

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 : [49]. 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

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 spatialisation quand on change l'endroit où se déroule une représentation. Par exemple, la bibliothèque HOA [16] 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[47].

2.1.1 Composition et écriture

Une présentation de l'état actuel de l'écriture spatiale en musique est donnée dans [22]. 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'interpréter dans l'espace, notamment à l'aide de symboles spécialisés [19]. Une taxinomie des possibilités de création dans l'espace en musiques électro-acoustiques est présentée par Bertrand Merlier dans [54]. Elle est étendue dans l'ouvrage *Vocabulaire de l'espace en musique électro-acoustique*[53].

Des outils logiciels existent pour ces partitions – ils sont souvent spécialisés. Par exemple, la bibliothèque Expressive Notation Package (ENP)[43] permet de concevoir des partitions graphiques 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[72], 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.

Le logiciel IanniX[34] 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[17]. 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[56], 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.

2.1.2 Interaction spatiale pour création de son

,[67],

2.1.3 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 [81]. 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[7]. Notamment, l'interaction spatiale est utilisée pour manipuler une hiérarchie plus aisément que via des interactions WIMP traditionnelles.

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

2.1.4 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. Différents procédés, comme ceux proposés par la technologie EAX[23], 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 [24, 77]. Un procédé courant est maintenant d'utiliser les Graphics Processing Unit (GPU) pour effectuer des calculs lourds mais facilement parallélisables[64, 13, 76]. 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[62].

2.1.5 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[58] 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[57], Vector Base Amplitude Panning (VBAP), Distance-Based Amplitude Panning (DBAP) et Wave-Field Synthesis (WFS). Une autre proposition d'architecture modulaire, par strates, est proposée par Nils Peters dans [60].

La communication entre la gestion de la scène et le rendu se fait via le format standardisé SpatDIF[59] par OSC.

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 [4], 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[75]. 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.

2.2 Pratique liée à l'interaction

2.2.1 Jeu vidéo

[44] [65]

2.2.2 Systèmes interactifs

- Les objets qui étaient auparavant simplement connectés ont maintenant des infos de positions (téléphone, etc.) avec lesquelles il est possible de travailler ([5])
- Modèle d'interaction homme-machine pour la réalité augmentée, avec de nombreuses définitions : [11]
- État de l'art complet sur l'interaction avec environnements 3D. [35]
- Production de dessin à l'aide du souffle [71]
- Interfaces imaginaires : il existe un monde en 3D superposé au monde en 2D existant. [29]

2.2.3 Muséographie

- Création de partition à partir d'information de couleur d'une image en 2D. Zones et progressions. [1]
- 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. [55]
- Utilisation du son pour enrichir les visites des musées, en permettant la création de paysages sonores. [3]
- Place de l'interaction multitouch dans musées. [41]
- Conception de prévisualisations [37]

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. [45] Puis, outil de conception complet de robot dans [46] 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. [70]

3 Manipulation et écriture

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. [48] (cf. slide 26). Exemple : clarté moyenne logarithmique, forme des segments.

3.2 Trajectoires et animation

- Rhonda¹, utilisé dans Sonic Wire Sculptor et Ink Space (cf. openframeworks). Détaillé dans [63].
- 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. [66]
- 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. [39]
- Description de comportements physiques via dessin [69]. Fonctionne en 2D. [25, 26]
- 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. [80]
- Zirkonium : éditeur pour spatialisation. Utilisation de courbes de Bézier. [79]
- 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, [52]
- 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. [9]
- bibliothèque de spatialisation en C++, permettant la traduction entre différents formats de données spatiales audio. [82]

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

- 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. [21]

- 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. [10]

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). [33]

- Manipulation de courbes 3D en s'aidant des ombres. [15]

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 points pour reconstruire la courbe de manière virtuelle en 3D : [28]

3.3 Autres approches

- Génération d'espace à partir de description textuelle. [2]

- 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. [78]

- Zones ? logiciels de 3d paramétrique, etc.

4 Modélisation

- Généralement : représentations quantitatives (x, y, z) ou qualitatives (via logique). [61]

- 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 continuants se fait par l'existence de parties temporelles successives ; le temps est une dimension de spécification des occurrents mais pas des continuants. [27]

- possibilités probabilistes

- Modèle d'automates spatio-temporels adaptés à la gestion de systèmes de transports [83]

- Modèle d'espace pour l'interaction en réalité virtuelle. Apporte les notions de moyen, d'aura, d'awareness.. [6]

- Modélisation fonctionnelle des animations via un DSL dédié en haskell. Présumé : toute animation a un début, un milieu et une fin. Combinaison d'animations. [50]

4.1 Modèles de données

Ontologie pour le web. Application aux Geographic Information Service (GIS). - OWL : [51].

- X3DOM : langage déclaratif intégré au DOM HTML/CSS[36]. Par opposition à WebGL qui est impératif.
- Adaptés à l'audio . SpatDIF et compagnie [59][40] . [42]
- Généralistes - Programmation fonctionnelle réactive ; là aussi, un DSL dédié en Haskell qui utilise les Arrow. [32]
- Approches langage : (pour reconnaissance : [73][74],)
- Modèles qualitatifs : [12], [8], [68, 18]. Spatio-temporel : [30]. [14].
- Trajectoires : via équations paramétriques.
- Voxels : [38]
- Quadrees : [20]

4.2 Problèmes géométriques et calculatoires

5 Rendu et visualisation

- Utilisation de drones portant des lumières pour faire des pixels dans l'espace. [31]

5.1 Sur écran

5.2 Autre

Références

- [1] 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*, p. 171–176. URL : <http://www.smcnetwork.org/system/files/smc2012-181.pdf> (visité le 12/04/2015).
- [2] Tahiry ANDRIAMAROKANAINA. "Du texte à la génération d'environnements virtuels 3D : application à la scénographie théâtrale". Thèse de doct. Université Toulouse le Mirail-Toulouse II, 2012.
- [3] Fatima-Zahra AZOUGH. "Modèle et expériences pour la visite des musées en réalité augmentée sonore." Thèse de doct. Paris, CNAM, 2014. URL : <http://www.theses.fr/2014CNAM0926> (visité le 02/11/2015).
- [4] Enda BATES et al. "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).
- [5] Jacob BEAL et Mirko VIROLI. "Space-time programming". In : *Phil. Trans. R. Soc. A* 373.2046 (2015), p. 20140220.
- [6] 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, p. 109–124.

- [7] 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).
- [8] Mehul BHATT et Jan Oliver WALLGRÜN. “Geospatial narratives and their spatio-temporal dynamics : Commonsense reasoning for high-level analyses in geographic information systems”. In : *ISPRS International Journal of Geo-Information* 3.1 (2014), p. 166–205. URL : <http://www.mdpi.com/2220-9964/3/1/166/htm> (visité le 02/11/2015).
- [9] Jean BRESSON. “Spatial Structures Programming for Music”. In : *2012) colocated with AAMAS (W21)* (2012), p. 7. URL : <http://articles.ircam.fr/textes/Giavitto12c/index.pdf#page=17> (visité le 21/07/2015).
- [10] Dan CASAS et al. “4D Parametric Motion Graphs for Interactive Animation”. In : *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on* 19.5 (2013), p. 762–773. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6365634 (visité le 22/07/2015).
- [11] René CHALON. “Réalité mixte et travail collaboratif : IRVO, un modèle de l’interaction homme-machine”. Thèse de doct. Ecole Centrale de Lyon, 2004.
- [12] Juan CHEN et al. “A survey of qualitative spatial representations”. In : *The Knowledge Engineering Review* 30.1 (2015), p. 106–136. URL : http://journals.cambridge.org/abstract_S0269888913000350 (visité le 21/07/2015).
- [13] Zuofu CHENG. “Design of a real-time GPU accelerated acoustic simulation engine for interactive applications”. 00000. Thèse de doct. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014.
- [14] Eliseo CLEMENTINI et Paolino DI FELICE. “A global framework for qualitative shape description”. In : *GeoInformatica* 1.1 (1997), p. 11–27. URL : <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1009790715467> (visité le 02/11/2015).
- [15] Jonathan M COHEN et al. “An interface for sketching 3D curves”. In : *Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics*. ACM, 1999, p. 17–21.
- [16] Julien COLAFRANCESCO et al. “La bibliothèque Hoa, bilan et perspectives”. In : *Proc. Of Journées d’Informatique Musicale* (2013), p. 189–197. URL : http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/wp-content/uploads/2013/05/La_bibliotheque_hoa_bilan_perspectives_jim2013.pdf (visité le 22/07/2015).
- [17] M Olivier DELERUE. “Spatialisation du son et programmation par contraintes : le système MusicSpace”. Thèse de doct. UNIVERSITÉ PARIS 6, 2004.
- [18] Christopher H. DORR et Reinhard MORATZ. “Qualitative shape representation based on the qualitative relative direction and distance calculus eOPRAM”. In : *arXiv preprint arXiv:1412.6649* (2014). URL : <http://arxiv.org/abs/1412.6649> (visité le 21/07/2015).
- [19] Emile ELLBERGER et al. “Spatialization Symbolic Music Notation at ICST”. In : (2014).
- [20] David EPPSTEIN, Michael T GOODRICH et Jonathan Z SUN. “Skip quadrees : Dynamic data structures for multidimensional point sets”. In : *International Journal of Computational Geometry & Applications* 18.1 (2008), p. 131–160.

- [21] Xavier FAVORY, Jérémie GARCIA et Jean BRESSON. “Trajectoires : une application mobile pour le contrôle et l’écriture de la spatialisation sonore”. In : (2015). 00000. URL : <http://jeremiegarcia.fr/doc/traj-ihm15.pdf> (visité le 03/08/2015).
- [22] Dominique FÖBER et al. “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).
- [23] Thomas FUNKHOUSER, Nicolas TSINGOS et Jean-Marc JOT. “Survey of methods for modeling sound propagation in interactive virtual environment systems”. In : (2003).
- [24] Thomas FUNKHOUSER et al. “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, p. 21–32. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=280818> (visité le 12/04/2015).
- [25] 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.
- [26] 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).
- [27] 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).
- [28] 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, p. 185–192. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=642645> (visité le 22/07/2015).
- [29] 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, p. 3–12.
- [30] Shyamanta M. HAZARIKA, éd. *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).
- [31] Horst HÖRTNER et al. *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).
- [32] Paul HUDAK et al. “Arrows, robots, and functional reactive programming”. In : *Advanced Functional Programming*. Springer, 2003, p. 159–187. URL : http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-540-44833-4_6.pdf (visité le 22/07/2015).

- [33] Thibaut JACOB et al. "A design space for three-dimensional curve edition". In : ACM Press, 2014, p. 105–112. ISBN : 9781450329354. DOI : 10.1145/2670444.2670454. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2670444.2670454> (visité le 22/07/2015).
- [34] Guillaume JACQUEMIN, Thierry CODUYS et Matthieu RANC. "Iannix 0.8". In : *Actes des Journées d'Informatique Musicale (JIM 2012). Mons (Belgium)* (2012), p. 107–15. URL : http://jim.afim-asso.org/jim12/pdf/jim2012_18_p_jacquemin.pdf (visité le 04/11/2015).
- [35] Jacek JANKOWSKI et Martin HACHET. "Advances in Interaction with 3D Environments". In : *Computer Graphics Forum*. T. 34. 00001. Wiley Online Library, 2015, p. 152–190. URL : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/cgf.12466/full> (visité le 24/06/2015).
- [36] Jacek JANKOWSKI et al. "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. Web3D '13*. New York, NY, USA : ACM, 2013, p. 39–45. ISBN : 978-1-4503-2133-4. DOI : 10.1145/2466533.2466547. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2466533.2466547>.
- [37] Yvonne JUNG et al. "Storyboarding and pre-visualization with x3d". In : *Proceedings of the 15th International Conference on Web 3D Technology*. ACM, 2010, p. 73–82. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1836060> (visité le 04/11/2015).
- [38] Arie KAUFMAN, Daniel COHEN et Roni YAGEL. "Volume Graphics". In : *IEEE Computer* 26.7 (1993), p. 51–64.
- [39] Rubaiat Habib KAZI et al. "Kitty : Sketching dynamic and interactive illustrations". In : *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM, 2014, p. 395–405. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2647375> (visité le 22/07/2015).
- [40] Gary S. KENDALL et al. "Towards an interchange format for spatial audio scenes". In : *Proceedings of the International Computer Music Conference*. 2008, p. 295–296. URL : http://www.int.uni-rostock.de/fileadmin/user_upload/publications/st/mgeier/kendall12008interchange_format.pdf (visité le 22/07/2015).
- [41] Jenny KIDD, Irida NTALLA et William LYONS. "Multi-touch interfaces in museum spaces : reporting preliminary findings on the nature of interaction". In : *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).
- [42] Chung Eun KIM. "Object-Based Spatial Audio : Concept, Advantages, and Challenges". In : *3D Future Internet Media*. Sous la dir. d'Ahmet KONDOZ et Tasos DAGIUKLAS. Springer New York, 2014, p. 79–84. ISBN : 978-1-4614-8372-4. URL : http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-8373-1_5.
- [43] Mika KUUSKANKARE et Mikael LAURSON. "Expressive notation package". In : *Computer Music Journal* 30.4 (2006), p. 67–79.
- [44] Cécile LE PRADO. "Ecriture sonore : entre déterminisme, émergence et interactivité." Thèse de doct. Paris, CNAM, 2013.

- [45] Dongwook LEE, Jinsul KIM et Minsoo HAHN. "Visualization and Authoring System for Robot Based Performing Art". In : (2013). URL : http://onlinepresent.org/proceedings/vol42_2013/10.pdf (visité le 04/11/2015).
- [46] Dongwook LEE et al. "Virtual Assembly System for Robot Actor in Performing Art." In : *International Journal of Software Engineering & Its Applications* 8.6 (2014). URL : http://www.sersc.org/journals/IJSEIA/vol18_no6_2014/26.pdf (visité le 12/04/2015).
- [47] 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).
- [48] Congcong LI et Tsuhan CHEN. "Aesthetic visual quality assessment of paintings". In : *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of* 3.2 (2009), p. 236–252.
- [49] Simona LODI. "Spatial Narratives in Art". In : *Augmented Reality Art*. Springer, 2014, p. 277–294.
- [50] Kevin MATLAGE et Andy GILL. "Every animation should have a beginning, a middle, and an end". In : *Trends in Functional Programming*. Springer, 2011, p. 150–165. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-22941-1_10 (visité le 02/11/2015).
- [51] Wafa MEFTEH. "Approche ontologique pour la modélisation et le raisonnement sur les trajectoires : prise en compte des aspects thématiques, temporels et spatiaux". Thèse de doct. La Rochelle, 2013.
- [52] 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, p. 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).
- [53] Bertrand MERLIER. *Vocabulaire de l'espace en musiques électroacoustiques*. 2006.
- [54] 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, p. 247. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00521322/> (visité le 03/11/2015).
- [55] Despina MICHAEL et al. "Comparative study of interactive systems in a museum". In : *Digital Heritage*. Springer, 2010, p. 250–261. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-16873-4_19 (visité le 12/04/2015).
- [56] Luiz NAVEDA et Ivani SANTANA. "“Topos” toolkit for Pure Data : exploring the spatial features of dance gestures for interactive musical applications". In : (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/5426ca440cf2e4ce940.pdf (visité le 21/07/2015).
- [57] Markus NOISTERNIG et al. "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, p. 174–178.

- [58] Andres PEREZ-LOPEZ. “3Dj - Supercollider Framework for Live Sound Spatialization”. Linux Audio Conference, 2015.
- [59] Nils PETERS, Trond LOSSIUS et Jan C. SCHACHER. “The spatial sound description interchange format : Principles, specification, and examples”. In : *Computer Music Journal* 37.1 (2013), p. 11–22. URL : http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/COMJ_a_00167 (visité le 12/04/2015).
- [60] Nils PETERS et al. “A stratified approach for sound spatialization”. In : *Proceedings of 6th Sound and Music Computing Conference*. 2009, p. 219–224. URL : <http://spatdif.org/papers/Spatialization-SMC09.pdf> (visité le 04/11/2015).
- [61] Bruce PORTER, Vladimir LIFSCHITZ et Frank VAN HARMELEN, éd. *Handbook of knowledge representation*. 1st ed. Foundations of artificial intelligence. Amsterdam ; Boston : Elsevier, 2008. 1005 p. ISBN : 9780444522115 0444522115.
- [62] Nikunj RAGHUVANSHI et John SNYDER. “Parametric wave field coding for precomputed sound propagation”. In : *ACM Transactions on Graphics* 33.4 (27 juil. 2014), p. 1–11. ISSN : 07300301. DOI : 10.1145/2601097.2601184. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2601097.2601184> (visité le 12/04/2015).
- [63] Joakim RASMUSON. “Flying Colors : toward more natural and intuitive 3D modeling”. In : (2013). URL : <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:837642> (visité le 04/11/2015).
- [64] Jose Antonio Belloch RODRIGUEZ. “Performance Improvement of Multichannel Audio by Graphics Processing Units”. In : (2014). URL : <http://hgpu.org/?p=12916> (visité le 12/04/2015).
- [65] Liliana SALAZAR. “Modélisation et analyse spatiale et temporelle des jeux vidéo basées sur les réseaux de Pétri”. Thèse de doct. CNAM, 2004.
- [66] Stephanie SANTOSA et al. “Direct space-time trajectory control for visual media editing”. In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2013, p. 1149–1158. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2466148> (visité le 22/07/2015).
- [67] 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, p. 713–718.
- [68] Christoph SCHLIEDER. “Qualitative shape representation”. In : *Geographic objects with indeterminate boundaries 2* (1996), p. 123–140.
- [69] Jeremy SCOTT et Randall DAVIS. “Physink : sketching physical behavior”. In : ACM Press, 2013, p. 9–10. ISBN : 9781450324069. DOI : 10.1145/2508468.2514930. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2508468.2514930> (visité le 21/07/2015).
- [70] Ju-Hwan SEO et al. “Autonomous Humanoid Robot Dance Generation System based on real-time music input”. In : *RO-MAN, 2013 IEEE*. IEEE, 2013, p. 204–209.
- [71] Yang Ting SHEN et Pei Wen LU. “BlowBrush : A Design of Tangible Painting System Using Blowing Action”. In : *Distributed, Ambient, and Pervasive Interactions*. Springer, 2014, p. 184–195.
- [72] James SHERIDAN et al. “Soundstudio 4D : A VR Interface for Gestural Composition of Spatial Soundscapes.” In : *ICAD*. 2004.

- [73] 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).
- [74] Michael SPRANGER et Luc STEELS. “Emergent functional grammar for space”. In : *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).
- [75] 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, p. 119–126. ISBN : 9781450329699. DOI : 10.1145/2634317.2634318. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2634317.2634318> (visité le 12/04/2015).
- [76] Micah TAYLOR et al. “Guided multiview ray tracing for fast auralization”. In : *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on* 18.11 (2012), p. 1797–1810.
- [77] 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).
- [78] 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, p. 397–400.
- [79] David WAGNER et al. “Introducing the Zirkonium MK2 System for Spatial Composition”. In : (2014). URL : <http://www.smc-conference.net/smc-icmc-2014/images/proceedings/OS16-B05-IntroducingtheZirkonium.pdf> (visité le 22/07/2015).
- [80] Graham WAKEFIELD et Wesley SMITH. *Cosm : A toolkit for composing immersive audio-visual worlds of agency and autonomy*. 00007. 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).
- [81] Michael WOZNIEWSKI. “A framework for interactive three-dimensional sound and spatial audio processing in a virtual environment”. Thèse de doct. Citeseer, 2006.
- [82] Mike WOZNIEWSKI, Alexandre QUESSY et Zack SETTEL. *SPATOSC : PROVIDING ABSTRACTION FOR THE AUTHORING OF INTERACTIVE SPATIAL AUDIO EXPERIENCES*. Ann Arbor, MI : MPublishing, University of Michigan Library, 2012.
- [83] Yuanrui ZHANG, Frederic MALLET et Yixiang CHEN. “Timed Automata Semantics of Spatial-Temporal Consistency Language STeC”. In : IEEE, sept. 2014, p. 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).