



Studio Expérimental Entendre l'invisible

- Concevoir de nouveaux dispositifs de médiation
- Explorer de nouvelles formes de représentations multimodales
- Mieux faire comprendre des phénomènes physiques invisibles grâce à la spatialisation sonore audio-graphique interactive

Par **Roland Cahen** (Enseignant) : Compositeur électroacoustique, designer sonore, professeur artistique, chercheur, responsable du Studio Sonore de l'ENSCI les Ateliers.

et **Julien Bobroff** (Intervenant) : Physicien, Professeur à l'Université Paris-Sud (Orsay), laboratoire de Physique des Solides, responsable du groupe de recherche "La physique Autrement".

Participants et projets :

Annelise Légaré : Sur l'onde

Paul Couderc : Quantum Symphonia

Matéo Garcia : Entendre la forme d'onde

Antoine Goupille : les bruits du courant

Jean-Baptiste Demay : WANTED Schrödinger's cat (dead and alive)



Résumé

Traditionnellement, lorsqu'on souhaite expliquer des phénomènes abstraits par des animations, le son sert à indiquer et qualifier des événements saillants, alors que l'image permet de positionner les objets et de visualiser le mouvement. La spatialisation sonore est peu utilisée, même si il arrive que le son suive l'image grâce à la stéréo. La question que nous posons dans ce studio de création est la suivante :

Les sons spatialisés synchronisés dans l'espace et dans le temps à des images animées, peuvent-ils contribuer à renouveler, à préciser, à compléter la représentation des phénomènes tels que les ondes, l'électricité, la quantification, la dualité, le son, la lumière...Etc ?

Cette approche expérimentale vise un prototype muséographique grand public composé d'une barre de son octophonique, un écran de la même longueur, d'une interface de contrôle sur tablette tactile, d'un capteur type caméra vidéo ou kinect.

Abstract

Traditionally, when one wishes to explain abstract phenomena with animations, sound is only used to identify and precise salient events, while image is used to place objects and visualize their movement. Sound spatialization is not used, or only to lateralize objects in the stereo. The question we ask in this design studio is:

Can spatial sounds help to renew, clarify and complete the representation of phenomena such as waves, electricity, quantization, duality, sound or light?

This experimental approach focuses a large museum audience. Our experimental prototype is composed of an octophonic sound bar, a screen of the same width, a control interface on touch pad and a video camera.



Barre de son réalisée par **Denis Laville**

Projet pédagogique

Le Studio Expérimental consiste en un projet d'un semestre à raison de 2 demies journées de travail pour chaque étudiant. Les étudiants sont tenu d'avoir préalablement participé à la semaine intensive d'habilitation; une initiation au son et au design sonore. L'encadrement est assuré par le professeur et les experts qui assurent également les l'assistance techniques nécessaire.

Les phases de travail du Studio Expérimental se décomposent ainsi :

- Introduction au projet et brief du partenaire sur le sujet comportant un état de l'art.
- Exploration individuelle du sujet, recherche d'idées et de références
- Esquisses descriptives et sonores sur des sujets simplifiées, en parallèle avec l'acquisition et le développement des outils et méthodes de conception et de modélisation
- Proposition de sujets et séries d'échanges avec le professeur et le partenaire jusqu'au choix d'un sujet, puis au feu vert pour sa mise en œuvre
- Développement du projet individuel et approfondissement du sujet
- Maquettes expérimentales
- Rendu final
- Mise en forme et dissémination

Chaque élève travaille sur un sujet différent :

- l'électricité (conduction dans les métaux),
- sonification des composantes harmoniques d'un son complexe,
- dualité onde particule,
- non localité,
- intrication quantique,
- parcours avec un train d'onde dans un dispositif de fentes de young

Le groupe dans son ensemble conçoit un dispositif unique, relativement générique, permettant de présenter à un public non expert plusieurs sujets différents.

Résultats

Le dispositif comporte une barre de son octophonique, un ordinateur, un écran, une tablette tactile multitouch, une webcam, un micro.

Chaque sujet est abordé par la manipulation d'une représentation métaphorique, plus ou moins descriptive. Pour l'électricité par exemple, le visiteur peut modifier la tension, la température et le sens d'un courant dans un métal en manipulant des curseurs sur la tablette. Le son varie en conséquence : lorsque la résistance, i.e. la température augmente, les particules sonores rebondissent et mettent plus de temps à traverser le dispositif.

Nous pensons avoir montré qu'une telle forme de présentation peut proposer au public une expérience enrichie et une meilleure appréhension des phénomènes traités.

Difficultés rencontrées

Les élèves n'ayant au départ du projet aucune formation en physique ni en son ni en programmation sonore, le sujet s'est avéré trop technique et complexe pour les designers. Cette situation consécutive d'une sous évaluation des difficultés ainsi qu'au manque de respect des prérequis lors des entretiens d'orientation, a engendré des

difficultés et des frustrations chez les élèves, d'où deux élèves démissionnaires. Mais en travaillant ensemble avec les autres, grâce à leur engagement et à l'engagement actif des encadrants, nous avons néanmoins obtenu de bons résultats.

Travail restant à faire pour rendre opérationnel un tel dispositif

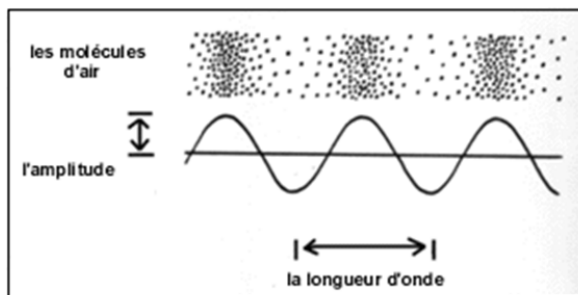
L'aboutissement du projet propose un premier démonstrateur fonctionnel, encore difficilement déplaçable. L'étape suivante serait d'en réaliser une version installable et déplaçable. Ce qui impliquerait de re-travailler sur l'objet : taille, forme matériaux, électronique compacte ou intégrée, programmation optimisée, interfaces utilisateurs coordonnées et finalisées.

Généralités sur les méthodes de représentations multimodales interactives de phénomènes physiques

La vulgarisation de phénomènes physiques invisibles : état de l'art

Comment représente-t-on habituellement la physique pour un public non scientifique ?

Les phénomènes physiques abordés dans ce studio sont habituellement représentés dans les lieux ou contextes de vulgarisation soit par des animations graphiques, soit par des expériences de physique. Par exemple les ondes sonores seront représentées par des courbes sinusoïdales et une représentation imagée des molécules de l'air ou bien par des expériences mettant en évidence une conséquence concrète du phénomène (par exemple via des flammes dans un tube de Ruben) :



Dans le cadre de phénomènes non seulement invisibles mais en plus à trop petite échelle comme les phénomènes quantiques, il n'y a plus que les représentations scientifiques, l'utilisation d'analogies ou la présentation d'applications pour expliquer les phénomènes au grand public.

Quelles sont les limites de ces représentations ?

Ces représentations sont efficaces pour un public ayant une certaine culture scientifique, sachant déchiffrer le vocabulaire graphique ici mis en place : axes, flèches, unités, ... Elles reprennent en effet souvent ces codes mis en place depuis des centaines d'années dans le champ de la science. Mais elles posent souvent des difficultés pour le public non "éduqué" d'abord pour des raisons de complexité. Mais aussi pour des raisons psychologiques liées au vécu du public : les codes graphiques renvoient en effet souvent au vécu scolaire du public. Si ce vécu a été malheureux dans les matières scientifiques, le public sera immédiatement réticent voir bloqué à toute tentative d'explication.

Comment le son est-il utilisé ?

Dans ces dispositifs, le son est en général soit complètement absent pour des raisons pratiques: (lieu de médiation public type musée où l'interface sonore est toujours délicate à développer; absence de dispositif sonore adéquat pour des conférences publiques. Mais aussi pour des raisons culturelles : le scientifique n'utilise pas le son pour comprendre lui-même les phénomènes en jeu ni pour les expliquer à sa propre communauté (articles scientifiques et conférences scientifiques) ou à ses étudiants. Il ne voit donc pas nécessairement l'intérêt d'utiliser le son pour la vulgarisation. Il y a aussi un verrou pratique : quand bien même le scientifique voudrait associer un son à un dispositif ou une animation, il ne sait tout simplement pas à qui s'adresser pour cela. Nombreuses sont les animations sur internet ou en conférences où il n'y a tout simplement aucune bande son associée.

On peut cependant noter un récent mouvement lié à l'utilisation de la sonification dans certaines branches de la science dure qui pourrait changer le rapport qu'entretiennent les scientifiques et le monde du son.

Apports de la sonification pour représenter les événements situés et animés

Le son permet de mieux percevoir les occurrences d'événements rapprochés dans le temps que l'image. La multiplication des modalités de représentation peut brouiller la culture conventionnelle des représentations, mais peut également faire mieux comprendre que le phénomène représenté n'est pas l'image qu'on s'en fait habituellement. En effet une particule élémentaire n'est ni un point ni une sphère, et selon *La Trahison des images* de René Magritte (1929) "Ceci n'est pas une pipe".

Quelques pistes pour enrichir l'expérience d'un visiteur/utilisateur ?

Approche enactive : une exploration des phénomènes physiques avec les sens et le corps

La notion d'enaction est une façon de concevoir l'esprit qui met l'accent sur la manière dont les organismes et esprits humains s'organisent eux-mêmes en interaction avec l'environnement. (Wikipedia). On parle également de cognition située ou incarnée, dans le sens où le sujet construit son expérience du monde par la confrontation corporelle avec le monde et ses représentations. On parle souvent d'approche enactive dans les champs des réalités virtuelles et augmentées dès lors que le toucher, l'espace, l'interaction avec des œuvres amène son visiteur à de nouvelles formes d'appréhension. (note <http://acroe.imag.fr/enactive07/>)

- Adjonction de nouvelles dimensions dans la représentation : le son, la spatialisation, l'interaction temps réel, le tactile,
- Dimension temporelle :
- Immersion sonore
- Exploration : variation des paramètres de point de vue, de zoom espace/temps, navigation et accès dynamique
- Explications : clés, règles du jeu, métaphores d'accès
- Aspects ludiques, gamification

- Scénarisation de l'expérience utilisateur
- Durée d'utilisation
- Courbe d'apprentissage

Cohérence, solidité, aspect interprétatifs et dérivatifs des représentations par rapport aux phénomènes référents

Reconnection avec les lois et équations concernées

A l'issue des expériences réalisés par les utilisateurs, comment les visiteurs peuvent-ils approfondir et comprendre quelques lois et équations simples concernant les phénomènes explorés ?

Design sonore

Représenter par le son implique de trouver des matériaux figuratifs que le visuel ne permet pas de rendre aussi bien. Une stylisation est recherchée dans un deuxième temps, mais auparavant, il s'agit de trouver les sons et les comportements sonores les plus parlants possibles pour rendre un phénomène donné.

Nature des sons utilisés

Les sons aigus, impulsionnels, itératifs, granuleux sont préférables aux sons sourds, graves et lisses, car les premiers accentuent la précision alors que la spatialisation est généralement perdue avec les seconds.

Précision spatiale

Une bonne résolution spatiale est essentielle pour tirer partie d'un dispositif de multidiffusion. Elle peut-être obtenue à condition d'utiliser des sons granuleux, bruités, aigus et piqués. Inversement, les sons lisses et purs semblent provenir de partout à la fois ou d'une direction indéterminable.

Rendu du mouvement

Le mouvement doit rester simple pour être perceptible. On a également besoin de repère de position, comme pour la navigation

Impulse et granulation

Les impulsions individuelles ou répétées, les sons itératifs ou granuleux permettent une localisation plus précise que les sons continus et lisses.

Sons continus

Les sons continus sont mieux rendus par des matières bruitées ou des formes d'onde riches en harmoniques comme la dent de scie et le carré

Sonification de phénomènes inaudibles

S'agissant de rendre des phénomènes qui sont invisibles mais également inaudibles, la modélisation est nécessairement abstraite et se comporte comme du monitoring. Par exemple pour faire entendre la variation d'amplitude d'un régime vibratoire, nous avons utilisé un son de synthèse en dent de scie modulée en fréquence en fonction de l'amplitude de l'onde.

Cohérence et stylistique

Les maquettes actuelles ne prétendent pas à une cohérence significative des sons. On retrouve les sons d'étincelles pour les collisions et une onde dent de scie à 50Hz. évoquant le courant électrique.

Développements spécifiques au projet Entendre l'Invisible

Dispositif technique

- Sons et interfaces programmés dans Max MSP

- Interface utilisateur sur ipad
- Carte son USB 8 sorties
- Amplificateur multipiste
- Barre de sons 8 voies

Electronique

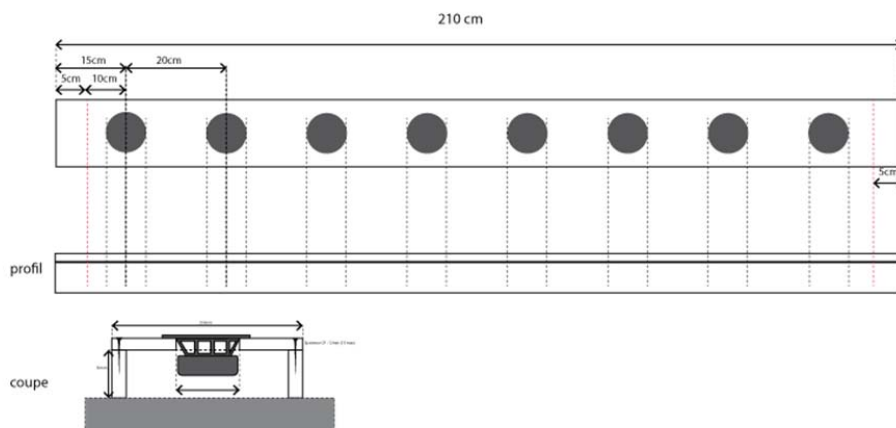
La qualité des enceintes, que nous avons négligé au départ, s'avère in fine un critère important pour la traduction les détails sonores. La précision des aigus, importante pour la spatialisation, une bande passante large et homogène et une bonne réponse impulsionnelle sont requis. Le système d'amplification doit être le plus compact possible et ne pas chauffer pour supporter les conditions d'exposition. Nous utilisons ici des amplificateurs de 7W qui sont largement suffisants. Le volume est généralement atténué de (-)24dB. Une carte son 8 sortie assymétrique d'entrée de gamme complète le dispositif audio.

Interface et capteurs

L'interface utilisateur utilise un ipad relié à l'ordinateur via wifi grâce à l'application Mira Max/MSP. Cette application permet notamment d'accéder aux différentes expériences en sélectionnant les différents onglets présents sur l'écran de l'ipad.

Nous utilisons également deux capteurs d'entrée : une webcam et un microphone. La webcam permet de capter le mouvement et de traquer les yeux des visiteurs, alors que le micro permet de détecter des commandes sonores ou vocales.

Barre de son octophonique



Aspects techniques de la spatialisation

Spatialisation sur une ligne droite, un modèle de panoramique multipiste adaptable :

La plupart des outils de spatialisation cherchent à être les plus génériques possibles et deviennent donc facilement des usines à gaz. Ici le dispositif étant fixe, nous avons développé un modèle de spatialisation simplifié et optimisé permettant de ne pas être dépendant des outils existants, lourds et inadaptés. L'avantage d'un dispositif en ligne avec des haut-parleurs à positions fixes est de simplifier le calcul de panoramique, tout en conservant une variable d'ajustement P (precision) pour adapter la précision au besoin de la représentation sonore. Il

s'agit d'un patch Max/MSP de panoramique sur 8 sorties que nous avons décliné en 2 versions signal et ftm. Lorsque la précision $P = 0$ le volume est le même sur toutes les sorties. Lorsque P croît, la taille du faisceau (précision de la diffusion) diminue. Si P est élevé, il apparaît des trous (baisse de volume) entre les HP. pour une ligne de haut-parleurs rapprochés, les valeurs courantes de P sont entre 5 et 10.

L'équation utilisée pour la panoramique s'applique à chaque sortie (ici 8), le volume varie en fonction de la position sur le dispositif de diffusion: x_{pos}

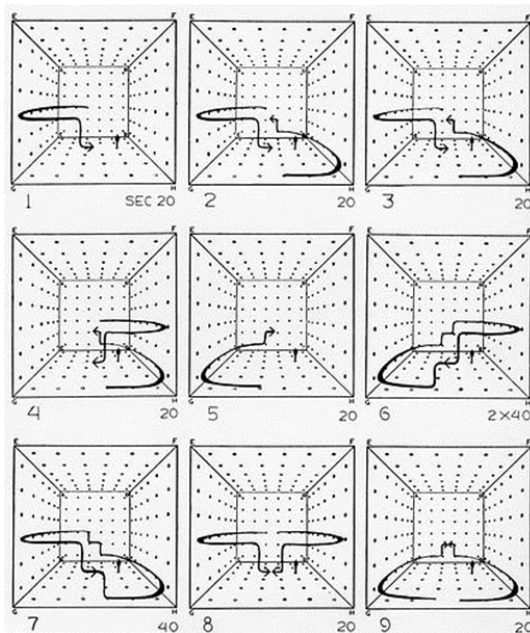
$$\text{signal sortant} = \text{signal entrant} * (1 - ((x_{pos} - \text{range}) * P)^2)$$

Modélisation et maquettes

Visualisation et notation sonore

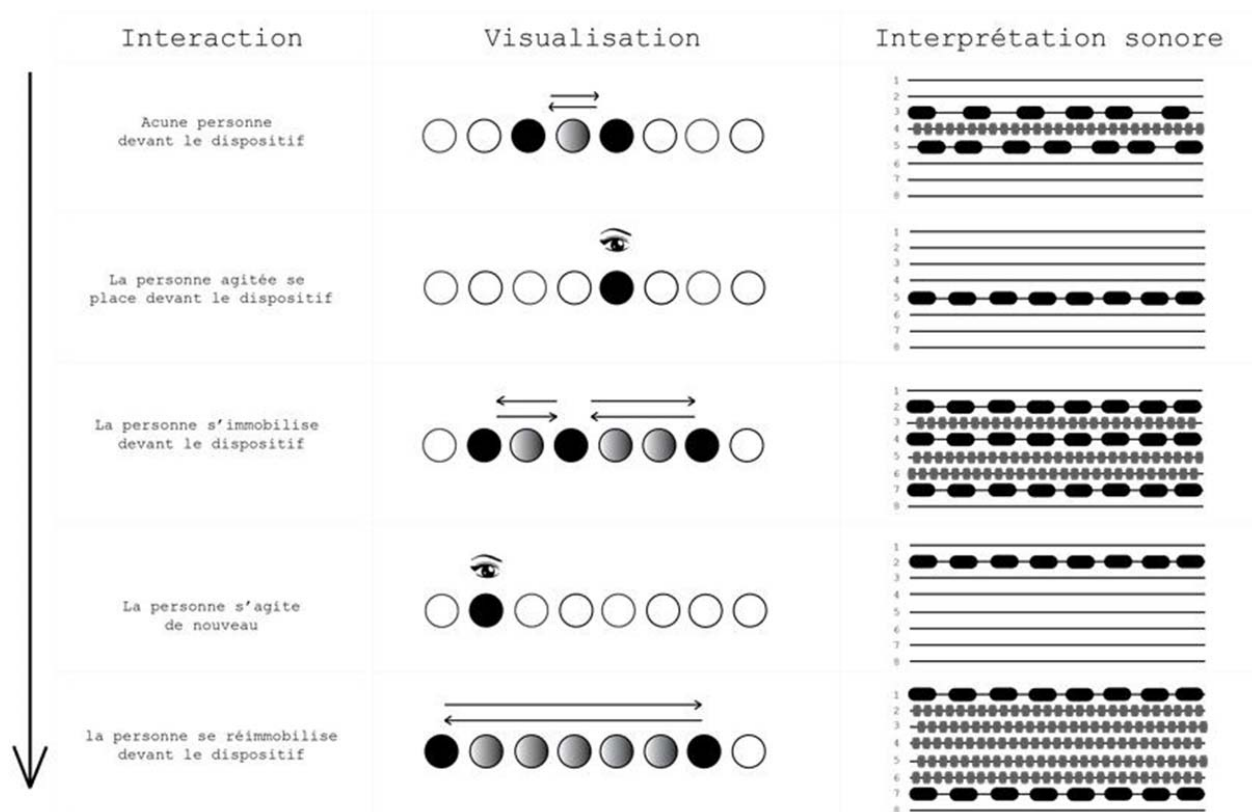
La spatialisation sonore pose le problème de représenter à la fois le temps et l'espace. Un travail important d'apprentissage et de représentation a été fait par les élèves au début et dans la suite du projet pour écrire la spatialisation des sons. Nous nous sommes notamment inspiré du travail d'artistes tels ceux de Bernhard Leitner chez qui la notation de l'espace sonore, bien que basé sur des trajectoires graphiques dont il présuppose le résultat sonore, représente remarquablement bien les intentions de mouvements.

Ses œuvres utilisent essentiellement des trajectoires alors que dans notre projet, les formes peuvent être plus complexes, comme par exemple des flux d'électrons, des rebonds, des salves d'impulsions décalées...etc pour lesquels une représentation simultanément spatiale et temporelle est plus difficile à concevoir et réaliser.



bernhard leitner / sound spaces (7) © atelier leitner - sound cube 1970

Principe de superposition : Position



Notation de la spatialisation sonore de Jean Baptiste Demay ©ENSCI les Ateliers 2014 - Principe de superposition également sonifié par Paul Coudert

Maquette Temps fixé vs. maquette temps réel

Avant de développer une maquette interactive temps réel, chaque designer a travaillé sur une maquette d'aspect dans Pro Tools permettant de choisir les sons, tester et optimiser le rendu sonore.

Ce travail d'approche a également permis de mieux scénariser l'expérience utilisateur et les interactions sonores. L'apport de l'interaction est important pour la spatialisation : une interaction sensible qui modifie l'espace sonore en temps réel permet à l'utilisateur d'en rechercher les effets à l'oreille au cours de l'expérience.

Maquette temps réel

Les maquettes interactives ont été développées par Roland Cahen et pour partie par les élèves eux même dans Max/MSP/Jitter en utilisant occasionnellement des bibliothèques externes telles ftm et gabor (ircam). L'interface tactile de contrôle utilisée est l'ipad avec la bibliothèque Mira permettant de relier l'ipad à un patch Max via wifi.

Projets : voir les fichiers par projet

Perspectives et développement

Nous pouvons envisager aujourd'hui le développement d'un prototype à tester dans le cadre d'une exposition à caractère scientifique. Ce prototype pourrait présenter un ou deux phénomènes seulement dans un premier temps puis en intégrer d'autres au fur et à mesure. Il pourrait être réalisé par une équipe réduite de concepteurs développeurs de 4 ou 5 personnes sur une durée de 1 à 3 mois.

Conclusion

L'utilisation de la spatialisation sonore en elle-même ne suffit pas à montrer des phénomènes physiques. La position, le mouvement la polyphonie sont souvent difficiles à entendre, voire inaudibles. Elle apporte cependant un plus significatif à des présentations muséographique et/ou didactiques comme expressives à condition que les particularités et les limites de la perception spatiale sonore soit bien prises en compte, que les problèmes de contenus, scénarii et ergonomie soient résolus et que le design sonore résolve l'ensemble de ces contraintes dans le rendu. Malheureusement, si les particularités de la spatialisation sonore sont connues en théorie, en pratique, les possibilités expressives et l'audibilité des phénomènes sonores sont difficiles à maîtriser, à plus forte raison lorsque le nombre de paramètres d'entrée est élevée (variabilité des sons en fonction du sujet, attentes d'audibilité de points spécifique précis, comportement des sons...etc). C'est donc une technique artistique propre.

Un point essentiel en conclusion de cette expérience est l'effet d'échelle produit par l'immersion dans un dispositif sonore spatialisé : en proposant un zoom immersif, notre approche et notre dispositif permettent d'appréhender plus facilement, de l'intérieur, les comportements des phénomènes physique. Ce zoom immersif offert par le son spatialisé et l'interactivité temps réel permet vraisemblablement au visiteur (cela reste à vérifier) d'être plus attentif ou dans une position plus confortable pour l'exploration des phénomènes physiques. Nous regrettons de n'avoir pas eu le temps de mieux explorer la dimension audiographique, c'est à dire l'animation visuelle et sonore synchronisée dans le temps et dans l'espace.

La barre de son octophonique est un système assez simple et facile à mettre en œuvre et offre pour cette raison une bonne solution pour ce type d'installation. Des discussions ont eu lieu au sein du groupe sur la question de sa taille, de l'écartement entre les haut-parleurs, de leur qualité, de son éventuelle courbure semi circulaire...etc. Certes, un écartement des enceintes plus important, une courbure, un plus grand nombre de voix, des haut-parleur de bonne qualité, amélioreraient l'expérience. Mais pour avoir travaillé sur des dispositifs infiniment plus performants comme le système WFS de la TU-B comportant plusieurs centaines de sources sonores différenciées, une meilleure précision ne modifie pas considérablement la perception sonore spatiale et ne suffit pas à résoudre les questions de design et d'écriture sonore; qui doivent rendre au mieux l'idée qu'on veut communiquer à travers l'expérience du visiteur. Notre barre de son à 8 haut-parleurs montre qu'avec un dispositif relativement simple à quelques centaines d'euros, il est possible d'obtenir une spatialisation sonore suffisante et adaptée à la muséographie scientifique comme à d'autres sujets.

Références et bibliographie

Roland Cahen : kinetic music (ROTATION II, COUNTBASIS, NANOBALAD)

Navigation Sonore Située : http://roland.cahen.pagesperso-orange.fr/Textes/S_Nav_3D_26.htm

Compte rendu de recherche pour Octophonie Studio Delat P La rochelle 1994 :

<http://roland.cahen.pagesperso-orange.fr/Textes/OctophonieDeltaP-Cahen.pdf>

Bernard Leitner : <http://www.bernhardleitner.at/en>

IDMIL project (CIRMMT - McGill Univerity) <http://www.idmil.org/projects/spatialization>

The Sonification Handbook : <http://sonification.de/handbook/>

Yacine Bellik, *Interfaces Multimodales: Concepts, Modèles et Architectures*, Thèse, Université Paris XI, Orsay,

France, 1995. : http://perso.limsi.fr/bellik/yacine/lib/exe/fetch.php?media=publis:1995_these.pdf

Bertrand MERLIER : *Vocabulaire de l'espace en musiques électroacoustiques* :

<http://hal.inria.fr/docs/00/51/17/46/PDF/MerlierVocabulaireEspace2006.pdf>

Enaction in Arts 2007 : <http://acroe.imag.fr/enactive07/>

Laboratoire et studio de Technicshe Universität Berlin (TU-B) Audio Communication Group: [https://www.ak.tu-](https://www.ak.tu-berlin.de/menue/forschung/wellenfeldsynthese/parameter/en/)

[berlin.de/menue/forschung/wellenfeldsynthese/parameter/en/](https://www.ak.tu-berlin.de/menue/forschung/wellenfeldsynthese/parameter/en/)

Bregman, Albert S. *Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1990.

Rumsey, Francis. *Spatial Audio*. Music Technology Series. Oxford ; Boston: Focal Press, 2001.