

État de l'art - spatial

5 novembre 2015

1 Introduction

Ce document vise à présenter un état de l'art des pratiques impliquant la manipulation de données spatiales dans un cadre artistique, interactif et muséographique.

Nous présentons notamment les besoins des concepteurs, ainsi que les diverses solutions qui peuvent y être apportées, que ce soit par la conception de logiciels dédiés ou bien par des modélisations formelles des notions d'espace.

- Délimitation du périmètre
- Définitions de l'espace dans les différentes pratiques ?
 - Lien très fort avec la VR et les mondes virtuels - jeux vidéos.
 - Audio spatialisé
 - Espace de données et manipulation de données multi-dimensionnelles
 - Muséographie
 - Big data ?
 - Reconnaissance d'images
 - Conception de spectacles / chorégraphie / etc

Beaucoup d'overlap.

Le problème qui nous intéresse principalement est celui de l'écriture. Cela implique des recherches sur les applications faisant usage d'écriture spatiale, des logiciels interagissant avec des données spatiales, des modèles aptes à représenter de telles données et des paradigmes d'interfaces utilisateur permettant de les modifier et de les retravailler.

2 Pratiques

Art : [Lod14]. L'espace dans une dimension collective. Exemple : Steve Eley, Licorne Rose et Invisible. Structure virtuelle apposée dans le monde réel et visible seulement à l'aide d'une application dédiée. Progression de la réalité virtuelle : la tendance est dans l'augmentation de la réalité par l'ajout d'objets qui extraient ou rendent des données (Manovich, 2005). "Spatial Art overlays and unites several spaces into one, making artistic use of time, movement and data or information in a space defined by growth in technological interaction, i.e., a data space."

Nous étudierons d'abord le cas de l'audio et de la spatialisation en audio (mettre historique).

2.1 Pratique appliquée à l'audio

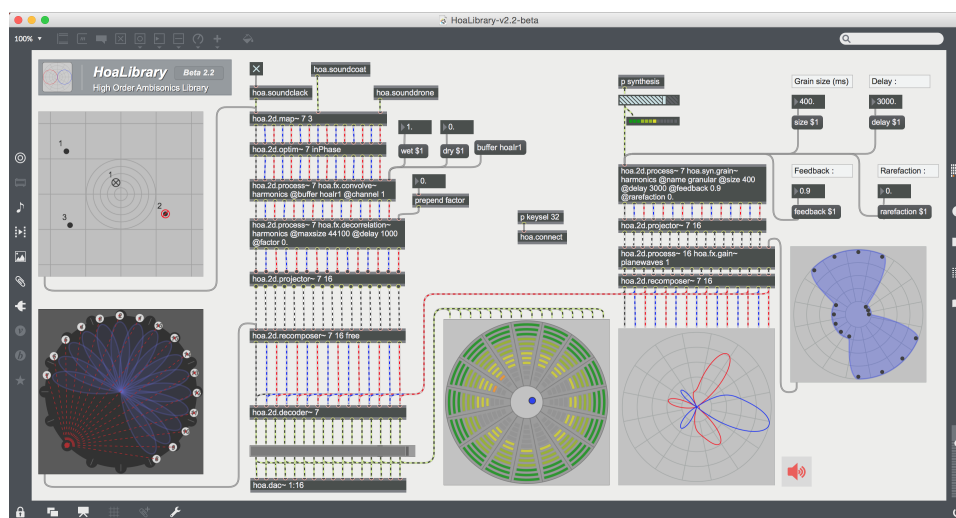


FIGURE 1 – La bibliothèque HOA.

Utilisation dans la musique, ainsi que dans des applications de réalité augmentée.

Problème principal dans cadre musical : couplage fort entre l'écriture et le moyen de restitution. Par exemple il est souvent nécessaire d'ajuster les paramètres de spatia-lisation quand on change l'endroit où se déroule une représentation. Par exemple, la bibliothèque HOA [CGPSB13] (fig. 1) permet l'encodage et le décodage ambisonique ou binaural. Elle fournit en même temps des outils permettant de modifier et travailler la position des sons dans l'espace, et qui peuvent donc être utilisés à fin d'écriture.

Nous étudions aussi le cas de l'audio dans un cadre de systèmes interactifs : ce sont des systèmes soit très statiques comme dans un audio-guide, soit très dynamiques mais avec une boucle d'exécution simple. Par exemple, il est possible d'apposer des couches audio dans un espace réel à l'aide de cartes pour faire des parcours[LL10].

2.1.1 Composition et écriture

Une présentation de l'état actuel de l'écriture spatiale en musique est donnée dans [FBCG15]. Notamment, la question de la notation dans le cadre de partitions impliquant des éléments spatiaux est abordé. Ces partitions peuvent être spatiales uniquement dans leur représentation, mais peuvent aussi indiquer des manières d'in-terpréter dans l'espace, notamment à l'aide de symboles spécialisés [EPSZC14]. Une taxinomie des possibilités de création dans l'espace en musiques électro-acoustiques est présentée par Bertrand Merlier dans [Mer06b]. Elle est étendue dans l'ouvrage *Vocabulaire de l'espace en musique électro-acoustique*[Mer06a].

Des outils logiciels existent pour ces partitions – ils sont souvent spécialisés. Par exemple, la bibliothèque Expressive Notation Package (ENP)[KL06] permet de concevoir des partitions graphiques telles qu'en fig. 2 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

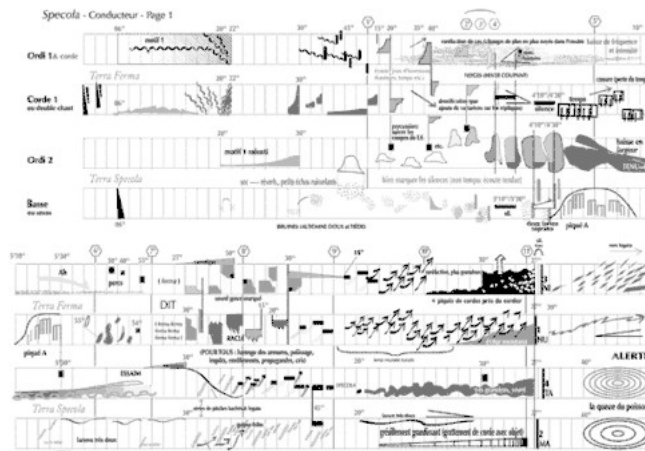


FIGURE 2 – *Specola* (LL de Mars) - une pièce acousmatique dont la partition est constituée de nombreux éléments graphiques spécialisés.

créer un son correspondant ? Ces questions sont abordées dans la description de Soundstudio 4D[SSJGB04], 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 du à la nécessité de composer en ayant conscience à chaque instant des fortes contraintes techniques du moyen de restitution de l'oeuvre. Il serait intéressant d'utiliser ces trajectoires pour contrôler non pas des sources sonores mais des éléments dans des espaces de paramètres quelconques.

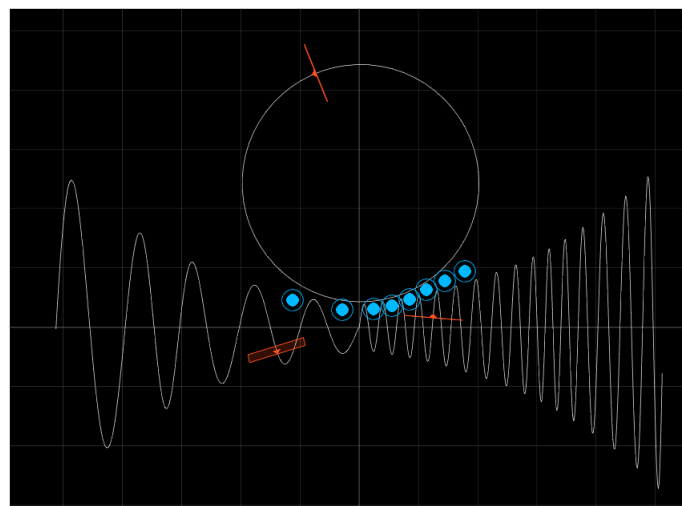


FIGURE 3 – Le logiciel IanniX.

Le logiciel IanniX[JCR12] (fig. 3) 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[DEL04]. 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 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[NS14], 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[KJGA06] et différentes approches dérivées qui peuvent être spécifiquement axées sur la spatialisation du son[SCV13].

2.1.2 Composition dans des environnements en 3D

Une approche particulière est celle de l'immersion dans un monde virtuel en trois-dimensions pour la composition de musique. Cette approche est présentée par Michael Wozniowski dans [Woz06]. Cela permet de définir et visualiser la propagation potentielle des ondes sonores dans un espace donné. De plus, en utilisant des méthodes de tracking de mouvement et des casques de réalité virtuelle, il est possible d'ouvrir de nombreuses possibilités d'interaction manuelle avec des objets virtuels. L'implémentation est faite en PureData.

D'autres possibilités d'utilisation d'environnement 3d à des fins d'écriture musicale sont suivies par Florent Berthaut avec le DRILE[BDH10]. Notamment, l'interaction spatiale est utilisée pour manipuler une hiérarchie plus aisément que via des interactions Windows, Icons, Menus and Pointing device (WIMP) traditionnelles.

Dans les deux cas, ce sont des approches orientées vers la manipulation d'objets.

2.1.3 Acoustique virtuelle

Il existe plusieurs méthodes pour simuler un environnement virtuel (comme par exemple dans un jeu vidéo) sur le plan acoustique, en tenant compte de la géométrie dans laquelle peut se trouver le joueur.

Les approches les plus simples utilisent simplement une atténuation linéaire entre la position du microphone virtuel, souvent appelé *listener*, et les sources sonores qu'il peut y avoir. C'était le cas notamment pour certaines implémentations d'OpenAL[Hie05]. Différents procédés, comme ceux proposés par la technologie

EAX[FTJ03], permettent d'ajouter une forme d'occlusion basique, ainsi que des effets de réverbération statique dans des endroits donnés pour enrichir l'impression d'espace. Des outils plus récents tels que FMOD et wWise s'intègrent notamment avec les moteurs de jeux pour pouvoir tirer parti directement des objets positionnés dans l'espace du moteur de jeu.

Cependant, il existe peu d'approches permettant d'être créatif par rapport aux possibilités qui sont offertes par l'outil informatique : notamment, les sources sont souvent ponctuelles alors que rien n'empêche de réfléchir à des sources planes ou volumétriques.

Le rendu se fait généralement à l'aide de méthodes de lancer de rayon, inspirées des procédés utilisés en images de synthèse [FCEPSW98 ; TG98]. Un procédé courant est maintenant d'utiliser les Graphics Processing Unit (GPU) pour effectuer des calculs lourds mais facilement parallélisables[Rod14 ; Che14 ; TCMLSM12]. Il est aussi possible de précalculer une fonction de convolution correspondant aux environnements virtuels que l'on veut parcourir, cependant cela demande des ressources en mémoire très importantes[RS14].

2.1.4 Restitution spatiale

Il existe de nombreuses méthodes pour effectuer un rendu de son spatial. Certaines s'intéressent au rendu d'une "scène" spatiale donnée le mieux possible à l'aide d'un certain nombre de hauts-parleurs, tandis que d'autres visent la simulation d'une acoustique virtuelle comme nous l'avons vu précédemment. Comme pour HOA, les outils de création sont souvent fortement associés au système de rendu. La bibliothèque 3Dj[Per15] pour Supercollider vise à séparer cela à l'aide d'une architecture modulaire séparant le mapping d'interface utilisateur, la gestion de scène spatiale, les comportements, les modèles physiques, l'export et le rendu via méthodes ambisoniques, HRTF[NMSH03], Vector Base Amplitude Panning (VBAP), Distance-Based Amplitude Panning (DBAP) et Wave-Field Synthesis (WFS). La communication entre la gestion de la scène et le rendu se fait via le format standardisé SpatDIF[PLS13] par OSC.

Une autre proposition d'architecture modulaire, par strates, est proposée par Nils Peters dans [PLSBBP09].

Les différentes méthodes de spatialisation citées sont comparées via la capacité des auditeurs à situer la présence d'une source sonore dans l'espace dans [BBFK07], et la précision de leur localisation.

L'intérêt de telles restitutions n'est pas seulement artistique : l'audio spatialisé peut être utilisé pour combler les déficiences visuelles, par exemple via un processus de sonification[TL14]. Cela implique notamment une phase de reconnaissance d'objets, puis une phase de mapping d'un espace visuel défini hiérarchiquement vers un espace de sons qui permettra à la personne malvoyante de reconnaître des objets inertes via le son qui leur sera associé.

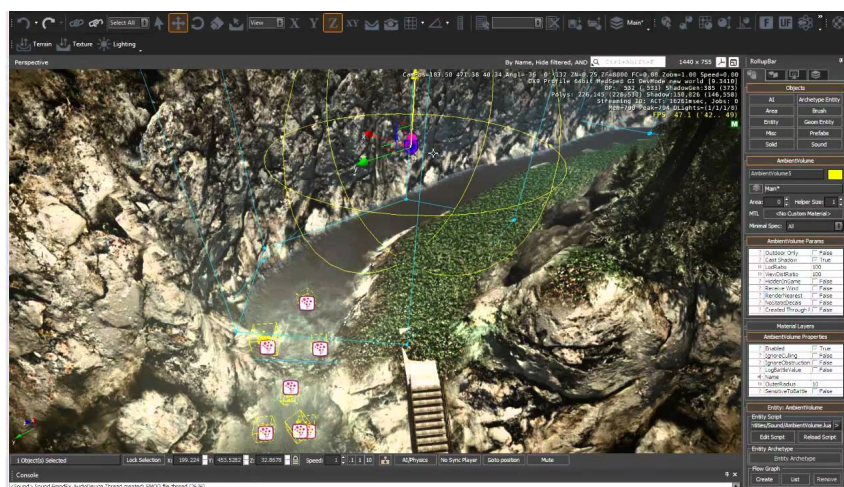


FIGURE 4 – Positionnement de sources sonores dans le CryEngine

2.2 Pratique liée à l'interaction

2.2.1 Jeu vidéo

La notion d'espace (et plus généralement, d'espace-temps) intervient à plusieurs échelles lors de la création de jeux vidéos. Elle est présente notamment à l'échelle du niveau de jeu, et décrit directement les interactions entre le personnage et son environnement, comme ce qu'il se passe lors d'une rencontre avec un ennemi ou un passage sur un objet bonus. Mais une notion plus large de narration spatio-temporelle va parfois sous-tendre le déroulement du jeu. Liliana Salazar décrit dans sa thèse [Sal04] différents modèles qui peuvent servir à décrire formellement un jeu vidéo ; notamment des modèles basés sur les réseaux de Petri pour décrire les niveaux d'un jeu. Cela permet d'appréhender la complexité de telles œuvres : les jeux vidéos mêlent logique, temporalité, et spatialité.

Cécile le Prado s'intéresse plus particulièrement au lien entre les espaces visuels et sonores dans les jeux vidéos[Le 13] par le biais de la cartographie.

Enfin, les moteurs de jeux généralistes tels que Unreal Engine, Unity, Unigine, Cry Engine, ont généralement des outils rudimentaires pour le positionnement du son (fig. 4). Mais du fait de leur extensibilité, il existe une grande quantité d'outils implémentant divers algorithmes de spatialisation, comme par exemple 3Dception¹ (fig. 5) ou IOSONO Proximity². Cependant, il convient de noter que la partie qui est la plus travaillée durant la conception d'un jeu est généralement la partie graphique, et que le son spatialisé, malgré tout ce qu'il peut apporter, est traité comme un citoyen de seconde zone.

De plus, dans de nombreux cas il n'y a que peu de travail sonore nécessaire : l'idée est de recréer un environnement réaliste, ce qui ne permet pas une marge de créativité énorme, mais demande plutôt des algorithmes précis.

1. http://www.twobigears.com/3dception_unity.php

2. <http://www.iosono-sound.com/game-audio>

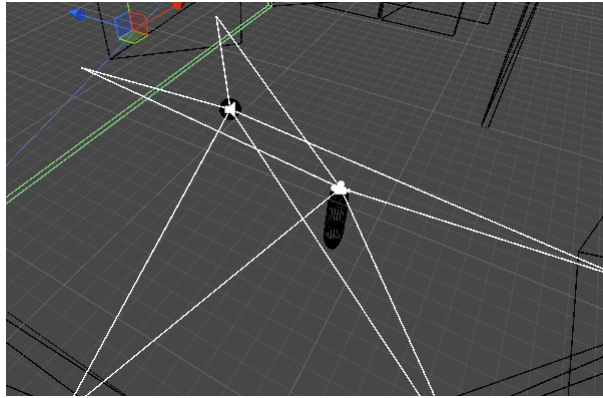


FIGURE 5 – Réflexion du son dans 3Dception.

2.2.2 Interaction

La majorité des outils que nous avons vu jusqu'à présent sont des outils de création qui fonctionnent peu ou prou avec le paradigme d'interface WIMP, modulo des spécificités pour la création de jeux ou d'univers en 3D par exemple. Cette partie présente plus en avant les possibilités d'interaction qu'il peut exister dans le domaine spatial.

Nous distinguons deux aspects : la conception de contenu spatial est par essence une activité interactive que nous désirons étudier. Mais dans certains cas, on désire concevoir des applications offrant une part d'interactivité à l'utilisateur final, comme cela est le cas dans les bornes interactives par exemple. L'interaction étant souvent gestuelle, un modèle spécifique d'espace géré en temps réel mais conçu à l'avance devient alors nécessaire. Ces deux aspects sont donc liés : une des thématiques qui nous intéresse est la conception d'outils de conceptions, notamment d'interaction. Il serait possible de parler de méta-conception.

Un état de l'art très complet pour l'interaction homme-machine dans un cadre de réalité mixte est présenté dans la thèse de René Chalon [Cha04]. Outre une description des différents périphériques d'entrée-sortie disponibles à l'époque, sont présentés différents modèles adaptés à la gestion de l'interaction dans la conception d'une application en réalité mixte. Notamment, le modèle IRVO est introduit, et permet la séparation entre les objets réels, manipulés par l'utilisateur dans le monde physique, et ceux, virtuels qui sont uniquement présents dans la machine et représentés par projection. Une grande complexité réside dans l'interaction entre les deux espaces que sont le monde réel et virtuel, et le mapping d'informations de l'un à l'autre. Ces questions ont notamment été étudiées par Michel Beaudouin-Lafont avec la théorie de l'interaction instrumentale.

Un second état de l'art, plus récent et axé spécifiquement sur l'interaction qu'il peut y avoir avec les environnements 3D est présenté dans [JH15]. Les méthodes d'interaction sont séparées entre celles qui ciblent la navigation dans un espace 3D, celles qui visent la sélection et manipulation de données, et celles qui permettent le contrôle des systèmes intermédiaires dans un environnement axé sur la 3D.

Notamment, il existe des interfaces extrêmement spécifiques, qui peuvent souvent être utilisées à but artistique. Par exemple, le système BlowBrush[SL14] utilise un moulin à vent interactif pour peindre des feuilles sur un canvas virtuel.

Enfin, le développement des interfaces imaginaires[GBB10], qui superposent des informations virtuelles au monde réel sans pour autant avoir de forme visible, ouvre de nouvelles possibilités en terme de conception spatiale, car il devient possible de tricher quant à la localisation réelle des objets : dans le jeu de basketball imaginaire présenté, la position de la balle est par exemple régie par un système probabiliste et l'interaction se fait via le son.

2.2.3 Muséographie

- Création de partition à partir d'information de couleur d'une image en 2D. Zones et progressions. [AK12]
- Comparaison d'installations interactives dans les musées : ce n'est pas parce qu'il y a un grand nombre de degrés de liberté en entrée ni que le contenu est en 3 dimensions que des enfants prennent du plaisir et ont envie de revenir participer à l'installation. [MPCZHC10]
- Utilisation du son pour enrichir les visites des musées, en permettant la création de paysages sonores. [Azo14]
- Place de l'interaction multitouch dans musées. [KNL11]
- Conception de prévisualisations [JWJBF10]

2.2.4 Robots

- Utilisation de robots lors d'une chorégraphie. Positionnements des jointures organisées hiérarchiquement dans l'espace. Souvent, nécessité de rendu dans un environnement virtuel. [LKH13] Puis, outil de conception complet de robot dans [LKKH14] à l'aide de moteurs virtuels modélisés en 3D et d'un calculateur de couple. Estimation de vitesse du robot à l'aide de motion capture sur 25 degrés de liberté appliquée à un robot réel.
- Génération de pas de dance pour un robot à partir de musique. [SYKK13]

3 Manipulation et écriture

Jacob Beal présente dans [BV15] les possibilités de gestion de l'espace-temps dans des applications à l'aide d'appareils connectés. Ces objets, comme les smartphones et smartwatches, étaient auparavant simplement connectés à un réseau, mais ont maintenant des informations de localisation et position, ainsi que de nombreux autres capteurs très précises avec lesquelles il est possible de concevoir des applications opérant sur de larges échelles géographiques. L'approche utilisée est de traiter l'ensemble des appareils connectés comme un champ, et de programmer des applications en utilisant les lois physiques qui régissent ces champs.

3.1 Extraction de données

- Présente 26 features qui peuvent être extraites de tableaux et qui permettent de mesurer les qualités esthétiques, puis de gérer des classifications. Basé sur questionnaire sur 42 participants et 100 tableaux. [LC09] (cf. slide 26). Exemple : clarté moyenne logarithmique, forme des segments.

3.2 Trajectoires et animation

- Rhonda³, utilisé dans Sonic Wire Sculptor et Ink Space (cf. openframeworks). Détaillé dans [Ras13].

- En animation : keyframes, et rotoscoping. Problématique principale : lier l'espace et le temps. Dans les outils existants, le contrôle du flot du temps est séparé de la création / peinture / etc. Utilisation d'un crayon pour contrôler le temps via les trajectoires. [SCBS13]

- Autre possibilité : textures kinétiques : les textures contiennent une information de déplacement. Plusieurs formes de textures : textures émettrices qui génèrent des objets, et textures oscillantes. Utilisation d'un graphe relationnel pour définir les interactions qu'il peut y avoir entre les différentes entités. [KCGF14]

- Description de comportements physiques via dessin[SD13]. Fonctionne en 2D. [GC15 ; GBC15]

- Modèle d'espace en 3d dans Max/MSP. 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. Représentation de champs pouvant varier dans le temps et pouvant être sonifiés. [WS11]

- Zirkonium : éditeur pour spatialisation. Utilisation de courbes de Bézier. [WBDO14]

- Système de spatialisation WFS par réalité augmentée. Contient une liste des interactions possibles : disposition spatiale des sources, effets audio, simulation de pièce... Discussion sur la visualisation de sources sonores, [MLV05]

- Utilisation de OpenMusic pour composition visuelle de la spatialisation. Scènes spatiales sont représentées par matrices source - paramètres de spat. Trajectoires en coordonnées cartésiennes, et time-tag. Utilisation des données spatiales directement au moment de la synthèse. [Bre12]

- bibliothèque de spatialisation en C++, permettant la traduction entre différents formats de données spatiales audio. [WQS12]

- conception de trajectoires à l'aide de dispositifs mobiles multitouch. Étude avec plusieurs compositeurs, qui ont chacun utilisé le logiciel à leur manière et discuté cette utilisation. [FGB15]

- Graphe de motion : représentation de l'évolution d'une animation au cours du temps en temps réel. Méthode utilisée : fusion de maillages, permettant des transitions entre différentes animations suite à motion capture. [CTGH13]

3.2.1 Manipulation virtuelle

- État de l'art sur l'édition de courbes 3D en séparant en deux axes : le dispositif physique (entrée - sortie) et le langage d'interaction (création / édition de courbe, et manipulation de la caméra). [JBLFC14]

- Manipulation de courbes 3D en s'aidant des ombres. [CMZHB99]

3.2.2 Manipulation réelle

- Manipulation tangible de courbes à l'aide d'un périphérique spécifique, ShapeTape, qui est déformable et permet d'obtenir informatiquement sa torsion en 32

3. <http://rhondaforever.com/>

points pour reconstruire la courbe de manière virtuelle en 3D : [GBS03]

3.3 Autres approches

- Génération d'espace à partir de description textuelle. [And12]
- Conception de mappings en trois dimensions dans Max/MSP. Mappings de régions de l'espace via interpolation : le mapping a lieu entre N dimensions de contrôle et M dimensions sonores. [VW06]
- Zones ? logiciels de 3d paramétrique, etc.

4 Modélisation

- Généralement : représentations quantitatives (x, y, z) ou qualitatives (via logique). [PLV08]
- Construction d'une ontologie du raisonnement spatio-temporel basé sur la notion de réalité. Séparation entre événements *continuant*s et *occurent*s. Ces composants de l'ontologie générale présentée servent de point de vue sur la réalité et peut ou non interagir avec les autres. La persistance des continnants se fait par l'existence de parties temporelles successives ; le temps est une dimension de spécification des *occurent*s mais pas des *continuant*s. [Gre03]
- possibilités probabilistes
- Modèle d'automates spatio-temporels adaptés à la gestion de systèmes de transports [ZMC14]
- Modèle d'espace pour l'interaction en réalité virtuelle. Apporte les notions de moyen, d'aura, d'awareness.. [BF93]
- Modélisation fonctionnelle des animations via un DSL dédié en haskell. Prédéfini : toute animation a un début, un milieu et une fin. Combinaison d'animations. [MG11]

4.1 Modèles de données

- Ontologie pour le web. Application aux Geographic Information Service (GIS). - OWL : [Mef13].
- X3DOM : langage déclaratif intégré au DOM HTML/CSS [JRSJBS13]. Par opposition à WebGL qui est impératif.
- Adaptés à l'audio . SpatDIF et compagnie [PLS13][KPGTB08] . [Kim14]
- Généralistes - Programmation fonctionnelle réactive ; là aussi, un DSL dédié en Haskell qui utilise les Arrow. [HCNP03]
- Approches langage : (pour reconnaissance : [Spr11][SS12],)
- Modèles qualitatifs : [CCLWOY15], [BW14], [Sch96 ; DM14]. Spatio-temporel : [Haz12]. [CD97].
- Trajectoires : via équations paramétriques.
- Voxels : [KCY93]
- Quadrees : [EGS08]

4.2 Problèmes géométriques et calculatoires

5 Rendu et visualisation

- Utilisation de drones portant des lumières pour faire des pixels dans l'espace.
[HGHLB12]

5.1 Sur écran

5.2 Autre

Références

- [AK12] Sara ADHITYA et Mika KUUSKANKARE. Composing graphic scores and sonifying visual music with the SUM tool. In *Proceedings of the 9th sound and music computing conference (SMC 2012). copenhagen, denmark*, 2012, pages 171–176. URL : <http://www.smcnetwork.org/system/files/smc2012-181.pdf> (visité le 12/04/2015).
- [And12] Tahiry ANDRIAMAROZAKANIAINA. Du texte à la génération d'environnements virtuels 3d : application à la scénographie théâtrale. Thèse de doctorat. Université Toulouse le Mirail-Toulouse II, 2012.
- [Azo14] Fatima-Zahra AZOUGH. Modèle et expériences pour la visite des musées en réalité augmentée sonore. Thèse de doctorat. Paris, CNAM, 2014. URL : <http://www.theses.fr/2014CNAM0926> (visité le 02/11/2015).
- [BBFK07] Enda BATES, Frank BOLAND, Dermot FURLONG et Gavin KEARNEY. A comparative study of the performance of spatialization techniques for a distributed audience in a concert hall environment. In *Audio engineering society conference : 31st international conference : new directions in high resolution audio*. 00013. Audio Engineering Society, 2007. URL : <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=13948> (visité le 24/06/2015).
- [BDH10] Florent BERTHAUT, Myriam DESAINTE-CATHERINE et Martin HACHET. Drile : an immersive environment for hierarchical live-looping. In *New interface for musical expression*, 2010, page–192. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00530071/> (visité le 04/11/2015).
- [BF93] Steve BENFORD et Lennart FAHLÉN. A spatial model of interaction in large virtual environments. In *Proceedings of the third european conference on computer-supported cooperative work 13–17 september 1993, milan, italy ECSCW'93*. Springer, 1993, pages 109–124.
- [Bre12] Jean BRESSON. Spatial structures programming for music. 2012) *co-located with AAMAS (w21)* :7, 2012. URL : <http://articles.ircam.fr/textes/Giavitto12c/index.pdf#page=17> (visité le 21/07/2015).
- [BV15] Jacob BEAL et Mirko VIROLI. Space-time programming. *Phil. trans. r. soc. a*, 373(2046) :20140220, 2015.

- [BW14] Mehul BHATT et Jan Oliver WALLGRÜN. Geospatial narratives and their spatio-temporal dynamics : commonsense reasoning for high-level analyses in geographic information systems. *ISPRS international journal of geo-information*, 3(1) :166–205, 2014. URL : <http://www.mdpi.com/2220-9964/3/1/166/htm> (visité le 02/11/2015).
- [CCLWOY15] Juan CHEN, Anthony G. COHN, Dayou LIU, Shengsheng WANG, Jihong OUYANG et Qiangyuan YU. A survey of qualitative spatial representations. *The knowledge engineering review*, 30(1) :106–136, 2015. URL : http://journals.cambridge.org/abstract_S0269888913000350 (visité le 21/07/2015).
- [CD97] Eliseo CLEMENTINI et Paolino DI FELICE. A global framework for qualitative shape description. *GeoInformatica*, 1(1) :11–27, 1997. URL : <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1009790715467> (visité le 02/11/2015).
- [CGPSB13] Julien COLAFRANCESCO, Pierre GUILLOT, Eliott PARIS, Anne S DES et Alain BONARDI. La bibliothèque hoa, bilan et perspectives. *Proc. of journées d’informatique musicale* :189–197, 2013. URL : http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/wp-content/uploads/2013/05/La_bibliotheque_hoa_bilan_perspectives_jim2013.pdf (visité le 22/07/2015).
- [Cha04] René CHALON. Réalité mixte et travail collaboratif : IRVO, un modèle de l’interaction homme-machine. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon, 2004.
- [Che14] Zuofu CHENG. Design of a real-time GPU accelerated acoustic simulation engine for interactive applications. 00000. Thèse de doctorat. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014.
- [CMZHB99] Jonathan M COHEN, Lee MARKOSIAN, Robert C ZELEZNIK, John F HUGHES et Ronen BARZEL. An interface for sketching 3d curves. In *Proceedings of the 1999 symposium on interactive 3d graphics*. ACM, 1999, pages 17–21.
- [CTGH13] Dan CASAS, Margara TEJERA, J. GUILLEMAUT et Adrian HILTON. 4d parametric motion graphs for interactive animation. *Visualization and computer graphics, IEEE transactions on*, 19(5) :762–773, 2013. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6365634 (visité le 22/07/2015).
- [DEL04] M Olivier DELERUE. Spatialisation du son et programmation par contraintes : le système MusicSpace. Thèse de doctorat. UNIVERSIT  PARIS 6, 2004.
- [DM14] Christopher H. DORR et Reinhard MORATZ. Qualitative shape representation based on the qualitative relative direction and distance calculus eOPRAm. *arXiv preprint arXiv:1412.6649*, 2014. URL : <http://arxiv.org/abs/1412.6649> (visité le 21/07/2015).

- [EGS08] David EPPSTEIN, Michael T GOODRICH et Jonathan Z SUN. Skip quad-trees : dynamic data structures for multidimensional point sets. *International journal of computational geometry & applications*, 18(1) :131–160, 2008.
- [EPSZC14] Emile ELLBERGER, Germán Toro PEREZ, Johannes SCHUETT, Giorgio ZOIA et Linda CAVALIERO. Spatialization symbolic music notation at ICST, 2014.
- [FBCG15] Dominique FOBER, Jean BRESSON, Pierre COUPRIE et Yann GESLIN. Les nouveaux espaces de la notation musicale. In *Journées d’informatique musicale*, 2015. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01160759/> (visité le 02/11/2015).
- [FCEPSW98] Thomas FUNKHOUSER, Ingrid CARLBOM, Gary ELKO, Gopal PINGALI, Mohan SONDHI et Jim WEST. A beam tracing approach to acoustic modeling for interactive virtual environments. In *Proceedings of the 25th annual conference on computer graphics and interactive techniques*. ACM, 1998, pages 21–32. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=280818> (visité le 12/04/2015).
- [FGB15] Xavier FAVORY, Jérémie GARCIA et Jean BRESSON. Trajectoires : une application mobile pour le contrôle et l’écriture de la spatialisation sonore, 2015. 00000. URL : <http://jeremiegarcia.fr/doc/traj-ihm15.pdf> (visité le 03/08/2015).
- [FTJ03] Thomas FUNKHOUSER, Nicolas TSINGOS et Jean-Marc JOT. Survey of methods for modeling sound propagation in interactive virtual environment systems, 2003.
- [GBB10] Sean GUSTAFSON, Daniel BIERWIRTH et Patrick BAUDISCH. Imaginary interfaces : spatial interaction with empty hands and without visual feedback. In *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on user interface software and technology*. ACM, 2010, pages 3–12.
- [GBC15] Jérémie GARCIA, Jean BRESSON et Thibaut CARPENTIER. Towards interactive authoring tools for composing spatialization. In *IEEE 10th symposium on 3d user interfaces*, 2015. URL : <http://hal.univ-savoie.fr/hal-01108709/document> (visité le 21/07/2015).
- [GBS03] Tovi GROSSMAN, Ravin BALAKRISHNAN et Karan SINGH. An interface for creating and manipulating curves using a high degree-of-freedom curve input device. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*. ACM, 2003, pages 185–192. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=642645> (visité le 22/07/2015).
- [GC15] GARCIA, JÉRÉMIE et CARPENTIER, THIBAUT. Processing, authoring and composing of spatial sounds (using spat and OpenMusic). Workshop on Interactivity in Music Composition and Performance. CIRMMT — McGill University, Montreal, mai 2015.

- [Gre03] Pierre GRENON. *The formal ontology of spatio-temporal reality and its formalization*. Amsterdam : AAAI Press, 2003. 27–34. URL : <http://www.aaai.org/Papers/Symposia/Spring/2003/SS-03-03/SS03-03-006.pdf> (visité le 03/11/2015).
- [Haz12] Shyamanta M. HAZARIKA, éditeur. *Qualitative spatio-temporal representation and reasoning : trends and future directions*. IGI Global, 2012. ISBN : 978-1-61692-868-1 978-1-61692-870-4. URL : <http://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/978-1-61692-868-1> (visité le 12/04/2015).
- [HCNP03] Paul HUDAK, Antony COURTNEY, Henrik NILSSON et John PETERSON. Arrows, robots, and functional reactive programming. In, *Advanced functional programming*, pages 159–187. Springer, 2003. URL : http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-540-44833-4_6.pdf (visité le 22/07/2015).
- [HGHLB12] Horst HÖRTNER, Matthew GARDINER, Roland HARING, Christopher LINDINGER et Florian BERGER. *Spaxels, pixels in space*, juin 2012. URL : http://www.researchgate.net/profile/Horst_Hoertner/publication/260823920_Spaxels_Pixels_in_Space_A_novel_mode_of_spatial_display/links/0f31753270c857a9d8000000.pdf (visité le 03/11/2015).
- [Hie05] Garin HIEBERT. *Openal 1.1 specification and reference*, 2005. 00010.
- [JBLFC14] Thibaut JACOB, Gilles BAILLY, Eric LECOLINET, Raphael FOULON et Etienne CORTEEL. A design space for three-dimensional curve edition. In. ACM Press, 2014, pages 105–112. ISBN : 9781450329354. DOI : 10.1145/2670444.2670454. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2670444.2670454> (visité le 22/07/2015).
- [JCR12] Guillaume JACQUEMIN, Thierry CODUYS et Matthieu RANC. Iannix 0.8. *Actes des journées d’informatique musicale (JIM 2012). mons (belgium)* :107–15, 2012. URL : http://jim.afim-asso.org/jim12/pdf/jim2012_18_p_jacquemin.pdf (visité le 04/11/2015).
- [JH15] Jacek JANKOWSKI et Martin HACHET. Advances in interaction with 3d environments. In *Computer graphics forum*. Tome 34. 00001. Wiley Online Library, 2015, pages 152–190. URL : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/cgf.12466/full> (visité le 24/06/2015).
- [JRSJBS13] Jacek JANKOWSKI, Sandy RESSLER, Kristian SONS, Yvonne JUNG, Johannes BEHR et Philipp SLUSALLEK. Declarative integration of interactive 3d graphics into the world-wide web : principles, current approaches, and research agenda. In *Proceedings of the 18th international conference on 3d web technology*. In Web3D ’13. ACM, New York, NY, USA, 2013, pages 39–45. ISBN : 978-1-4503-2133-4. DOI : 10.1145/2466533.2466547. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2466533.2466547>.

- [JWJBF10] Yvonne JUNG, Sebastian WAGNER, Christoph JUNG, Johannes BEHR et Dieter FELLNER. Storyboarding and pre-visualization with x3d. In *Proceedings of the 15th international conference on web 3d technology*. ACM, 2010, pages 73–82. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1836060> (visité le 04/11/2015).
- [KCGF14] Rubaiat Habib KAZI, Fanny CHEVALIER, Tovi GROSSMAN et George FITZMAURICE. Kitty : sketching dynamic and interactive illustrations. In *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on user interface software and technology*. ACM, 2014, pages 395–405. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2647375> (visité le 22/07/2015).
- [KCY93] Arie KAUFMAN, Daniel COHEN et Roni YAGEL. Volume graphics. *IEEE computer*, 26(7) :51–64, 1993.
- [Kim14] Chunggeun KIM. Object-based spatial audio : concept, advantages, and challenges. In Ahmet KONDOZ et Tasos DAGIUKLAS, éditeurs, *3d future internet media*, pages 79–84. Springer New York, 2014. ISBN : 978-1-4614-8372-4. URL : http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-8373-1_5.
- [KJGA06] M KALTENBRANNER, Sergi JORDA, Gunter GEIGER et Marcos ALONSO. The reactable : a collaborative musical instrument. In *Enabling technologies : infrastructure for collaborative enterprises, 2006. WETICE'06. 15th IEEE international workshops on*. IEEE, 2006, pages 406–411.
- [KL06] Mika KUUSKANKARE et Mikael LAURSON. Expressive notation package. *Computer music journal*, 30(4) :67–79, 2006.
- [KNL11] Jenny KIDD, Irida NTALLA et William LYONS. Multi-touch interfaces in museum spaces : reporting preliminary findings on the nature of interaction. *Rethinking technology in museums : emerging experiences. university of limerick*, 2011. URL : <http://www.idc.ul.ie/techmuseums11/paper/paper1.pdf> (visité le 02/11/2015).
- [KPGTB08] Gary S. KENDALL, Nils PETERS, Matthias GEIER, Deutsche TELEKOM et G. BERLIN. Towards an interchange format for spatial audio scenes. In *Proceedings of the international computer music conference*, 2008, pages 295–296. URL : http://www.int.uni-rostock.de/fileadmin/user_upload/publications/st/mgeier/kendall2008interchange_format.pdf (visité le 22/07/2015).
- [LC09] Congcong LI et Tsuhan CHEN. Aesthetic visual quality assessment of paintings. *Selected topics in signal processing, IEEE journal of*, 3(2) :236–252, 2009.
- [Le 13] Cécile LE PRADO. Ecriture sonore : entre déterminisme, émergence et interactivité. Thèse de doctorat. Paris, CNAM, 2013.
- [LKH13] Dongwook LEE, Jinsul KIM et Minsoo HAHN. Visualization and authoring system for robot based performing art, 2013. URL : http://onlinepresent.org/proceedings/vol42_2013/10.pdf (visité le 04/11/2015).

- [LKKH14] Dongwook LEE, Jinsul KIM, Ilmin KIM et Minsoo HAHN. Virtual assembly system for robot actor in performing art. *International journal of software engineering & its applications*, 8(6), 2014. URL : http://www.sersc.org/journals/IJSEIA/vol8_no6_2014/26.pdf (visité le 12/04/2015).
- [LL10] Jacques LEMORDANT et Yohan LASORSA. Augmented reality audio editing. In *Audio engineering society convention 128*. Audio Engineering Society, 2010. URL : <http://www.aes.org/e-lib/online/browse.cfm?elib=15439> (visité le 12/04/2015).
- [Lod14] Simona LODI. Spatial narratives in art. In, *Augmented reality art*, pages 277–294. Springer, 2014.
- [Mef13] Wafa MEFTEH. Approche ontologique pour la modélisation et le raisonnement sur les trajectoires : prise en compte des aspects thématiques, temporels et spatiaux. Thèse de doctorat. La Rochelle, 2013.
- [Mer06a] Bertrand MERLIER. *Vocabulaire de l'espace en musiques électroacoustiques*, 2006.
- [Mer06b] 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*, 2006, page 247. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00521322/> (visité le 03/11/2015).
- [MG11] Kevin MATLAGE et Andy GILL. Every animation should have a beginning, a middle, and an end. In, *Trends in functional programming*, pages 150–165. Springer, 2011. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-22941-1_10 (visité le 02/11/2015).
- [MLV05] F. MELCHIOR, T. LAUBACH et D. de VRIES. Authoring and user interaction for the production of wave field synthesis content in an augmented reality system. In. IEEE, 2005, pages 48–51. ISBN : 978-0-7695-2459-7. DOI : 10.1109/ISMAR.2005.20. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1544662> (visité le 02/11/2015).
- [MPCZHC10] Despina MICHAEL, Nectarios PELEKANOS, Isabelle CHRYSANTHOU, Panagiotis ZAHARIAS, Loukia L. HADJIGAVRIEL et Yiorgos CHRYSANTHOU. Comparative study of interactive systems in a museum. In, *Digital heritage*, pages 250–261. Springer, 2010. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-16873-4_19 (visité le 12/04/2015).
- [NMSH03] Markus NOISTERNIG, Thomas MUSIL, Alois SONTACCHI et Robert HÖLDRICH. 3d binaural sound reproduction using a virtual ambisonic approach. In *Virtual environments, human-computer interfaces and measurement systems, 2003. VECIMS'03. 2003 IEEE international symposium on*. IEEE, 2003, pages 174–178.

- [NS14] Luiz NAVEDA et Ivani SANTANA. “topos” toolkit for pure data : exploring the spatial features of dance gestures for interactive musical applications, 2014. URL : http://www.researchgate.net/profile/Luiz_Naveda2/publication/266141223_Topos_toolkit_for_Pure_Data_exploring_the_spatial_features_of_dance_gestures_for_interactive_musical_applications/links/5426ca440cf2e4ce940a1916.pdf (visité le 21/07/2015).
- [Per15] Andres PEREZ-LOPEZ. 3dj - supercollider framework for live sound spatialization. Linux Audio Conference, 2015.
- [PLS13] Nils PETERS, Trond LOSSIUS et Jan C. SCHACHER. The spatial sound description interchange format : principles, specification, and examples. *Computer music journal*, 37(1) :11–22, 2013. URL : http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/COMJ_a_00167 (visité le 12/04/2015).
- [PLSBBP09] Nils PETERS, Trond LOSSIUS, Jan SCHACHER, Pascal BALTAZAR, Charles BASCOU et Timothy PLACE. A stratified approach for sound spatialization. In *Proceedings of 6th sound and music computing conference*, 2009, pages 219–224. URL : <http://spatdif.org/papers/Spatialization-SMC09.pdf> (visité le 04/11/2015).
- [PLV08] Bruce PORTER, Vladimir LIFSCHITZ et Frank VAN HARMELLEN, éditeurs. Handbook of knowledge representation. 1st ed édition. In *Foundations of artificial intelligence*. Elsevier, Amsterdam ; Boston, 1st ed édition, 2008. 1005 pages. ISBN : 9780444522115 0444522115.
- [Ras13] Joakim RASMUSON. Flying colors : toward more natural and intuitive 3d modeling, 2013. URL : <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:837642> (visité le 04/11/2015).
- [Rod14] Jose Antonio Belloch RODRIGUEZ. Performance improvement of multichannel audio by graphics processing units, 2014. URL : <http://hgpu.org/?p=12916> (visité le 12/04/2015).
- [RS14] Nikunj RAGHUVANSHI et John SNYDER. Parametric wave field coding for precomputed sound propagation. *ACM transactions on graphics*, 33(4) :1–11, 27 juillet 2014. ISSN : 07300301. DOI : 10.1145/2601097.2601184. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2601097.2601184> (visité le 12/04/2015).
- [Sal04] Liliana SALAZAR. Modélisation et analyse spatiale et temporelle des jeux vidéo basées sur les réseaux de pétri. Thèse de doctorat. CNAM, 2004.
- [SCBS13] Stephanie SANTOSA, Fanny CHEVALIER, Ravin BALAKRISHNAN et Karan SINGH. Direct space-time trajectory control for visual media editing. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*. ACM, 2013, pages 1149–1158. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2466148> (visité le 22/07/2015).
- [Sch96] Christoph SCHLIEDER. Qualitative shape representation. *Geographic objects with indeterminate boundaries*, 2 :123–140, 1996.

- [SCV13] Yuya SASAMOTO, Michael COHEN et 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*. IEEE, 2013, pages 713–718.
- [SD13] Jeremy SCOTT et Randall DAVIS. Physink : sketching physical behavior. In. ACM Press, 2013, pages 9–10. ISBN : 9781450324069. DOI : 10.1145/2508468.2514930. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2508468.2514930> (visité le 21/07/2015).
- [SL14] Yang Ting SHEN et Pei Wen LU. BlowBrush : a design of tangible painting system using blowing action. In, *Distributed, ambient, and pervasive interactions*, pages 184–195. Springer, 2014.
- [Spr11] Michael SPRANGER. Recruitment, selection and alignment of spatial language strategies. In *Advances in artificial life, ECAL 2011 : proceedings of the eleventh european conference on the synthesis and simulation of living systems*, 2011. URL : <https://mitp-web2.mit.edu/sites/default/files/titles/alife/0262297140chap116.pdf> (visité le 03/11/2015).
- [SS12] Michael SPRANGER et Luc STEELS. Emergent functional grammar for space. *Experiments in cultural language evolution. amsterdam : john benjamins*. <http://dx.doi.org/10.1075/ais.3>, 2012. URL : <https://www.csl.sony.fr/downloads/papers/2012/spranger-12c.pdf> (visité le 03/11/2015).
- [SSJGB04] James SHERIDAN, Gaurav SOOD, Thomas JACOB, Henry GARDNER et Stephen BARRASS. Soundstudio 4d : a VR interface for gestural composition of spatial soundscapes. In *ICAD*, 2004.
- [SYKK13] Ju-Hwan SEO, Jeong-Yean YANG, JaeWoo KIM et Dong-Soo KWON. Autonomous humanoid robot dance generation system based on real-time music input. In *RO-MAN, 2013 IEEE*. IEEE, 2013, pages 204–209.
- [TCMLSM12] Micah TAYLOR, Anish CHANDAK, Qi Mo, Christian LAUTERBACH, Carl SCHISSLER et Dinesh MANOCHA. Guided multiview ray tracing for fast auralization. *Visualization and computer graphics, IEEE transactions on*, 18(11):1797–1810, 2012.
- [TG98] Nicolas TSINGOS et Jean-Dominique GASCUEL. Fast rendering of sound occlusion and diffraction effects for virtual acoustic environments. In *Audio engineering society convention 104*. Audio Engineering Society, 1998. URL : <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=8481> (visité le 21/07/2015).
- [TL14] Titus J. J. TANG et Wai Ho LI. An assistive EyeWear prototype that interactively converts 3d object locations into spatial audio. In. ACM Press, 2014, pages 119–126. ISBN : 9781450329699. DOI : 10.1145/2634317.2634318. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2634317.2634318> (visité le 12/04/2015).

- [VW06] Doug VAN NORT et Marcelo WANDERLEY. The LoM mapping toolbox for max/MSP/jitter. In *Proc. of the 2006 international computer music conference (ICMC)*, 2006, pages 397–400.
- [WBDO14] David WAGNER, Ludger BRÜMMER, Götz DIPPER et Jochen Arne OTTO. Introducing the zirkonium MK2 system for spatial composition, 2014. URL : <http://www.smc-conference.net/smc-icmc-2014/images/proceedings/OS16-B05-IntroducingtheZirkonium.pdf> (visité le 22/07/2015).
- [Woz06] Michael WOZNIEWSKI. A framework for interactive three-dimensional sound and spatial audio processing in a virtual environment. Thèse de doctorat. Citeseer, 2006.
- [WQS12] Mike WOZNIEWSKI, Alexandre QUESSY et Zack SETTEL. *SPATOSC : PROVIDING ABSTRACTION FOR THE AUTHORIZING OF INTERACTIVE SPATIAL SUDIO EXPERIENCES*. Ann Arbor, MI : MPublishing, University of Michigan Library, 2012.
- [WS11] Graham WAKEFIELD et Wesley SMITH. *Cosm : a toolkit for composing immersive audio-visual worlds of agency and autonomy*. Ann Arbor, MI : MPublishing, University of Michigan Library, 2011. URL : http://www.mat.ucsb.edu/~wakefield/pubs/11-WakefieldSmith_ICMC2011_Cosm.pdf (visité le 24/06/2015). 00007.
- [ZMC14] Yuanrui ZHANG, Frederic MALLETT et Yixiang CHEN. Timed automata semantics of spatial-temporal consistency language STeC. In. IEEE, septembre 2014, pages 201–208. ISBN : 978-1-4799-5029-4. DOI : 10.1109/TASE.2014.10. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6976589> (visité le 12/04/2015).