du filtre résonant

Tous ces paramètres sont accessibles depuis l'interface graphique afin de laisser tout contrôle du modèle à l'utilisateur. Il est aussi possible de se servir d'interfaces MIDI telle qu'un saxophone ou un clavier par le biais des objets “MIDI” incorporés à la version standard de jMax.

Les remarques des assistants musicaux m'ont permis de leur fournir un patch répondant à leur attente en terme de contrôle. Le paramètre α, dont les modifications affectent l'amplitude sonore, est contrôlé par la vélocité de la touche jouée sur un clavier, ou par la pression du souffle dans le cas de l'utilisation d'un saxophone MIDI. La taille du retard et la fréquence de résonnance du filtre deux pôles deux zéros sont contrôlés par le numéro de la note MIDI jouée. Il est possible de modifier légèrement la taille de la ligne à retard par un contrôleur de type bender, qui se présente sous la forme d'une molette avec ressort de rappel. L'utilisation de ce bender est conforme à l'usage habituel de ce contrôleur par les musiciens sur des instruments MIDI.

Conclusion

J'ai pu au cours de ce stage réaliser trois objets jMax dont deux seront ajoutés à la prochaine version de ce produit, après avoir passé des tests auprès des assistants musicaux de l'IRCAM. Le modèle de trompette ne sera lui disponible qu'après la parution de la thèse de Christophe Vergez, ceci afin de préserver la confidentialité de son travail. Le volume de travail effectué pour la création de l'ensemble des objets correspond à l'écriture de 6600 lignes de codes. Afin de permettre à mes successeurs de réaliser de nouveaux objets, j'ai rédigé un guide d'utilisation de l'environnement jMax. De plus, j'ai aussi écrit une documentation sur l'utilisation du modèle d'instrument sommaire, à l'intention des assistants musicaux de l'IRCAM.

Lors de ce stage je fus amené à mettre en œuvre des connaissances théoriques dans le domaine du traitement du signal et de l'algorithmique/programmation en C. Par ailleurs, à travers le dialogue avec des musiciens, il m'a fallut bien identifier leurs attentes vis à vis des modèles, afin de définir les paramètres de contrôle les plus pertinents.

Les études effectuées sur les modèles physiques, va permettre d'envisager la création d'une norme semblable à une norme de banque d'échantillons MIDI, offrant un intérêt d'une part dans la compression de sons et d'autre part dans la création musicale. En effet, dans le cas de modélisation physiques d'instruments, il ne sera plus nécessaire de compresser le signal mais seulement les séquences de paramètres envoyés aux modèles pour restituer une œuvre. D'autre part, du point de vue de la création musicale, cette norme sur les modèles physiques, ou l'existence d'un modèle générique regroupant toutes les caractéristiques aux divers modèles, offrirait un vaste champs de création aux artistes.

Table des matières

Annexe A

Présentation de l'IRCAM

L'IRCAM (Institut de Recherche et de Coordination Acoustique Musique) est situé:
1, place Igor-Stravinsky
75004 PARIS
Tél. : 01 44 78 48 43 Fax 01 44 78 15 40
Site Internet : www.ircam.fr

A.1 Missions

LIRCAM accueille et suscite une interaction féconde entre création et recherche musicales, dans la fidélité à sa vocation originelle, tout en réfléchissant à l'urgence des mutations.

A.1.1 Une recherche multiforme

Mutuellement enrichissante pour les chercheurs et les compositeurs, la recherche se construit autour de projets concertés, accordant les technologies les plus récentes aux exigences et à la cohérence d'un contexte musical. Elle utilise les meilleures compétences scientifiques ; elle bénéficie de nombreuses collaborations extérieures, ainsi que d'une véritable valorisation des produits.

A.1.2 Un espace de création en temps réel

Ouvert sur la communauté musicale internationale, l'Institut accueille chaque année de jeunes talents et des créateurs affirmés. Il souhaite offrir aux compositeurs un cadre de réalisation technique performant. Le contexte pluridisciplinaire du Centre Georges-Pompidou suscite l'émergence d'œuvres de collaboration (danse, cinéma, vidéo, installations sonores). La diffusion des commandes est favorisée par des relations privilégiées avec l'Ensemble Intercontemporain et d'autres institutions musicales (festivals, opéras, théâtres, sans oublier les maisons de disques).

A.1.3 Un grand pôle pédagogique

En amont et en aval de la recherche et de la création, l'IRCAM propose des formations et des repères. Le compositeur doit pouvoir se familiariser avec le maniement des technologies contemporaines. L'étudiant doit avoir accès aux démarches qui guident la recherche et la création musicales d'aujourd'hui. Enfin, le public doit trouver les repères qui lui permettent de mieux sorienter dans une aventure musicale en train de s'élaborer.

A.1.4 Une médiation active

L'IRCAM développe ses activités éditoriales, afin de constituer une documentation sur les musiques d'aujourd'hui et de saisir aussi de manière critique les enjeux technologiques et artistiques qui se font jour. Parallèlement, la nouvelle médiathèque dote son fonds de moyens informatiques de consultation et permet d'accéder à nombre de produits multimédias. Enfin, en multipliant les journées portes ouvertes et les manifestations diverses en collaboration avec les autres composantes du Centre Georges-Pompidou, l'IRCAM, plus que jamais, s'expose et se donne à voir.

A.2 Recherche et Développement

L'IRCAM a été fondé dans le but de susciter une interaction féconde entre recherche scientifique, développement technologique et création musicale contemporaine et cette articulation constitue depuis sa création le principal axe structurant l'ensemble de ses activités. L'un des enjeux majeurs est de contribuer, par les sciences et techniques, au renouvellement de l'expression musicale. Réciproquement, les problèmes spécifiques posés par la création contemporaine donnent lieu à des avancées scientifiques originales tant théoriques, méthodologiques qu'appliquées, dont la portée dépasse largement le seul domaine musical. Cette médiation entre recherche et création musicales comporte en particulier le développement d'outils logiciels pour la composition, à partir de modèles et prototypes élaborés par des équipes de recherche travaillant dans les différents domaines en rapport avec la musique : informatique (langages, interfaces homme-machine, temps-réel), bases de cognitive de l'audition.

Les activités sont structurées autour de deux pôles complémentaires, recherche et développement.

A.2.1 La recherche

La recherche, source d'innovation, a pour but l'élaboration de connaissances en rapport avec les problématiques musicales. Interdisciplinaire par nature, elle inscrit son activité dans les organismes d'enseignement supérieur et avec des partenaires institutionnels et privés. L'accueil d'élèves-chercheurs et ingénieurs dans le cadre de thèses de doctorat, de stages de DEA et d'écoles d'ingénieurs contribue à la formation par la recherche. L'augmentation des ressources propres, nécessaire à la croissance des activités, est obtenue par la réalisation de prestations et de contrats d'études, coordonnés par la direction de la Valorisation. L'Unité Mixte de Recherche IRCAM-CNRS constitue une structure de recherche commune à l'IRCAM et au CNRS, autour d'un projet scientifique dans le domaine de la recherche musicale associant sciences de l'homme et de la société et sciences pour l'ingénieur.

A.2.2 Le développement

Le pôle de développement a pour mission l'adaptation des modèles et prototypes issus de la recherche sous la forme d'outils et environnements logiciels pour la composition. Ceux-ci sont conçus de manière suffisamment ouverte et programmable pour convenir à des approches esthétiques très diverses. Le développement des logiciels comprend en particulier la conception d'interfaces homme-machine adaptées, la mise en œuvre de protocoles de communication entre applications destinée à assurer une cohérence d'utilisation de l'ensemble des outils, et l'intégration permanente de technologies issues d'une industrie informatique en très rapide évolution. La mise en place en 1993 du Forum IRCAM, club d'utilisateurs des logiciels de l'IRCAM, a favorisé la diffusion de ceux-ci auprès d'une communauté musicale élargie, évaluée à un millier d'utilisateurs en 1998, tout en orientant les activités de développement dans le sens d'une production organisée. Des cessions de licences sont également accordées à des partenaires extérieurs, pour leur utilisation propre ou pour la commercialisation des logiciels, comme celle du logiciel Max, édité et diffusé par la société Opcode Systems à plus de 5000 exemplaires dans le monde.

A.2.3 Thèmes de recherche et de développement

Le département Recherche et développement, dirigé par Hugues Vinet, compte une soixantaine de collaborateurs, chercheurs et informaticiens et regroupe l'ensemble de ces activités selon une organisation thématique par équipes :

Acoustique instrumentale

L'équipe Acoustique instrumentale, dirigée par René Caussé, étudie le fonctionnement des instruments de musique en élaborant des modèles acoustiques qui prennent en compte leurs caractéristiques de production (excitation, résonance) et de rayonnement du son. Ces travaux sont appliqués à la synthèse par modélisation physique (logiciel Modalys) et contribuent à l'amélioration de la lutherie traditionnelle.

Acoustique des salles

L'équipe Acoustique des salles, dirigée par Olivier Warusfel, étudie l'effet de la propagation du son dans les lieux d'écoute. Une part importante de son activité est consacrée, autour du développement du logiciel Spatialisateur, à la simulation acoustique, intégrant à la fois les paramètres de localisation des sources, d'effet de salle et l'adaptation aux dispositifs de restitution. Au-delà des nouvelles possibilités ouvertes aux compositeurs pour la spatialisation des sons, ces recherches trouvent de nombreuses applications dans les domaines de la diffusion et de la post-production sonores, des télécommunications, de l'acoustique automobile, etc..

Perception et cognition musicales

L'équipe Perception et cognition musicales, dirigée par Stephen McAdams, étudie les mécanismes intervenant dans l'écoute musicale, selon les différentes étapes de traitement des informations sensorielles par le cerveau. Ces travaux, qui sont basés sur les méthodes de la psychologie expérimentale, débouchent sur des modèles de l'audition susceptibles d'être intégrés dans les outils de composition. Les méthodes développées pour l'étude du timbre musical sont appliquées pour caractériser la qualité acoustique des sons dans des domaines tels que l'automobile et les transports ou pour développer des procédures de recherche de haut niveau dans les bases de données sonores (recherche par contenu).

Analyse-synthèse

L'équipe Analyse-synthèse, dirigée par Xavier Rodet, développe des procédés de synthèse et de transformation des sons. Différents modèles de synthèse sont mis au point, à partir de méthodes de traitement de signal (modèles de signaux) ou de la modélisation acoustique des sources sonores (synthèse par modélisation physique). Ces travaux donnent lieu au développement d'outils de synthèse et de traitement sonores pour la composition (logiciels Additive, Audiosculpt, Chant, Diphone, Super Vocodeur de Phase, etc) et trouvent de nombreuses applications dans les domaines du traitement de la voix, de la simulation de bruits de voitures, de la segmentation automatique des sons, etc...

Représentations musicales

L'équipe Représentations musicales, dirigée par Gérard Assayag, développe des environnements de composition assistée par ordinateur, à partir d'une formalisation informatique des structures musicales. Les logiciels PatchWork et OpenMusic issus de ces travaux constituent deux générations successives d'environnements compositionnels permettant le calcul de structures musicales à partir de langages de programmation graphique. Ils sont abondamment utilisés pour la composition d'œuvres contemporaines, notamment pour l'élaboration de parties instrumentales (aide à l'écriture).

A.2.4 Systèmes temps réel

L'équipe Systèmes temps réel, dirigée par François Déchelle, met au point des dispositifs informatiques destinés au traitement en temps-réel des informations musicales et sonores. Ces systèmes sont utilisés par les compositeurs pour concevoir des œuvres associant de manière interactive des parties instrumentales et des parties électroniques calculées par ordinateur. L'équipe inscrit son activité dans la continuité de travaux menés à l'IRCAM depuis son origine (système 4X, Station d'Informatique Musicale, logiciel Max) et oriente ses efforts sur le développement d'une solution purement logicielle et multi-plate-forme (jMax), basée sur une interface graphique en Java et un serveur de traitement écrit en C (FTS).

Studio en ligne

L'équipe Studio en ligne coordonne la réalisation d'un projet labellisé "Autoroutes de l'information", financé par les ministères chargés de l'Industrie et de la Culture, qui a pour but l'expérimentation d'un service télématique, destiné aux professionnels du son et de la musique, donnant accès à des ressources de production sonore. Ce service comprend l'accès à une base de données d'échantillons instrumentaux de référence et à un ensemble de transformations sonores pouvant être appliquées aux échantillons de la base ou à des sons envoyés par l'utilisateur à travers le réseau.

Le département Recherche et développement comprend également des équipes logistiques au service de l'ensemble des secteurs de l'IRCAM :

Service informatique

Le Service informatique, dirigé par Laurent Ghys, assure la gestion de l'ensemble du parc informatique de l'IRCAM, constitué d'environ 200 ordinateurs (Macintosh, Stations Unix, PC) interconnectés par un réseau TCP/IP.

Atelier mécanique

L'Atelier mécanique, animé par Alain Terrier, conçoit réalise des prototypes mécaniques à la demande des différents départements.

A.3 Le statut et le budget

A.3.1 Statut

Le Centre Georges-Pompidou regroupe des services communs et deux départements : le Musée national d'art moderne/Centre de création industrielle et le Département du développement culturel. Il est associé à deux organismes : la Bibliothèque publique d'information et l'Institut de recherche et de coordination acoustique/musique (IRCAM). L'IRCAM, bénéficiant du statut d'association reconnue d'utilité publique, possède son propre conseil d'administration, composé de plusieurs personnalités nommées pour leurs compétences et de sept représentants des organismes publics directement concernés par le contrôle de son fonctionnement, à savoir le ministère de la Culture, le ministère de la Recherche, le Centre Georges-Pompidou et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS). Depuis sa création, la présidence du conseil d'administration échoit au président du Centre Georges-Pompidou. La responsabilité exécutive est assurée par le directeur qui participe également au conseil de direction du Centre Georges- Pompidou. Adoptée dès l'origine, cette forme juridique d'association garantit à l'Institut, organisme de recherche et de création, l'efficacité et la souplesse nécessaires pour définir ses orientations stratégiques et ses politiques d'investissement, de recrutement et d'alliances avec d'autres institutions ou entreprises industrielles.

A.3.2 Budget

Pour l'exercice 1995, les ressources financières directes de fonctionnement de l'IRCAM se sont élevées à 42,65 millions de francs, soit :

- 26,65 millions de francs de subventions attribués par le ministère de la Culture et versés par le biais du Centre Georges-Pompidou
- 4 millions de francs attribués par la mission Recherche et Technologie du ministère de la Culture
- 0,35 million de francs attribués par le ministère de l'Enseignement supérieur
- 11,65 millions de francs de ressources propres, d'origines diverses : organisation de manifestations publiques (concerts et pédagogie), vente de produits d'édition, financements liés à des coopérations ponctuelles, contrats industriels, redevances sur les licences de commercialisation, valorisation de la recherche, dons de fondations...

En outre, non incluses dans le présent budget, les prestations gratuites du Centre Georges- Pompidou, qui met à disposition le bâtiment en ordre de marche, ont été estimées pour cette même année à 5,6 millions de francs.

A.3.3 Historique

1970 : Le Président Georges Pompidou demande à Pierre Boulez de créer et de diriger un institut de recherche musicale associé au futur Centre national d'art contemporain.

1973 : Mise en chantier du bâtiment conçu par les architectes Renzo Piano et Richard Rogers, situé au pied de l'église Saint-Merri, sous le bassin de la place Igor-Stravinsky.

1974 : Pierre Boulez présente publiquement les objectifs et les enjeux de l'IRCAM.

1976 : Mise au point du processeur de sons numériques 4A, premier développement scientifique conduit à l'IRCAM (équipe animée par Giuseppe Di Giugno)

1977 : Passage du XXe siècle , cycle inaugural de soixante-dix manifestations musicales.

1978 : Premier concert dans l'Espace de projection.

1979 : Première version du programme Chant (sons synthétiques générés par modélisation de la voix chantée), ultérieurement complétée par le langage de contrôle Formes (équipe animée par Xavier Rodet).

1981 : Mise au point du système 4X, dernier maillon de la série de processeurs de sons numériques développée depuis 1976. Création de la version initiale de Répons, dans le cadre du festival de Donaueschingen, première œuvre de Pierre Boulez réalisée à l'IRCAM.

1983 : Concept de recherche en musique, cycle de créations et de conférences. L'IRCAM en réseau informatique international (et sur l'Internet dès 1989).

1984 : Organisation de l'ICMC, colloque international en informatique musicale. Réalisation du logiciel Iana permettant l'analyse psychoacoustique des sons (équipe animée par Gérard Assayag).

1985 : Premiers logiciels musicaux pour ordinateur personnel (équipe animée par David Wessel).

1986 : Tournée américaine de l'IRCAM, associé à l'Ensemble Intercontemporain. Systèmes personnels et informatique musicale : symposium et cycle de créations de Marc-André Dalbavie, Philippe Durville, Philippe Hurel et Magnus Lindberg. Publication du premier numéro de la revue InHarmoniques.

1987 : Dixième anniversaire du Centre Georges-Pompidou : présentation d'œuvres nouvelles de Barry Anderson, François Bayle, George Benjamin, Thierry Lancino, Tod Machover, Philippe Manoury, Michael Obst, Kaija Saariaho, Marco Stroppa, Trevor Wishart.

1988 : Finalisation du langage de programmation graphique Max, logiciel conçu par Miller Puckette, favorisant l'interaction directe entre interprète et ordinateur, utilisé par Philippe Manoury dans Pluton. Première version de Modalys (ex-Mosac), logiciel de synthèse par modèles physiques (équipe coordonnée par René Caussé).

1989 : Lancement du Cursus d'informatique musicale, formation théorique et pratique d'une année destinée aux jeunes compositeurs. Participation à une nouvelle formation doctorale en musicologie (responsable Hugues Dufourt).

1990 : Inauguration de la tour conçue par l'architecte Renzo Piano, représentant la première phase d'extension des bâtiments de lIRCAM.

1991 : Mise au point de la Station d'informatique musicale, plate-forme de traitement audionumérique pour la recherche, la création et la production musicales (équipe animée par Eric Lindemann).

1992 : Laurent Bayle succède à Pierre Boulez à la direction de l'IRCAM. Refonte de la ligne éditoriale avec la sortie du magazine Résonance, de la collection Recherche et musique et des monographies Compositeurs d'aujourd'hui. Première opération portes ouvertes.

1993 : Mise en place du Forum IRCAM visant à renforcer les liens avec la communauté musicale. Participation à une seconde formation doctorale destinée aux jeunes scientifiques (responsable: Jean-Claude Risset). Première Académie d'été réunissant 120 musiciens de 24 pays.

1994 : Lancement de la collection monographique Ensemble Intercontemporain, IRCAM et Adès avec les disques consacrés à Michael Jarrell, Denis Cohen et Magnus Lindberg. Création d'une voix de castrat pour les besoins du film Farinelli (équipe animée par Xavier Rodet et Philippe Depalle). Finalisation d'AudioSculpt, logiciel graphique permettant de manipuler le son (équipe animée par Gerhard Eckel).

1995 : L'IRCAM et le CNRS s'associent autour d'une unité mixte codirigée par Hugues Dufourt et Hugues Vinet. Finalisation du Spatialisateur, logiciel conçu par Espaces nouveaux et l'IRCAM (équipe animée par Olivier Warusfel), destiné à l'acoustique des salles, à l'espace sonore urbain et au concert. Etudes menées sur la qualité des bruits automobiles pour le compte de Renault-PSA (équipe animée par Stephen McAdams).

1996 : Mise en place de la médiathèque (équipe de projet animée par Michel Fingerhut). Diffusion de FTS, version logicielle de la Station d'informatique musicale (équipe animée par François Dechelle). Lancement du projet Studio en ligne, soutenu par les ministères de la Culture et de l'Industrie. Inauguration des bâtiments Jules-Ferry et Bains-Douches réaménagés par les architectes Daniel Rubin et Patrick Rubin (atelier Canal).