

OUTILS D'ÉCRITURE SPATIALE POUR LES PARTITIONS INTERACTIVES

Jean-Michaël Celerier
Blue Yeti , LaBRI
jcelerie@labri.fr

Myriam Desainte-Catherine
LaBRI
myriam@labri.fr

Jean-Michel Couturier
Blue Yeti
jmc@blueyeti.fr

RÉSUMÉ

Le résumé doit être placé en haut de la colonne gauche et doit contenir entre 150 et 200 mots.

1. INTRODUCTION

Les pratiques de création multimédia incluent par définition des composantes spatiales. Celles-ci peuvent se manifester dès qu'un des types de donnée manipulée possède plus d'une dimension. La simple présence de multiples paramètres dans une création multimédia permet d'avoir une notion d'espace dans lequel on mappe un paramètre à un autre.

La plupart des outils permettant un travail spatial sont soit spécifiques à la création de trajectoires pour des sons, dans un cadre musical, soit orientés vers la création de jeu vidéo ou de formes spécifiques de médias.

Nous cherchons ici des méthodes génériques, permettant de manipuler tout type de données spatiales pour ensuite pouvoir les appliquer aux cas particuliers de la création de scénographies interactives avec des éléments musicaux.

Sera exposé un état de l'art des outils de création spatiale, puis nous présenterons deux modèles, l'un géométrique et l'autre paramétrique, qui permettent de réaliser dans un cadre musical de nouveaux types de compositions, notamment liées aux relations que l'on peut avoir entre plusieurs zones définies géométriquement. Ces modèles, intégrés au séquenceur i-score, seront appliqués à deux études de cas : une chorégraphie de robots, et une application de réalité augmentée audio.

Nous discuterons ensuite des évolutions possibles qui sont liées à un typage plus fort des données sur lesquelles on opère : notamment les modes d'édition et de représentation qui peuvent être appliqués, ainsi que la relation au temps d'objets spatiaux en deux dimensions ou plus.

1.1. Existant

Nous présentons ici plusieurs applications opérant principalement dans un domaine spatial, à but créatif. Un état de l'art plus complet est présent dans le compte-rendu du projet ANR OSSIA. Les thèmes abordés sont l'utilisation de contenus spatiaux en musique, en scénographie, et en jeux vidéos, puis les différentes méthodes d'écriture et de représentation qui existent.

Une présentation de l'état actuel de l'écriture spatiale en musique est donnée dans [10]. Notamment, la question de la notation dans le cadre de partitions impliquant des éléments spatiaux est abordée. Ces partitions peuvent être spatiales uniquement dans leur représentation, mais peuvent aussi indiquer des manières d'interpréter dans l'espace, notamment à l'aide de symboles spécialisés [9]. Une taxinomie des possibilités de création dans l'espace en musiques électro-acoustiques est présentée par Bertrand Merlier dans [18]. Elle est étendue dans l'ouvrage *Vocabulaire de l'espace en musique électro-acoustique* [17].

Des outils logiciels existent pour ces partitions – ils sont souvent spécialisés. Par exemple, la bibliothèque **ENP!** (**ENP!**) [16] permet de concevoir des partitions graphiques telles qu'en fig. ?? à l'aide d'un éditeur lui aussi graphique et d'un langage basé sur LISP.

Une des problématiques actuelles pour la représentation de l'écriture musicale est celle du geste, et de son lien avec la partition : comment notamment annoter le geste du musicien avec précision ? Et, inversement, comment à partir d'un geste créer un son correspondant ? Ces questions sont abordées dans la description de Soundstudio 4D [23], dans le cadre d'un système de conception de trajectoires pour spatialisation à l'aide d'interactions en trois dimensions.

Une autre question est l'association entre l'aspect graphique et le résultat. Ainsi, des outils tels que HoloEdit et HoloSpat permettent de travailler avec des trajectoires, mais sont extrêmement spécialisés pour des objets audio. C'est notamment dû à la nécessité de composer en ayant conscience à chaque instant des fortes contraintes techniques du moyen de restitution de l'œuvre. Il serait intéressant d'utiliser ces trajectoires pour contrôler non pas des sources sonores mais des éléments dans des espaces de paramètres quelconques.

Le logiciel IanniX [13] (fig. ??) dispose aussi de nombreuses possibilités d'écriture spatiale : les partitions sont des ensembles d'éléments graphiques définis paramétriquement ou bien à l'aide d'un langage de programmation dédié, que des curseurs vont parcourir. L'information de position de chaque curseur est envoyée en OSC, ce qui permet l'intégration à d'autres logiciels.

Une méthode d'écriture de la spatialisation par contraintes est proposée par Olivier Delerue avec le système MusicSpace [8]. Cela permet une approche déclarative à l'écriture de partition, en spécifiant des contraintes telles que « deux objets ne doivent jamais être à plus de deux mètres l'un de

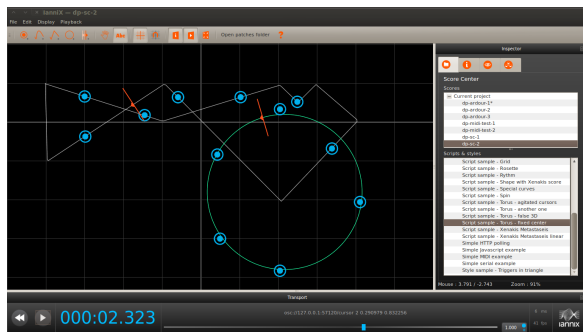


Figure 1. Le séquenceur graphique IanniX, inspiré de l'œuvre de Iannis Xenakis.

l'autre » ou bien « l'angle entre deux objets et l'auditeur doit être supérieur à 90 degrés ». Les objets peuvent être notamment des sources sonores. Une édition graphique de ces contraintes est proposée, et elles sont représentées en termes de cercles et de segments reliant les objets qu'elles contraignent.

Des données spatiales peuvent aussi être utilisées directement pour créer des mappings sonores. C'est le cas notamment de la bibliothèque Topos[19], qui permet de capter le mouvement de danseurs et d'en extraire des informations pouvant être utiles pour la conception de pièces de musique interactives. Une fois que le mouvement du danseur est capturé via un périphérique externe, il devient possible d'extraire des informations telles que le volume occupé par le danseur, sa vitesse, ou bien diverses mesures relatives à l'évolution de deux ou quatre points dans le temps, comme l'instabilité ou les collisions entre différentes parties du corps. Ces données peuvent ensuite être réutilisées dans Pure Data pour de la génération de musique.

Enfin, il convient de noter la richesse pour ce qui est des modes d'entrée et d'interaction. Par exemple, il existe plusieurs possibilités de composition musicale à l'aide de tables interactives comme la Reactable[15] et différentes approches dérivées qui peuvent être spécifiquement axées sur la spatialisation du son[21].

Un modèle plus complet d'espace en trois dimensions est fourni par COSM[25]. Implémenté dans Max/MSP, il offre une grande richesse d'écriture. En plus de lieux et de trajectoires, il est possible d'écrire l'interaction dans une certaine mesure, ainsi que la communication entre différents agents. Une nouveauté est la possibilité de travailler avec des champs définis mathématiquement. Ces champs peuvent varier dans le temps et être sonifiés par la suite.

Une approche de contrôle spatial est possible via le logiciel Blender, qui sert à l'origine à réaliser des images et films de synthèse. Blender peut être contrôlé via une API Python et il est notamment possible de déplacer des éléments et tester pour des collisions ou d'autres propriétés géométriques. Néanmoins, cela se fait à la vitesse de son moteur d'exécution qui est fixée à 60 Hz. Les messages reçus entre deux trames sont accumulés.

Enfin, le monde des jeux vidéos dispose aussi d'outils adaptés à l'écriture spatiale : la bibliothèque OpenAL a

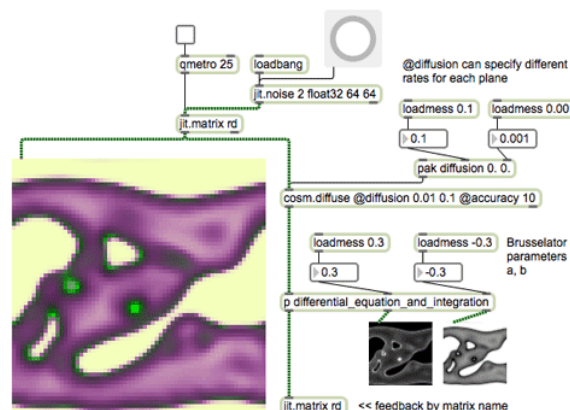


Figure 2. Un patch COSM dans Max/MSP.

été développée à l'origine pour offrir aux jeux une couche d'abstraction permettant de bénéficier de spatialisation simplement en donnant une position et une orientation à des sources sonores ponctuelles. Cette position et orientation peuvent évoluer dans le temps. Par la suite les implémentations sont libres d'utiliser les méthodes qu'elles souhaitent pour réaliser la spatialisation : cela peut aller d'un simple panning gauche-droite à l'utilisation de HRTFs, comme le fait la bibliothèque OpenAL-soft.

2. CAS D'UTILISATION

Afin d'avoir des possibilités de test de notre système, deux cas pratiques d'applications nécessitant de l'écriture de contenus spatiaux ont été étudiés.

Dans les deux cas, on veut écrire une famille de scénarios interactifs qui manipulent des types d'objets fixés : des sources sonores virtuelles dans le premier cas et des robots dans le second cas.

2.1. Exemple : sonopluie

Cette application interactive utilise de la géolocalisation par téléphone. Plusieurs sources sonores sont apposées dans un espace, dans lequel les participants se déplacent. Cet espace virtuel est mappé au monde réel lors du parcours. Ce mapping est réalisé en positionnant les zones sur une carte issue d'un service web. Le système mesure la distance de chaque participant aux sources, et va jouer les sources sonores plus ou moins fort en fonction de cette distance. La spatialisation est réalisée par la bibliothèque OpenAL [12]. En effet, elle est supportée sur de nombreux appareils mobiles courants.

Il manque un outil simple d'écriture pour disposer les zones dans l'espace, leur associer des sons et des comportements. Un des objectifs du projet est d'offrir de l'interaction et de l'évolutivité dans les scénarios : par exemple, après s'être approché d'un point donné, on voudrait pouvoir désactiver des points précédents et activer des points suivants, ou avoir des points qui se déplacent.

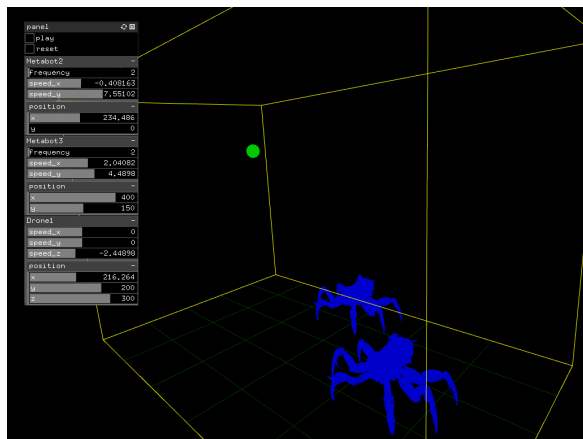


Figure 3. Logiciel de simulation de metabots communiquant avec i-score

2.2. Exemple : robots

Ce projet consiste en la réalisation d'une chorégraphie de robots musicaux, puis de drones. On dispose d'une flotte de robots open-source Metabot¹. Ces robots sont contrôlés en vitesse : on écrit sur le port série des commandes telles que $dx \ 30$ pour indiquer une vitesse de 30 cm s^{-1} . Un logiciel a été conçu pour faire un mapping d'un arbre Minuit vers le port série. En parallèle, un logiciel de simulation est développé à l'aide d'OpenFrameworks, qui expose le même arbre Minuit. Ce logiciel de simulation permet d'afficher les robots et de détecter les collisions, pour empêcher qu'elles ne se produisent en pratique, avec des robots coûteux. On veut notamment utiliser le rythme de marche des robots pour produire de la musique.

Chaque robot va posséder une trajectoire dans le plan. Cette trajectoire pourra potentiellement changer en fonction des choix du metteur en scène, ou bien du comportement des autres robots : par exemple, si un robot tombe en panne en face d'un autre, un changement de trajectoire doit être opéré (ou bien le robot doit s'arrêter).

Un des problèmes principaux est le contrôle en vitesse des robots : il faut à partir d'une trajectoire décrivant une position, calculer la dérivée dans les deux ou trois directions pour l'envoyer aux robots.

3. MODÈLE

3.1. Conception

Les objectifs pour l'intégration des notions spatiales dans i-score sont :

- Une intégration avec l'écosystème existant.
- Support de l'animation : Une description fine des évolutions dans le temps (ou en fonction d'autres paramètres).
- La possibilité d'écrire des scènes 2D, 3D basiques potentiellement en utilisant des guides (sources cartographiques, images).

- Des performances le plus proche possible du temps réel.

3.1.1. Modèles pour l'écriture spatiale

Plusieurs modèles ont été envisagés pour écrire des scénarios spatiaux.

Une première possibilité repose sur les méthodes de description qualitative de l'espace, telles que RCC-8[11]. Elles consistent en l'extension des relations de Allen[2], à plus d'une dimension. Cependant de telles méthodes ne s'avèrent pas efficaces si on désire décrire des dispositions précises, avec des métriques sur les objets que l'on veut manipuler. Par exemple, on peut à l'aide de méthodes qualitatives écrire "A est à l'extérieur de B et lui est tangent, et A et B sont contenus dans C". Mais les pratiquent appellent plus souvent une écriture de la forme "A est un cercle de $1u$ centré en $(3, 3)$ dans une pièce de $5u$, et un pointeur B est situé en $(2, 3)$ " ou u est une unité de distance ; on peut par la suite obtenir les relations RCC à partir des distances métriques tandis que l'inverse n'est pas possible.

Une seconde possibilité est l'approche orientée objet[24] : on dispose d'une classe abstraite représentant une forme. Les classes dérivées implémentent des méthodes de dessin et de calcul optimisées pour des formes concrètes : sphère, cube, etc. L'avantage est la possibilité d'avoir des exécutions très rapides dans certains cas. Par exemple, calculer la distance entre deux cercles est trivial. En revanche, cette méthode manque doublement de flexibilité :

- Il est difficile de rajouter de nouveaux types de calcul, car il faut modifier tous les types pour rajouter le calcul (par exemple un calcul d'aire pour une zone).
- Si un calcul implique deux (ou plus) zones abstraites, on assiste à une explosion combinatoire lorsque l'on désire rajouter une nouvelle zone car le calcul doit alors être défini entre la nouvelle zone et toutes les zones pré-existantes.

Une troisième possibilité, numérique, et permettant un maximum de flexibilité, a été étudiée : on demande à l'utilisateur de remplir la fonction caractéristique d'une zone à l'aide d'un langage de programmation. Par la suite, on peut tester pour chaque point de l'espace son appartenance à la zone, en ayant la possibilité de faire des approximations. Cela permet notamment d'implémenter des objets spatiaux qui sont difficilement possibles à réaliser uniquement de manière mathématique, avec notamment des objets dont la définition contient des boucles ou des conditionnelles, voire des facteurs aléatoires. En revanche, on perd des possibilités d'analyse par la suite : on n'a en effet pas de forme générale des zones ainsi créées et on ne peut au mieux qu'effectuer des tests, coûteux en temps de calcul, entre zones. Il est cependant toujours possible de prendre un échantillon des points de la zone pour appliquer une méthode de maillage telles que la triangulation de Delaunay[20] qui produit un objet sur lequel on peut réaliser plusieurs opérations plus simplement. Les bibliothèques CGAL[5] et VTK[22] proposent toutes deux des

1. <http://metabot.fr/>

implémentations performantes de cette triangulation. Enfin, les performances ne sont pas adaptées à des évolutions rapides en temps réel ; cela peut marcher en dimension 1 et pour des fonctions avec un nombre relativement important de points à calculer, mais est lourd en ressources en dimension 2 et quasiment impensable en temps réel dimension 3.

Finalement, l'utilisation de modèles mathématiques dédiés est possible. En général, il s'agit des modèles paramétriques, ou géométriques. Les modèles géométriques sont notamment très utilisés dans le domaine de la conception assistée par ordinateur, tandis que les modèles paramétriques sous-tendent la plupart des outils de spatialisation musicale, notamment à l'aide des fonctions spline, ainsi que de nombreux outils pour l'animation et les images de synthèse.

3.1.2. Dimensions non spatiales

Une question qui se pose pour le choix du modèle est celle de l'interaction entre les zones et le temps. En effet, dans des logiciels comme IanniX, on dispose de courbes paramétrisées par des paramètres externes ou par une horloge. Cette approche permet d'avoir dans une seule vue toute l'information possible : on dessine la courbe pour un intervalle inclus dans l'ensemble de paramétrisation. Cependant, l'objectif des processus spatiaux est de posséder plus d'une dimension de paramétrisation. La question de l'affichage d'une variation au cours du temps se pose alors. On peut penser à afficher un dégradé qui serait complètement opaque pour une valeur de paramètre donné, et serait de plus en plus transparent lorsque l'on s'en éloigne ; un exemple d'affichage d'animation d'objet 3D au cours du temps est par exemple donné dans [6]. Il est aussi possible d'afficher uniquement la trajectoire du centre (ou d'un point donné) de l'objet au cours du temps, mais cela nécessite de pouvoir la calculer. Ce n'est pas dans le cas d'une zone définie avec des contraintes très faibles. Par exemple, pour un modèle géométrique, défini par $x < 0$, un demi-plan, on ne peut le définir.

Une autre possibilité est d'avoir des boîtes séparées pour définir les animations. Cela permet plus de clarté, et permet aussi d'associer une seule trajectoire à plusieurs objets plus facilement : la trajectoire va écrire sur l'adresse /trajectoire/position que les zones spatiales iront chercher à chaque tick d'horloge ; elles peuvent par la suite utiliser les coordonnées ainsi obtenues comme bon leur semble.

3.1.3. Espaces non cartésiens

Une considération importante est le support des objets définis autrement que dans le système de coordonnées cartésiennes. Le système le plus courant sera les coordonnées polaires, mais la question des espaces sur des types de paramètres autres a aussi été posée : par exemple, un travail sur des espaces colorimétriques demanderait aussi des outils adaptés car la conversion entre plusieurs de ces espaces, comme RVB et $L^*a^*b^*$ est souvent non-linéaire.

3.2. Processus spatiaux dans i-score

Nous choisissons d'utiliser plusieurs des modèles exposés précédemment. Le cœur de l'approche repose sur un modèle mixte, géométrique et orienté objet pour la définition de scènes spatiales, ainsi que sur des processus représentant des objets paramétriques, en raison de leur praticité pour l'écriture de trajectoires, très courantes dans les domaines d'application ciblés.

Il n'y a pas de focalisation directe sur le son : les processus opèrent toujours sur des données numériques quelconques.

3.2.1. Processus Espace

Dans le premier cas, on définit une classe abstraite de zone, qui contient une liste d'équations et d'inéquations. Ces équations et inéquations servent à contraindre la zone. Par exemple, on peut donner l'équation cartésienne d'un cercle, ou d'une parabole.

De là, il est possible d'offrir un comportement générique pour l'affichage et les relations entre plusieurs zones, mais il est aussi possible de spécialiser la classe de zone à des fins d'optimisations.

Ces zones sont contenues dans un processus Espace. Le processus Espace consiste en :

- Une liste de dimensions bornées.
- Une liste de zones.
- Une liste d'opérations entre zones.
- Une fenêtre (*viewport*).

Lorsque la définition d'une zone est donnée, on sépare en deux ses paramètres. Par exemple, dans le cas de l'équation d'un disque :

$$(x_v - x_0)^2 + (y_v - y_0)^2 \leq r^2 \quad (1)$$

On permet à l'utilisateur d'attribuer à chaque inconnue, x_v, y_v, x_0, y_0, r , soit une dimension, soit un paramètre. Les zones prédéfinies par héritage offrent une décomposition simple par défaut. Actuellement, seulement disque et pointeur sont offerts par défaut.

Le pointeur correspond à :

$$\begin{cases} x_v = x_0 \\ y_v = y_0 \end{cases} \quad (2)$$

Un paramètre peut être une constante, ou bien être un nœud de l'arbre des paramètres i-score et donc provenir d'une source externe : OSC, MIDI, etc. Cela permet l'interactivité : il est possible de mapper des capteurs externes à des positions, ou à n'importe quel autre paramètre. Il est aussi possible d'utiliser l'écoulement du temps à l'exécution pour faire de l'animation spatiale.

Enfin, on peut dans une certaine mesure définir des objets paramétriques :

$$\begin{cases} x_v = u \\ y_v = \sin(u) \end{cases} \quad (3)$$

avec u un paramètre externe, ce paramètre pouvant être le temps. Cependant dans un tel cas, le processus ne considère qu'un point à la fois car le fonctionnement est par contraintes. Une autre approche paramétrique plus adaptée aux besoins courants de l'écriture spatiale est décrite en section 4.1.2.

Ensuite, on peut définir des calculs de relations entre les différentes zones. Par exemple, il est possible d'obtenir l'information de collision entre zones. Pour le cas du pointeur on va simplement évaluer les valeurs actuelles des informations de dimension par rapport aux autres zones, ce qui est une opération très rapide. De même pour les zones de types connus : il est possible d'exhiber des calculs spécialisés pour chaque relation entre deux types de zones. Enfin, pour des cas impliquant une zone générique, non typée, nous pouvons chercher pour l'existence de solutions au système composé de l'ensemble de leurs équations. Ceci nécessite cependant un solveur capable de résoudre des systèmes d'inéquations. Un outil potentiel pour cette application est nlopt [14], qui permet de minimiser des systèmes non-linéaires.

Une autre approche pour les collisions est d'utiliser les méthodes issues du jeu vidéo, avec des notions de bounding box ou bounding sphere. Des moteurs physiques tels que Bullet ou Open Dynamics Engine[4] pourront par la suite être utilisés à cette fin.

Le résultat des calculs peut ensuite être exposée dans l'arbre i-score, puis être réutilisé par la suite pour concevoir d'autres zones, ou bien en tant que sortie appliquée à un autre logiciel ou matériel.

i-score étant un environnement ouvert, il est aussi possible de sortir des contraintes du langage mathématique pour les calculs. En effet, un processus Javascript est offert : il permet de réaliser des opérations complexes à chaque tick d'horloge. Il est alors possible de récupérer des informations d'un processus spatial, de les traiter en Javascript, puis de réutiliser leur résultat au tick suivant. Les automations sont utilisables de la même manière.

Dans ce viewport, on définit des zones par un ensemble d'équations. C'est donc une méthode analytique.

Comme cette opération est coûteuse, dans ce cas les zones n'évoluent pas en temps réel avec le changement des paramètres et s'affichent avec leur valeur par défaut.

4. IMPLÉMENTATION

Une tentative d'implémentation a été réalisée à l'aide du CAS **GiNaC** [3]. Cependant, cela ne s'est pas révélé être adapté : en effet la bibliothèque n'est pas thread-safe ce qui empêche de réaliser des calculs déportés sur un autre thread. L'implémentation actuelle est donc basée sur le parseur de fonctions mathématiques de la bibliothèque **vtk** [22]. D'autres alternatives ont été envisagées : Symbolic C++, Sage, GNU Octave.

4.1. Sémantique d'exécution

La sémantique générale d'exécution d'i-score est donnée dans [7]. Nous rappelons simplement qu'i-score permet d'ordonner temporellement des processus qui peuvent être définis dans des plug-ins. Lors de la lecture, une horloge globale va demander récursivement à tous les processus du scénario qui sont en cours d'exécution quel est leur état actuel. Un état est un ensemble de messages qui peuvent être envoyés par réseau, comme une cue.

4.1.1. Processus spatial

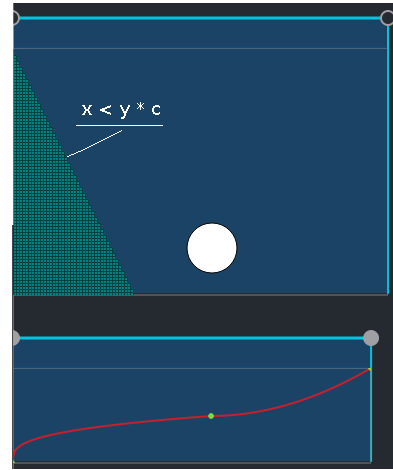


Figure 4. Processus spatial au début. La courbe d'automatisation est mappée au paramètre c de l'équation de la zone triangulaire.

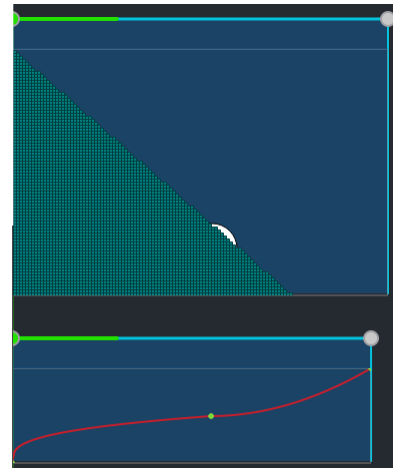


Figure 5. Processus spatial durant l'exécution. Il est possible de récupérer l'information de collision entre le disque et la zone pour déclencher des événements ailleurs dans i-score.

L'exécution du processus spatial se déroule de la manière suivante :

- Pour chaque zone dont un des paramètres est défini par une adresse externe, récupérer la valeur actuelle de cette adresse.

- Effectuer tous les calculs entre éléments de la zone puis les renvoyer dans l'état. Dans le cas d'un processus générique, ces calculs peuvent prendre du temps. Ainsi, un mécanisme de requête - réponse multi-threadé a été implémenté. Cela permet de ne pas bloquer toute l'exécution du programme ; en revanche le résultat de l'exécution sera potentiellement décalé de plusieurs ticks.

Ainsi, s'il y a rétroaction, elle se fait au tick d'après.

Une autre sémantique est possible : i-score dispose d'un arbre de paramètres interne qu'il est aussi possible de manipuler. Les processus peuvent exposer des paramètres de contrôle à cet arbre, qui sont disponibles à l'édition. i-score est donc introspectible depuis son interface graphique. Notamment, le processus spatial expose les valeurs des paramètres présents pour chacune des zones. Par exemple, pour un disque d'équation $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \leq r_0$ les paramètres x_0, y_0, r_0 sont exposés dans l'arbre interne. De même, les résultats des calculs définis sont exposés. Il est possible de configurer le processus pour que les calculs enregistrés soient réalisés à la réception d'un message sur le nœud correspondant, et mis à jour dans leurs nœuds respectifs.

La première sémantique permet d'avoir une visualisation à l'exécution, tandis que la seconde permet d'avoir une visualisation à l'édition, en permettant le maintien des contraintes décrites par l'auteur.

Cette question, qui est fondamentalement la différence entre un mode *push* et un mode *pull*, se pose aussi pour les autres objets d'i-score. Par exemple, le processus Animation contient une adresse à laquelle il écrit ses valeurs. Cependant, il est aussi possible de simplement laisser s'exécuter la courbe et de permettre à d'autres outils d'aller chercher l'information à son adresse dans l'arbre interne.

Cela pose la question, à plus long terme, d'un graphe de calculs si on désire avoir des rétroactions et des mappings complexes. Actuellement, il est possible de réaliser des calculs chaînés à la main, en créant des adresses spécifiques et en ordonnant les processus : l'exécution de ces calculs est globale. Mais par la suite, un modèle de calcul plus complet sera nécessaire pour rendre manifeste les liens qui peuvent exister entre différents processus.

4.1.2. Automations multi-dimensionnelles

Il y a plusieurs types d'automations dans i-score :

- Les automations à une dimension : une fonction de transfert du temps t vers un paramètre u : $f : t \in [0; 1] \rightarrow D(u)$ ou D est le domaine de définition tel que décrit dans
- Les mappings à une dimension : une fonction de transfert entre deux paramètres u, v : $f : D(u) \rightarrow D(v)$. Les automations et mapping à une dimension sont des fonctions définies par partie ; chaque partie peut être une fonction vide, un segment de droite, ou bien la fonction $f : x \rightarrow x^k$. Des fonctions supplémentaires peuvent être rajoutées par le biais de plug-ins.

- Les automations à plus d'une dimension : nous utilisons ici la bibliothèque **vtk** pour afficher et éditer une spline à l'écran.

Animation : la durée d'une boîte correspond à la durée d'une spline d'animation. Les splines sont paramétrées entre 0 et 1.

Ainsi, puisque les boîtes d'i-score ont une durée déterminée, cette durée est mappée directement à la valeur de la spline.

Il reste à choisir pour l'automation si on veut qu'elle envoie : - un tuple à une adresse donnée. - chaque composante sur une adresse distincte.

4.2. Rendu

L'affichage se fait de manière spécialisée pour les types connus. Pour les types génériques, on réalise pour l'instant une pixelisation à partir, en testant pour chaque point de la zone d'affichage.

Comme c'est une opération lourde, chaque zone de ce type effectue le rendu dans un thread séparé. Lorsqu'un calcul termine, les pixels calculés sont envoyés à la bibliothèque d'affichage.

C'est notamment important si on désire avoir un rendu fluide à l'exécution. Le nombre d'images par seconde sera potentiellement faible, mais il n'y aura pas de blocage de l'interface graphique pendant le rendu.

D'autres méthodes sont à étudier, par exemple à l'aide de bibliothèques spécialisées comme ROOT de CERN ou CGAL qui permet de faire de la triangulation de Delaunay d'une fonction donnée.

Mappings d'espaces de donnée ? Couleur, temps, etc.

4.3. Édition

L'édition va modifier pour les formes connues des paramètres définis.

Les opérations de base sont déplacement, translation, rotation.

On applique les transformations à l'objet :

- La translation est triviale.
- Rotation par un angle θ dans le plan :

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta - y \sin \theta \\ y' = x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases}$$

Une formule générale de la rotation en n-dimension est donnée dans [1].

- Mise à l'échelle : pas de formule générale ; on fait un rendu et on met à l'échelle par la suite ?

5. CONCLUSION

Perspectives : gestion d'espaces de données, comme couleurs, etc. Gestion des types à plus d'une dimension. Il est nécessaire d'avoir une notion de paramètre de plus haut niveau. Pour ce faire, il serait possible d'étudier l'applicabilité de protocoles orientés objet, tels que D-Bus ou ZeroC ICE, pour exposer les objets i-score.

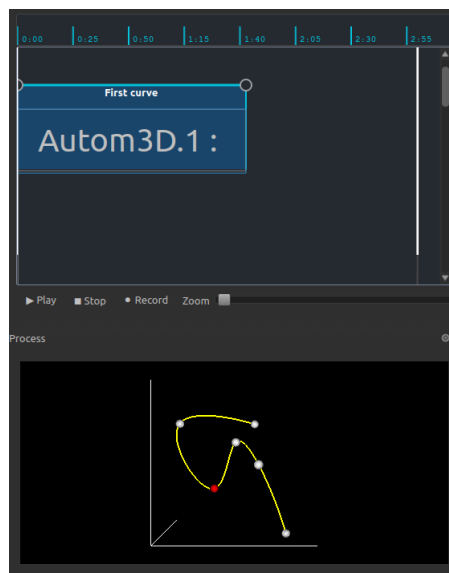


Figure 6. Une spline 3D dans i-score. On affiche la courbe dans le panneau inférieur

6. REMERCIEMENTS

ANR groupe metabots

7. REFERENCES

- [1] Antonio Aguilera and Ricardo Pérez-Aguila. General n-dimensional rotations. 2004.
- [2] James F Allen. Towards a general theory of action and time. 23(2) :123–154.
- [3] Christian Bauer, Alexander Frink, and Richard Kreckel. Introduction to the ginac framework for symbolic computation within the c++ programming language. *Journal of Symbolic Computation*, 33(1) :1–12, 2002.
- [4] Adrian Boeing and Thomas Bräunl. Evaluation of real-time physics simulation systems. In *Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia*, pages 281–288. ACM, 2007.
- [5] Jean-Daniel Boissonnat, Olivier Devillers, Monique Teillaud, and Mariette Yvinec. Triangulations in cgal. In *Proceedings of the sixteenth annual symposium on Computational geometry*, pages 11–18. ACM, 2000.
- [6] Dan Casas, Margara Tejera, J. Guillemaut, and Adrian Hilton. 4d parametric motion graphs for interactive animation. 19(5) :762–773.
- [7] Jean-Michaël Celerier, Blue Yeti, Pascal Baltazar, Clément Bossut, Nicolas Vuaille, Jean-Michel Couturier, and Myriam Desainte-Catherine. OSSIA : TOWARDS a UNIFIED INTERFACE FOR SCORING TIME AND INTERACTION.
- [8] M Olivier DELERUE. Spatialisation du son et programmation par contraintes : le système MusicSpace.
- [9] Emile Ellberger, Germán Toro Perez, Johannes Schuett, Giorgio Zoia, and Linda Cavaliero. Spatialization symbolic music notation at ICST.
- [10] Dominique Fober, Jean Bresson, Pierre Couprie, and Yann Geslin. Les nouveaux espaces de la notation musicale. In *Journées d'Informatique Musicale*.
- [11] Alfonso Gerevini and Bernhard Nebel. Qualitative spatio-temporal reasoning with RCC-8 and allen's interval calculus : Computational complexity. In *ECAI*, volume 2, pages 312–316.
- [12] Garin Hiebert. Openal 1.1 specification and reference. 00010.
- [13] Guillaume Jacquemin, Thierry Coduys, and Matthieu Ranc. Iannix 0.8. pages 107–15.
- [14] Steven G Johnson. The nlopt nonlinear-optimization package, 2014.
- [15] M Kaltenbranner, Sergi Jorda, Gunter Geiger, and Marcos Alonso. The reactable : A collaborative musical instrument. In *Enabling Technologies : Infrastructure for Collaborative Enterprises, 2006. WETICE'06. 15th IEEE International Workshops on*, pages 406–411. IEEE.
- [16] Mika Kuuskankare and Mikael Laurson. Expressive notation package. 30(4) :67–79.
- [17] Bertrand Merlier. *Vocabulaire de l'espace en musiques électroacoustiques*.
- [18] Bertrand Merlier. VOCABULAIRE DE L'ESPACE ET DE LA SPATIALISATION DES MUSIQUES ÉLECTROACOUSTIQUES : PRÉSENTATION, PROBLÉMATIQUE ET TAXINOMIE DE L'ESPACE. In *EMS : Electroacoustic Music Studies Network ?Beijing 2006*, page 247.
- [19] Luiz Naveda and Ivani Santana. ?topos ? toolkit for pure data : exploring the spatial features of dance gestures for interactive musical applications.
- [20] L Nonato, Rosane Minghim, MCF Oliveira, and Geovan Tavares. A novel approach for delaunay 3d reconstruction with a comparative analysis in the light of applications. In *Computer Graphics Forum*, volume 20, pages 161–174. Wiley Online Library, 2001.
- [21] Yuya Sasamoto, Michael Cohen, and Julian Villegas. Controlling spatial sound with table-top interface. In *Awareness Science and Technology and Ubi-Media Computing (iCAST-UMEDIA), 2013 International Joint Conference on*, pages 713–718. IEEE.
- [22] Will J Schroeder, Bill Lorensen, and Ken Martin. *The visualization toolkit*. Kitware, 2004.
- [23] James Sheridan, Gaurav Sood, Thomas Jacob, Henry Gardner, and Stephen Barrass. Soundstudio 4d : A VR interface for gestural composition of spatial soundscapes. In *ICAD*.
- [24] Paul S Strauss and Rikk Carey. An object-oriented 3d graphics toolkit. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, volume 26, pages 341–349. ACM, 1992.

- [25] Graham Wakefield and Wesley Smith. *Cosm : A toolkit for composing immersive audio-visual worlds of agency and autonomy*. Ann Arbor, MI : MPublishing, University of Michigan Library. 00007.