



VISUALISATION DES ONDES SONORES,

Dans un contexte artistique

Isaline Marquaire

Direction interne : Thierry Coduys

Direction externe : Anne Sédès

Rapporteur : Gérard Pelé

Section Son 2014

Remerciements

Un grand merci à :

Mes directeurs interne, externe et mon rapporteur, Thierry Coduys, Anne Sédès et Gérard Pelé, pour leurs indications et leurs conseils au long de ce mémoire ;

Toutes les personnes que j'ai rencontré à Louis-Lumière au cours de ces trois dernières années, personnels, professeurs, intervenants et élèves, qui m'ont apporté énormément que ce soit par de simples conversations ou des cours magistraux ;

L'administration de l'école, et en particulier Agnès Hominal et Michel Coteret, pour leur disponibilité et leur soutien, notamment lors de la réalisation de la partie pratique, *Toccata pour les yeux* ;

Antoine Desrats pour ses conseils et son soutien quotidien ;

Hélène Mauri, pour sa contribution aux prises de vues présentées lors de la partie pratique ;

Etienne Bultingaire, pour le prêt d'un magnifique haut-parleur Meyer Sound 18" ;

Soraya Mounir pour son aide lors de l'installation de la scénographie ;

Lucie Bourely et Hanna Matahri, lors de l'établissement du budget de ce mémoire ;

Mes parents, sans qui ses études n'auraient tout simplement pas été possibles.

Merci !

Résumé

La visualisation du son est un sujet qui, depuis des siècles, intrigue chercheurs et artistes. En effet la relation entre images et sons est d'autant plus complexe qu'elle fait appel à des domaines variés : musique, peinture, cinéma, physique, etc. Elle soulève par ailleurs un grand nombre de questions auxquelles chacun peut donner une réponse différente, comme par exemple sur l'étendue du son au de-là de sa simple perception.

Ce mémoire aborde en particulier la visualisation des ondes sonores, dont tous les mystères n'ont pas encore été percés à l'heure actuelle. Il propose notamment d'expérimenter l'apparition de figures sonores dans diverses matières telles que le sable, la limaille de fer ou encore les spores de champignon. Le résultat de ces recherches permettra la réalisation d'une installation interactive, *Toccata pour les yeux*, qui transpose et influence l'approche traditionnelle que l'on a du son.

Abstract

The visualisation of sound is a subject that intrigued scientists and artists for centuries. Indeed the relation between images and sounds is complex, especially as it calls on various fields: music, painting, cinema, physics, etc. This raises many questions to which different answers can be given, for example on the extend of sound beyond its simple perception.

This report approaches the visualisation of sound waves, of which all mysteries have not yet been understood. It especially proposes to experience the appearance of sound figures in several materials as sand, iron filings or mushrooms spores. The results of the research will allow the realisation of an interactive installation, *Toccata pour les yeux*, which transposes and influences the traditional approach we have to sound.

Table des matières

Introduction	6
I/ ETAT DE L'ART DE LA VISUALISATION DU SON	7
1) Harmonie picturale et synesthésie	7
a. Principes de synesthésie	7
b. Deux grandes créations synesthésiques : le clavecin oculaire et l'orgue à couleurs	11
c. La musique visuelle du XX ^{ème} siècle	15
2) Point de vue scientifique	22
a. Des outils de représentation du son	22
b. Figures de vibration	24
c. Timbre et harmonie	26
3) Convergence numérique	30
a. Partitions graphiques et logiciels de représentations graphiques pour l'analyse et le contrôle	30
b. Diverses approches de la relation entre image et son	31
c. Convergence numérique des supports et opérations de traitements	34
II/ ETUDE DES CYMATIQUES	37
1) Présentation	37
a. Le son, un phénomène de vibration	37
b. Découverte des cymatiques	41
c. Observations sur les expériences de Jenny	44

2) Expériences	51
a. Champ d'expérimentation et mise en place	51
b. Résultats des expériences	54
c. Quelques explications scientifiques	65
III/ TOCCATA POUR LES YEUX	66
1) Conception	66
a. Exploitation des expériences	66
b. Intentions scénographiques.....	66
c. Cahier des charges très précis	69
2) Réalisation.....	71
a. Considérations pratiques.....	71
b. Mise en place	72
c. Retours sur l'installation.....	76
Conclusion	79
Annexes.....	80
Tables des figures	84
Bibliographie	89

Introduction

Lorsque l'on est ingénieur du son au cinéma, et plus encore quand on étudie l'audiovisuel, des questions reviennent régulièrement : quelle est la place du son face à une image prédominante, qu'apporte-il de particulier, de quel sens est-il porteur, etc. ? Elles ont été remises au goût du jour avec les constantes propositions de nouvelles formes en art, depuis la création de bandes son sur des photographies seules jusqu'à l'élaboration de séquences sonores pour des installations contemporaines.

Le sujet de ce mémoire propose un nouvel angle pour reprendre ce thème – la relation image/son – en s'intéressant au son en tant que phénomène physique, une onde de vibration. Il permet ainsi d'allier les sciences aux arts et d'interroger la matérialité du son ou l'immatérialité des images associées.

Alors relation image/son devient visualisation du son et plusieurs directions sont à étudier : dans quels cas parler de transduction, dans lesquels parler de complémentarité ou encore d'association ?

Pour répondre à ces questions, ce travail présente un état de l'art, artistique et scientifique, en matière de visualisation du son depuis les débuts de l'abstraction jusqu'aux considérations actuelles, en passant par la musique visuelle et les recherches scientifiques des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles.

La problématique principale – la visualisation du son peut-elle être expressive ? – est particulièrement mise en avant dans la partie pratique de ce mémoire où des expériences permettant de matérialiser le son sont à l'origine d'une installation interactive, *Toccata pour les yeux*, présentée à l'ENS Louis-lumière début mai 2014.

Les principales références qui ont permis la réalisation de cet écrit sont les trois catalogues des expositions *Aux origines de l'abstraction 1800-1914* (Musée d'Orsay, Paris) ; *Sons et Lumières, une histoire du son dans l'art du XX^{ème} siècle* (Centre Pompidou, Paris) et *Visual Music : Synaesthesia in Art and Music since 1900* (Museum of Contemporary Art, Los Angeles).

Deux livres ont eu une importance particulière lors de la production de la partie expérimentale : *Principles of vibration and sound* de Thomas Rossing et Neville Fletchet ainsi que l'ouvrage de Hans Jenny sur ses propres recherches, *Cymatics : A Study of Wave Phenomena & Vibration*.

I/ ETAT DE L'ART DE LA VISUALISATION DU SON

« J'ai dit quelque part qu'il ne suffisait pas d'entendre la musique, mais qu'il fallait encore la voir. »¹

1) Harmonie picturale et synesthésie

Dès que l'on entreprend d'établir une correspondance entre image et son, un déséquilibre se crée aussitôt puisque si l'un est visible l'autre se soustrait par essence au regard. C'est d'ailleurs cette absence de référent matériel qui donne au son ce pouvoir de séduction et d'imagination. Ainsi, il joue souvent le rôle d'inspiration. Mais cela ne suffit pas aux artistes et chercheurs, qui dès le XX^{ème} siècle, cherchent à pénétrer le territoire de l'art du son.

a. Principes de synesthésie

La synesthésie est une expérience perceptive associant des sensations à un sens qui évoque des sensations liées à un autre sens. Considérée comme un trouble de la perception, il existerait plus de cent cinquante formes de synesthésie dont chaque expérience serait personnelle. Messiaen expliquait : « Ce n'est pas de l'imagination, ce n'est pas non plus un phénomène physique, c'est une réalité intérieure ». C'est la synesthésie bimodale parfois bidirectionnelle qui intéresse l'harmonie picturale de Kandinsky et ses successeurs, i.e. l'association de deux sens parfois croisée (par exemple, la musique évoque les couleurs et les couleurs évoquent la musique).

« Je vous envie beaucoup. Les musiciens ont vraiment de la chance (...) de pratiquer un art qui est parvenu si loin. Un art vraiment, qui peut déjà renoncer complètement à toute fiction purement pratique. Combien de temps la peinture devra-t-elle encore attendre ce moment ? »²

Les peintres de toutes époques se sont toujours beaucoup intéressés à la musique. Le son les passionne particulièrement par son côté immatériel, indépendant du monde visible.

Kandinsky compare l'art de l'humain à une grande pyramide, l'artiste ayant pour mission d'entraîner les humains vers son sommet, domaine des forces purement spirituelles. Avec *Du Spirituel dans l'art et la peinture en particulier*, il développe la théorie d'une nouvelle peinture qui accorde une nécessité absolue à l'inspiration subjective dans l'harmonie des couleurs.

Ainsi, après avoir été marqué par la clarté ou l'obscurité d'un ton, on peut reconnaître sans peine qu'une couleur puisse être froide ou chaude, la chaleur étant associée aux variances de jaune, le froid

¹ Stravinsky Igor, *Poétique musicale*, 1945

² Kandinsky Vassily, lettre du 9 avril 1911 à Arnold Schönberg dans *Correspondances, textes de Schönberg Ferruccio, Busoni Ferruccio et Kandinsky Vassily*, Genève, 1995, p.141

aux variances de bleu. Kandinsky arrive à la conclusion que le jaune est une couleur typiquement terrestre, violente, agressive alors qu'il accorde au bleu des propriétés célestes et l'associe au calme, au repos. Il est donc logique de penser que leur somme, le vert, est source d'équilibre.

Si on continue dans cette logique, le blanc est clarté, absolu, empli de possibles, silence profond ; le noir est obscurité, néant, sans espoir ; le rouge lui est chaud, vivant, vif, agité, grande force toujours en mouvement. Mélangé au jaune, le rouge gagne en chaleur et irradie son entourage ; mélangé au bleu, il forme le violet, en contraste avec l'orange.

Kandinsky va toujours plus loin : de son écoute des couleurs et en accord avec ce qui précède, il associe couleurs et instruments de musique : le jaune sera une trompette ou une fanfare ; le bleu, un violoncelle (instrument se rapprochant le plus de la voix humaine), une contrebasse, un orgue ; le vert concorderait avec des sons « calmes et amples »³ rappelant le médium du violon. Le rouge ferait référence au tuba, à des coups de timbale ; l'orange à un alto puissant et le violet aux sonorités du basson.

Les corrélations entre sons et images intriguent les chercheurs dès l'Antiquité : Aristote et Pythagore se questionnaient sur les rapports mathématiques qui pourraient exister entre le spectre des couleurs de l'arc en ciel et les intervalles musicaux.

Au début du XVIII^{ème} siècle, Newton, mathématicien et philosophe anglais, démontre dans son *Traité d'optique sur les réflexions, réfractions, inflexions et les couleurs de la lumière* qu'il est possible, par l'action d'un prisme, de décomposer la lumière blanche en un nombre infini de nuances colorées. Il détermine douze couleurs principales formant ce qu'il appelle « le cercle chromatique », qui



Figure 1 : Le monochorde

correspond d'ailleurs aux douze sons de la gamme chromatique et qui deviendra la « gamme des couleurs ».

Au XVIII^{ème} siècle, les fréquences sont donc déjà connues également, identifiées par le physicien comme l'élément qui produit le son. Et Newton compare le prisme à un monochorde, instrument de musique qui peut être considéré comme l'un des premiers dispositifs de recherche sur les intervalles musicaux et sur le phénomène sonore. Le monochorde est un instrument de musique composé d'une caisse de résonance rectangulaire, graduée et surmontée d'un manche sur lequel est fixée une corde de boyau

³ Kandinsky Igor, *Du Spirituel dans l'art et la peinture en particulier*, Trad. Par N. Debrand et B. du Crest, Folio Essais, Paris, 1954, p.112

frottée par un archet. Le coin, sorte de chevalet mobile, permet de réduire la longueur de la corde et d'obtenir ainsi différents intervalles. Par exemple, pour une tierce, il faut placer le chevalet au rapport 5/4. C'est le monocorde qui permit à Pythagore de trouver la relation numérique entre la longueur d'une corde vibrante et les hauteurs musicales. Il démontre que la hauteur du son est inversement proportionnelle à la longueur de la corde. Ceci n'est pas sans renvoyer au culte que vouaient les Grecs à la puissance des nombres.

De nombreuses personnes, après Newton, constituent leur propre association entre couleurs et notes musicales, avec chacune une méthode différente. Bertrand Castel⁴, en 1725, s'appuie sur les théories de Newton et expose les résultats de ses propres recherches dans *L'Optique des couleurs*. Son ambition est clairement de faire état d'une harmonie absolue, biaisant la démarche scientifique et reléguant ainsi ses analogies soi-disant irréfutables à de simples ressemblances ou associations.

« Il y a un son primitif et fondamental, appelé ut, qui donne le ton à tous les autres, par lequel ils commencent à finissent tous. Il y a une couleur mère et base de toutes les autres : c'est le bleu ou le noir (...) d'où tout part. Le premier son ut en enfante deux autres, sol et mi, qui, avec lui, forment l'essentiel de la musique, l'harmonie primitive et fondamentale, ut, mi, sol. Il y a de même trois couleurs primitives bleu, jaune, rouge.

Il y a cinq toniques, ut, ré, mi, sol, la et deux semi-toniques naturels, fa et si, formant tous ensemble la gamme diatonique, ut, ré, mi, fa, sol, la, si, ut. Il y a de même cinq couleurs toniques, et deux semi-toniques, formant la suite des couleurs, bleu, vert, jaune, aurore, rouge, violet, violant, et beau.

Enfin il y a douze demi-teintes de couleurs : douze degrés de coloris, formant une nuance suivie, et un cercle parfait, bleu, céladon, vert, vert-olive, jaune, etc. qu'on a traité de chromatiques, c'est-à-dire de coloris, de nuances, depuis plus de deux mille ans, avant que de connaître leur parallélisme analogique, avec lesdits douze degrés de couleurs. »⁵

Si la couleur et le son musical sont deux phénomènes vibratoires, les correspondances n'en sont pas pour autant évidentes, on compte notamment une octave de couleurs contre sept octaves en musique. La théorie de Castel explique qu'aux douze degrés de la gamme chromatique correspondent douze coloris et que le nombre d'octaves caractérise le clair-obscur (le grave s'associant avec le sombre, l'aigu avec le clair).

⁴ Louis Bertrand Castel, 1688 – 1757, Révérend Père, contemporain de Rameau

⁵ Louis Bertrand Castel, *L'Optique des couleurs*, 1725

Mais Hoffman⁶ n'est pas d'accord avec l'idée d'associer une couleur à un son. Pour lui, seul un accord peut donner à un son musical une réelle couleur, associant à celle-ci les tons agressif ou tendre d'une couleur. Plus tard, la couleur modale des accords sera utilisée par Emil Petschnig⁷ pour constituer une nouvelle théorie : ut majeur sera gris clair, ré majeur rouge brique, la majeur bleu foncé, etc.

		C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
Isaac Newton	1704	Red		Orange		Yellow	Green		Blue		Purple		Pink
Louis Bertrand Castel	1734	Blue	Teal	Green	Olive	Yellow	Orange	Red	Dark Red	Pink	Purple		
George Field	1816	Blue		Purple		Red	Orange		Yellow		Olive		Green
D. D. Jameson	1844	Red	Orange	Yellow	Green	Teal	Blue	Purple	Pink				
Theodor Seemann	1881	Dark Red	Red	Orange	Yellow	Green	Teal	Blue	Purple	Pink	Dark Brown	Black	
A. Wallace Rimington	1893	Red	Dark Red	Orange	Yellow	Olive	Green	Teal	Blue	Purple	Dark Blue	Pink	
Bainbridge Bishop	1893	Red	Dark Red	Orange	Yellow	Olive	Green	Teal	Purple	Pink	Red		
H. von Helmholtz	1910	Yellow	Green	Teal	Blue	Purple	Pink	Red	Orange	Dark Orange	Red	Orange	
Alexander Scriabin	1911	Red	Pink	Yellow	Blue	Dark Red	Blue	Orange	Purple	Green	Blue		
Adrian Bernard Klein	1930	Red	Orange	Yellow	Olive	Green	Teal	Blue	Purple	Pink	Red		
August Aeppli	1940	Red	Orange	Yellow	Olive	Green	Teal	Blue	Purple				
I. J. Belmont	1944	Red	Orange	Yellow	Olive	Green	Teal	Blue	Purple	Pink	Red		
Steve Zieverink	2004	Olive	Green	Teal	Blue	Purple	Pink	Dark Red	Red	Orange	Yellow	Yellow	

Figure 2 : Comparaison des associations entre couleurs et notes

Certains théoriciens se sont opposés à ces associations plus subjectives les unes que les autres. Parmi eux Laszlo⁸ pour qui le mélange de deux couleurs produit une nouvelle couleur unique, différente des deux premières, alors que l'association de notes constitue un accord musical, une harmonie de sons. « Une théorie de la couleur basée sur l'expérience musicale s'appuie sur une fantaisie plutôt qu'un fait » explique Ogden N. Rood⁹, dans *Modern Chromatics* (1879).

Helmholtz¹⁰ remettra en cause les corrélations établies par Newton en s'appuyant sur la décomposition du spectre : « la division du spectre en sept couleurs principales de Newton était complètement arbitraire depuis le début et délibérément fondée sur les analogies musicales. (...) Il n'y a pas de limites réelles entre les couleurs du spectre. (...) Par conséquent, cette analogie entre la musique et la couleur doit être abandonnée. »¹¹

Alexandre Scriabine¹² est plus tempéré et pense qu'il n'est pas possible qu'un simple et unique parallélisme soit mis en place de la sorte. Mais comme ses prédécesseurs, il porte un regard plus sensible que scientifique sur le problème et dans ses travaux, il s'autorise une liberté totale quant aux correspondances entre couleurs et sons.

⁶ Johann Leonard Hoffman, physicien allemand ; *Essai d'une histoire de l'harmonie picturale en général et de l'harmonie des couleurs en particulier*, 1786

⁷ Emil Petschnig, 1877 – 1939, compositeur et théoricien de la musique

⁸ Alexander László, dans *Poétique de la couleur, une histoire du cinéma expérimental*, sous la direction de Nicole Brenez et Miles McKane

⁹ Ogden N. Rood, 1831 – 1902, physicien américain

¹⁰ Hermann von Helmholtz, 1821 – 1894, physicien allemand

¹¹ Helmholtz, *Traité sur l'optique physiologique*, 1856

¹² Alexandre Scriabine, 1872 – 1915, compositeur russe

« La couleur et le son ne se comparent pas directement, mais se soumettent tous deux à une plus grande formule, et dérivent, bien que chacun pour soi, de la loi la plus haute. »¹³

Il existe une autre distinction fondamentale entre image et son : la première se figure initialement dans l'espace quand le second se définit dans le temps. Au fil des siècles, les artistes ont amené l'espace dans la musique de par l'écriture des partitions contemporaines et par la complexification de la disposition des musiciens et orchestres dans l'espace. Dans les années 70 par exemple, Messiaen¹⁴ compose *Des canyons aux étoiles*, pour orchestre, glockenspiel et cors devant les couleurs du canyon de l'Utah.

Debussy, compositeur très proche des arts visuels, décrivait la musique en termes de couleurs ou certaines œuvres comme des « tableaux sonores ». De la même manière, les peintres du Bauhaus, comme Kandinsky et Klee, s'exprimaient par références musicales et cherchaient à « appliquer la musique sur leurs toiles ». Dans leurs œuvres, on reconnaît la dynamique du son dans l'intensité de la lumière, le rythme et la durée dans les lignes et les formes.

Souvent, l'élaboration d'instruments de musique ou autres machines a permis aux artistes et chercheurs d'établir de nouvelles théories, cherchant toujours plus loin de nouvelles correspondances entre couleurs et sons.

b. Deux grandes créations synesthésiques : le clavecin oculaire et l'orgue à couleurs

« Madame s'assit, promena ses doigts sur le clavier, les yeux attachés sur l'intérieur de la caisse, et dit d'un air satisfait : - Je le crois d'accord.

Et moi, je me disais tout bas : - Je crois qu'elle rêve ; car je n'avais point entendu de son...

(...) Elle tint à peu près ce discours : - Mesdemoiselles, je suis très mécontente de vous. (...) Il semble que vous n'avez pas encore les premiers principes de l'harmonie. Je veux aujourd'hui que ma fontange soit verte et or. Trouvez-moi le reste.

La plus jeune pressa les touches, et fit sortir un rayon blanc, un jaune, un cramoisi, un vert, d'une main ; et de l'autre, un bleu et un violet.

- Ce n'est pas cela, dit la maîtresse d'un ton impatient ; adoucissez-moi ces nuances.

La femme de chambre toucha de nouveau, blanc, citron, bleu turc, ponceau, couleur de rose, aurore et noir.

- Encore pis ! dit la maîtresse. Cela est à excéder. »¹⁵

¹³ Goethe, *Théorie des Couleurs*, 1840. Goethe s'intéressa de près à la question de la synesthésie des couleurs et écrivit de nombreux ouvrages à ce sujet.

¹⁴ Olivier Messiaen, 1908 – 1992, musicien et pédagogue français

¹⁵ Denis Diderot, *Les bijoux indiscrets*, 1748

Le premier à avoir concrétisé le résultat d'une recherche synesthésique serait Arcimboldo avec son clavecin à couleurs ou luth perspectif au XVI^{ème} siècle. Peintre maniériste célèbre pour ses portraits, il était également connu pour ses spectacles avec des machines. Partant des proportions harmoniques pythagoriciennes, il transpose les tons et les demi-tons¹⁶ en nuances de couleurs pour construire son clavecin à couleurs. On pouvait sur deux octaves, douze demi-tons par octave, progresser du blanc, grave, jusqu'au noir, aigu ; le vert correspondant au médium.

S'inspirant de *Musurgia universalis*¹⁷ du père Athanasus Kirchner¹⁸, Louis Bertrand Castel écrivit près de trois cent articles et publia également des traités comme *Clavecin pour les yeux avec l'art de peindre les sons et toutes sortes de musique* en 1725. Il a pour ambition de construire un clavecin oculaire « de manière qu'un sourd puisse jouir et juger de la beauté d'une musique et réciproquement qu'un aveugle puisse juger par les oreilles »¹⁹. En s'appuyant sur les travaux de Kircher, le jésuite fit correspondre des couleurs à des notes, se concentrant sur les sept tons de la gamme diatonique. Il partit de l'accord parfait do mi sol, qui n'existait pas encore à l'époque de Newton, et y fit correspondre les couleurs toniques. Ainsi le do s'associe au bleu, le mi au jaune, le sol au rouge et le ré au vert (par somme des couleurs qui l'encadrent). Aux octaves supérieures, les teintes seront les mêmes mais avec des nuances plus claires jusqu'à atteindre le blanc ; aux octaves inférieures, plus sombres pour aboutir au noir.

Bertrand Castel construisit au moins deux versions de son clavecin oculaire, sur trois octaves, ambitus suffisant pour couvrir à peu près la tessiture humaine. La première version de son instrument est constituée d'un cadre en bois placé au-dessus d'un clavier ordinaire. Ce cadre est divisé en soixante petites fenêtres avec chacune un coloris différent. A chacune sont associés un rideau et une poulie reliée à chaque touche. Lorsque le musicien presse une touche, le rideau s'ouvre et dévoile la couleur de la fenêtre associée. Pour sa deuxième version, destinée à un public plus large, il ajoute des miroirs et des bougies pour que le clavecin diffuse plus de lumière.

« Clavecin oculaire (musique & optique) : Instrument (...) destiné à donner à l'âme par les yeux les mêmes sensations agréables de mélodie et d'harmonie de couleurs, que celles de mélodie et d'harmonie de sons que le clavecin ordinaire lui communique par l'oreille. »²⁰

¹⁶ Ton divisé en deux valeurs égales ; tempérament réutilisé par Rameau au XVIII^{ème} siècle

¹⁷ *Musurgia universalis, sive ars magna sononi et dissoni*, 1650

¹⁸ Athanase Kircher, 1601 – 1680, Jésuite, graphologue et scientifique allemand, créateur du mégaphone, prosélyte de la lanterne magique

¹⁹ Castel Louis Bertrand, *Le vrai système de physique générale de M. Newton*, 1743. Idée développée par la suite dans *L'optique des couleurs*, 1754

²⁰ Diderot et D'Alembert, *L'Encyclopédie*, 1751

Contemporain de Louis Bertrand Castel, Rameau émit de grandes réserves quant au clavecin oculaire. Tous deux entrèrent dans un débat qui donna naissance à de nombreux articles, chacun répondant aux remarques de l'autre. Mais c'est à Jean-Jacques Rousseau²¹ que l'on doit les plus vives critiques.

« On a trouvé dans l'analyse du son les mêmes rapports que dans celle de la lumière. Aussitôt on a saisi vivement cette analogie sans s'embarrasser de l'expérience et de la raison. L'esprit de système a tout confondu, et faute de savoir peindre aux oreilles, on s'est avisé de chanter aux yeux. J'ai vu ce fameux clavecin sur lequel on prétendait faire de la musique avec des couleurs : c'était bien connaître les opérations de la nature de ne pas voir que l'effet des couleurs est dans leur permanence et celui des sons dans leur succession, (...) les couleurs sont la parure des êtres inanimés ; toute matière est colorée ; mais les sons annoncent le mouvement, la voix annonce un être sensible ; il n'y a que des corps animés qui chantent. »²²

En 1877, Bainbridge Bishop²³ invente l'orgue de couleur ou orgue chromatique, en expérimentant des mécanismes produisant de la lumière et en les reliant aux touches. Il profite de l'avènement de l'électricité pour perfectionner son instrument. Dans sa dernière version, on plaçait une lampe à arc au-dessus d'un orgue classique, elle éclairait des verres colorés, reliés à des leviers. On projetait ainsi des couleurs mélangées sur un petit écran.

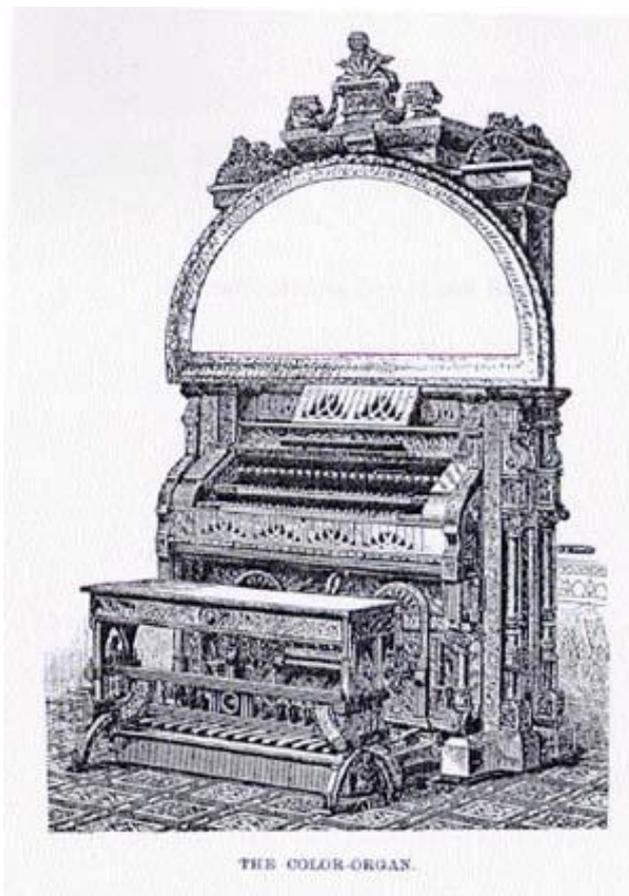


Figure 3 : L'orgue à couleurs de Bainbridge Bishop

²¹ Jean-Jacques Rousseau, 1712 – 1778, écrivain, philosophe et musicien suisse

²² Rousseau Jean-Jacques, *La Pléiade*, « *Essai sur l'origines des langues* », Chapitre 16 : Fausse analogie entre les couleurs et les sons, 1761, Gallimard, Paris, tome 5, p. 419 & 420

²³ Bainbridge Bishop, *Un souvenir de l'orgue de couleur, avec quelques suggestions au regard de l'âme de l'arc-en-ciel et de l'harmonie de la lumière*, 1893



Figure 4 : Rimington devant son orgue de couleur (1912)

De nombreux chercheurs se targueront d'avoir posé des brevets pour l'amélioration de l'orgue de couleur, mais c'est l'instrument muet de Alexander Wallace Rimington²⁴ dont on garde le plus grand souvenir. Bien plus complexe que l'orgue de Bishop, celui-ci nécessite une alimentation électrique conséquente. Un orgue ordinaire (cinq octaves) est relié à des diaphragmes installés devant des lentilles optiques. Il est également constitué de filtres colorés et de quatorze ampoules. L'instrument projette ainsi des lumières colorées d'abord sur un écran puis sur des draperies (créant des formes nouvelles avec les plis) ou des successions de voiles de gaze (pour des jeux de texture).

Comme son instrument était muet et parce qu'il voulait que son spectacle soit complet, Rimington avait souvent recours à des instruments normaux pour l'accompagner sur des œuvres de Chopin, Bach ou Dvorak. Mais le créateur s'étonne du manque de réaction de son public face à la couleur contrairement au succès que peut avoir la musique, phénomène plus largement accepté.

Dans les années 1900, Rimington se voit offrir de travailler sur *Prometheus le Poème de Feu*, une symphonie de Scriabine, qui fut le premier à inclure une partie pour la lumière dans sa partition. Une ligne musicale « Luce » donne des intentions pour la projection colorée.

Une grande quantité de dispositifs audiovisuels de ce type virent le jour à la suite du clavecin oculaire et de l'orgue de couleurs. Parmi eux : le Sarabet de Mary Hallock-Greenewalt (1919) ; le projecteur à couleurs de Adrian Klein (1920) ; le Clavilux de Thomas Wilfred (1922) ; l'Optophone de Raoul Hausmann (1922) ; le Sonchromatoscope de László (1925) ; le Piano optophonique de Vladimir Baranoff-Rossiné (1926) ; le Musicrome de George Hall (1926) ; le Vibroexponateur de Boris Yankovsky (1932) ; la Console lumineuse de Frederick Bentham (1937) ; et ainsi de suite.



Figure 5 : Extrait de la partition de *Prometheus, le Poème de Feu* de Scriabine

²⁴ Rimington, *Musique des couleurs : l'art de la couleur mobile*, 1911

c. La musique visuelle du XX^{ème} siècle

Si la musique visuelle est très présente dans l'histoire de l'art du siècle passé, considérée notamment comme l'un des acteurs de la naissance de l'art abstrait, elle n'en est pas moins qu'une part réduite de la relation entre musique et arts visuels. Mais elle peut être considérée comme le lien le plus tenace entre eux, continuant incessamment son exploration artistique et sa recherche de formes nouvelles. C'est par son rapport direct avec les technologies qui ne cessent d'évoluer, que peut être justifié sa longévité.

De nombreuses caractéristiques visuelles et musicales sont à l'origine d'une quantité considérable d'œuvres de musique visuelle. Parmi elles, le genre de la musique, la structure, le rythme, la durée, l'harmonie, l'orchestration, le phrasé, la répétition, la dissonance, la dynamique, etc. On peut également ajouter à cela les intentions du compositeur, ses concepts, ses croyances ou encore ses émotions. Il résulte de tout cela une œuvre dont les composantes évoluent dans le temps.

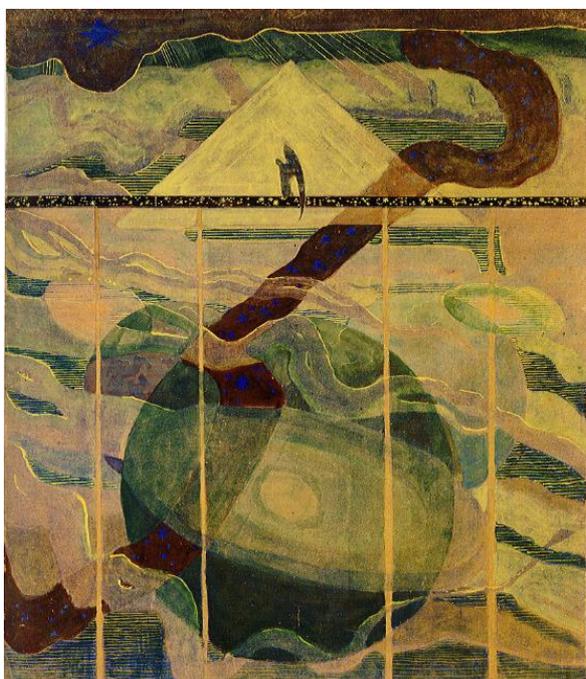


Figure 6 : Sonata No. 6 (Sonata of Stars), Andante, Ciurlionis, 1908

Il est presque impossible de déterminer l'origine de la musique visuelle. Mais des artistes de la fin du symbolisme, comme Mikalojus Konstantinas Ciurlionis, contribuèrent à son développement. En effet, la peinture est un des premiers domaines dans lequel s'est inscrite la musique visuelle, avec des artistes comme Paul Klee, Arthur Dove, etc., au travers de compositions abstraites.

« I am completely immersed in counterpoint. I imagine the entire world as great symphony and people as notes. »²⁵

Je suis complètement immergé dans le contrepoint.

J'imagine le monde entier comme une grande symphonie et les humains comme des notes.

L'œuvre de Ciurlionis est emplie d'un esprit musical fort. Très porté sur l'abstraction, il était fasciné par l'astronomie, la cosmogonie, la littérature symboliste et la théosophie lituanienne.

« Pourquoi ne pas concevoir alors une « peinture pure » ? Comme un musicien a ses notes, pourquoi ne pas supposer que la couleur, par sa force intrinsèque, peut exprimer les pensées du peintre ? »²⁶

²⁵ Mikalojus Konstantinas Ciurlionis, lettre, 22 mai 1901, publiée dans *M. K. Ciurlionis, Aple muzika in daile (On Music and Art)*, Vilnius, 1960

²⁶ Henry Valensi lors d'une lecture de La Boétie dans une galerie parisienne en 1912



Figure 7 : *Fuga*, Kandinsky, 1914

Par ailleurs, les caractéristiques de la musique sont aussi utilisées par les peintres pour établir un langage visuel métaphorique qui leur ont permis de traduire les structures musicales en des constructions visuelles.

Kandinsky s'est intéressé à l'émotion qui émane des compositions visuelles comme de la musique, et notamment à celle de la musique atonale de Schoenberg. Paul Klee au contraire s'est plutôt concentré sur l'harmonie classique, s'interrogeant sur les structures musicales, l'art de la polyphonie.

A l'époque de la naissance de la photographie, František Kupka, comme nombreux autres peintres, pense que l'objectif de l'art n'a jamais vraiment été de reproduire des sujets mais plutôt de créer des formes et des couleurs indépendantes de la réalité du monde autour de lui. Ne croyant fondamentalement pas en les expériences subjectives de la synesthésie et avec l'envie de créer quelque chose entre la vue et l'ouïe, il imagine une fugue en couleurs, à l'image de celle, musicale, de Bach avant lui.

Et c'est ainsi que sont créés les *Disks of Newton (Study for "Fugue in Two Colors")* en 1912, qui ne sont pas sans rappeler les *Formes circulaires* de Robert Delauney (1912) ou les *Prismes électriques* de Sonia Delauney (1914).

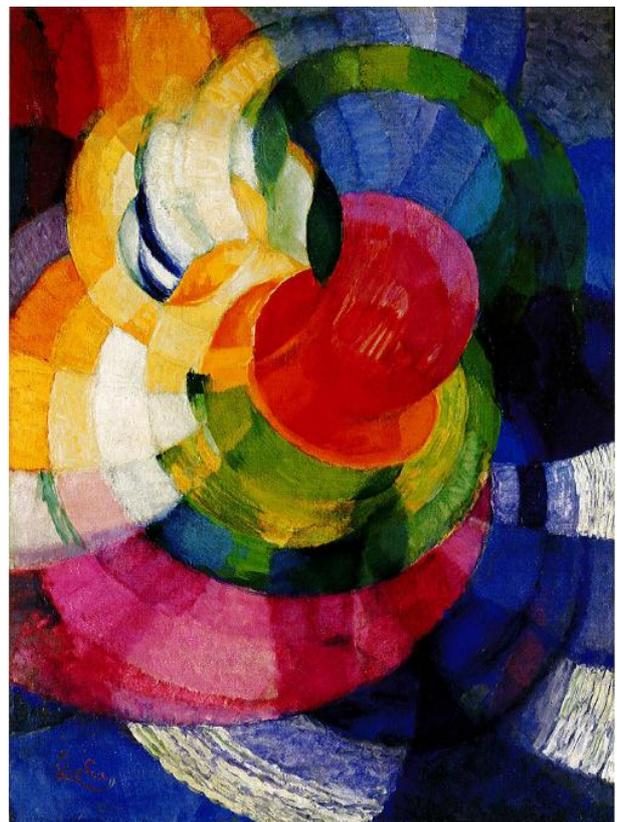


Figure 8 : *Disks of Newton (Study for "Fugue in Two Colors")*, Kupka, 1912

Mais la photographie a aussi eu ses représentants en musique visuelle ; Stieglitz étudiait certaines de ses idées. En présentant sa série de photographies de nuages, *Songs of the sky*, il voulait que l'on puisse y retrouver une symphonie.



Figure 9 : *Songs of the Sky*, Alfred Stieglitz, 1929

Puis les artistes se sont rapidement heurtés à un problème complexe : la musique se déroule dans le temps. Et s'il est vrai que le spectateur peut passer un long moment devant un tableau, le peintre ne peut pas contrôler l'ordre dans lequel seront vus les éléments qui le composent. Une réponse à ce problème a été donnée par l'élaboration de séquences évoluant dans le temps sur un écran. Léopold Survage et Stan Brakhage en sont de bons exemples. Cette idée sera reprise et explorée largement avec l'invention des films couleurs et leur association à des bandes sonores, avec des artistes tels qu'Oskar Fischinger.

Léopold Survage s'est intéressé à la musique visuelle au travers de deux éléments qu'il considérait primaires : le son et la couleur. Il croyait que les mouvements d'application de la couleur devaient être donnés par le rythme de la musique, résultant de cette opération un « rythme coloré ». Concevant ensuite que le temps était un élément nécessaire pour redonner de la dynamique et du mouvement aux éléments visuels, Survage prépara une centaine de peintures²⁷ se succédant, avec l'idée de

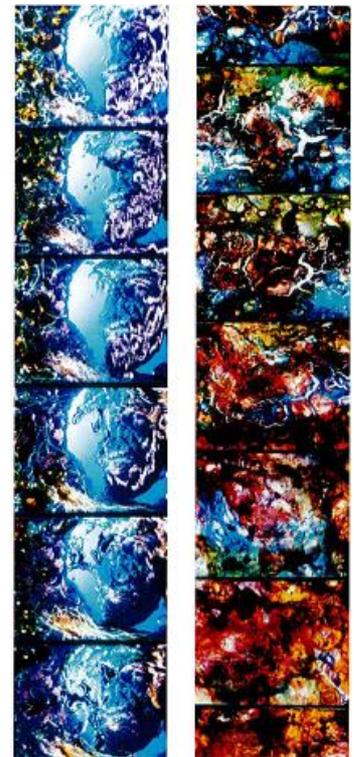


Figure 10 : Clichés de *Chartres Series*, Stan Brakhage, 1933

faire de ses séries un film. Mais avec l'approche de la première guerre mondiale, il fut obligé de vendre une quantité considérable de ses tableaux et ne pût jamais concrétiser son projet.

²⁷ Survage, *Colored Rhythm : Study for the Film*, 1913

Pour Stan Brakhage au contraire, l'écoute est soumise aux pulsations internes du corps. Son œuvre est donc soumise à un mouvement incessant – respirations, tremblements, agitations –, qui pourrait presque avoir un effet hallucinogène sur le spectateur. Il utilise rapidement la couleur pour avoir des effets optiques plus impressionnants et pour recréer plus facilement la vibration.

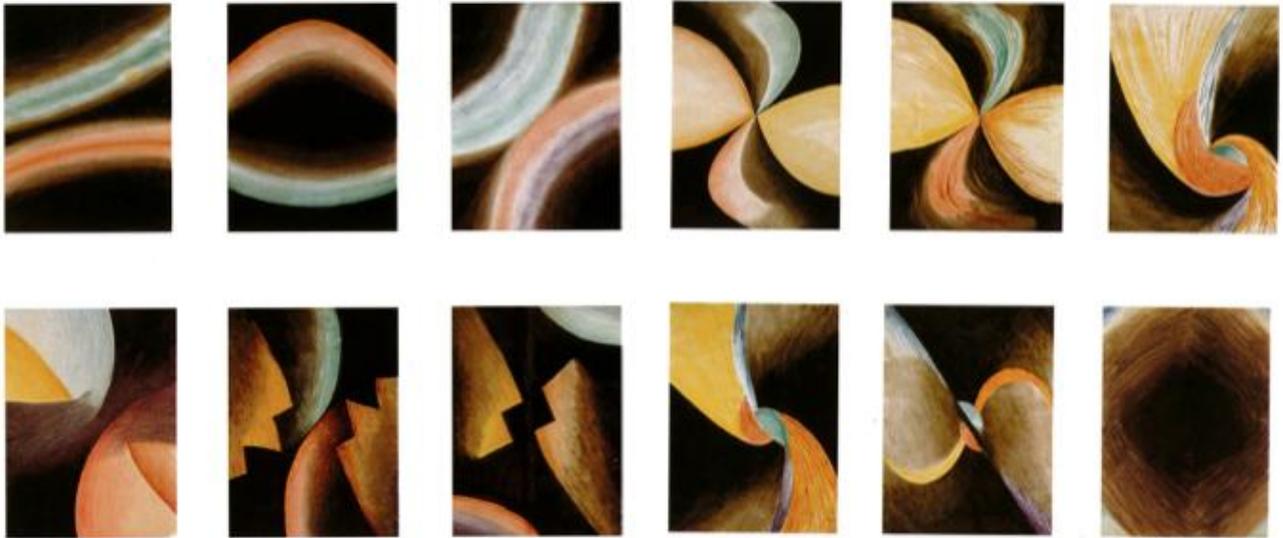


Figure 11 : Clichés de *Colored Rhythm*, Léopold Survage, 1913

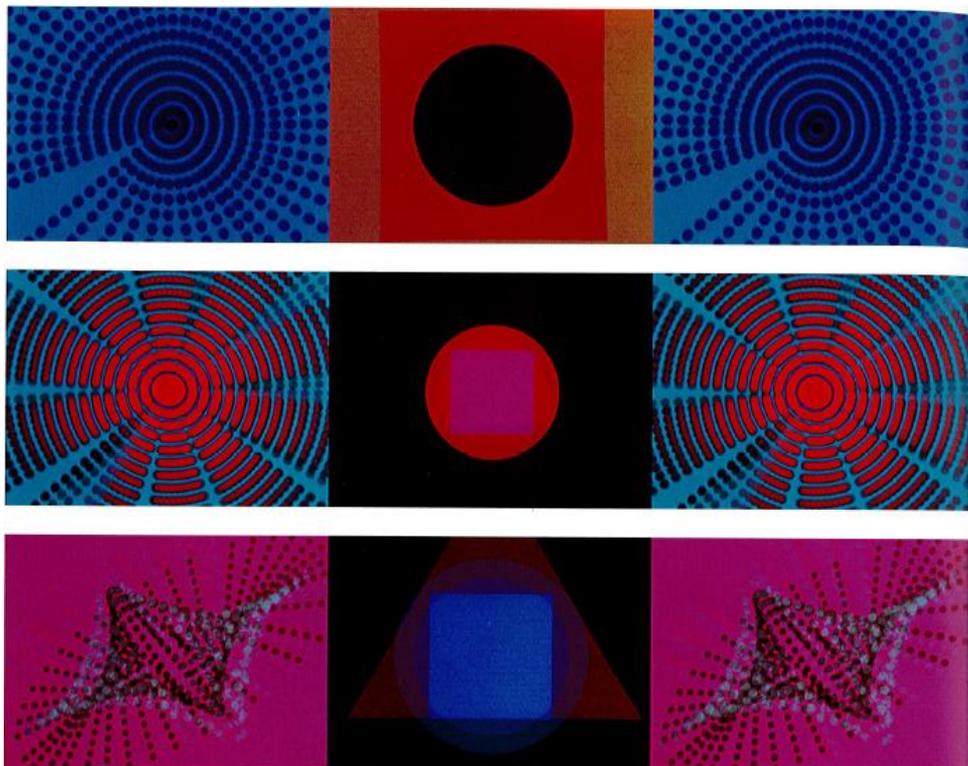


Figure 12 : Clichés de *Side Phase drift*, John Withney, 1965

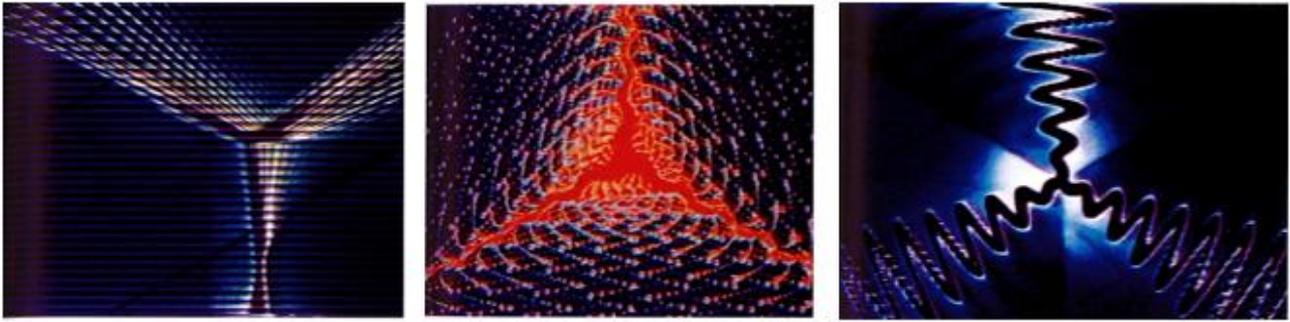


Figure 13 : Clichés de *Spirals*, Sadin, 1979

Le premier film abstrait est une création de Walter Ruttmann, *Lichtspiel Opus I* (1921). Il a photographié la conception d'une peinture à l'huile, coup de pinceau après coup de pinceau, parlant de « Malerei mit Zeit » (peinture avec le temps). Son œuvre est associée à une composition musicale, sur la partition de laquelle de nombreuses indications sont données aux musiciens pour se synchroniser parfaitement avec les éléments visuels du film.

Les premiers travaux d'Oskar Fischinger sont inspirés de ceux de Walter Ruttmann et Viking Eggeling. Avec l'idée d'un cinéma abstrait associé à une musique synchronisée qui permettrait de comprendre les visuels, Fischinger proposa ce qu'il voulut comme une expérience personnelle et non comme une représentation d'objets. *Radio Dynamics* échappe à la règle puisque la musique est supprimée, laissant aux formes et à la couleur le soin de les recréer dans l'esprit du spectateur.

Fantasia de Walt Disney, sorti en 1940 et largement inspiré des travaux de Fischinger, est l'exemple le plus connu de musique visuelle. C'est le film d'animation expérimental qui a complètement effacé la limite entre ce que l'on considère comme l'avant-garde et la culture de masse.

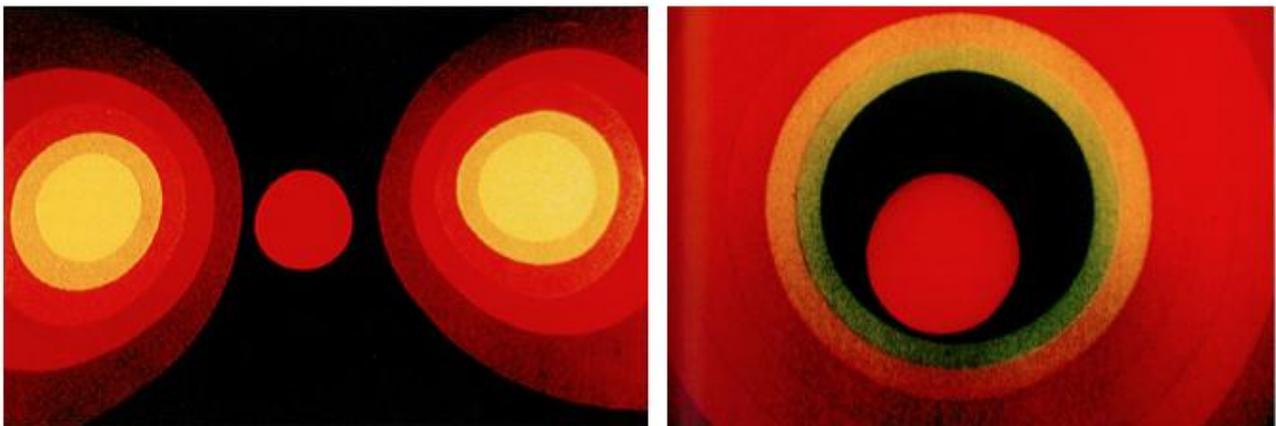


Figure 14 : Clichés de *Radio Dynamics*, Fischinger, 1942

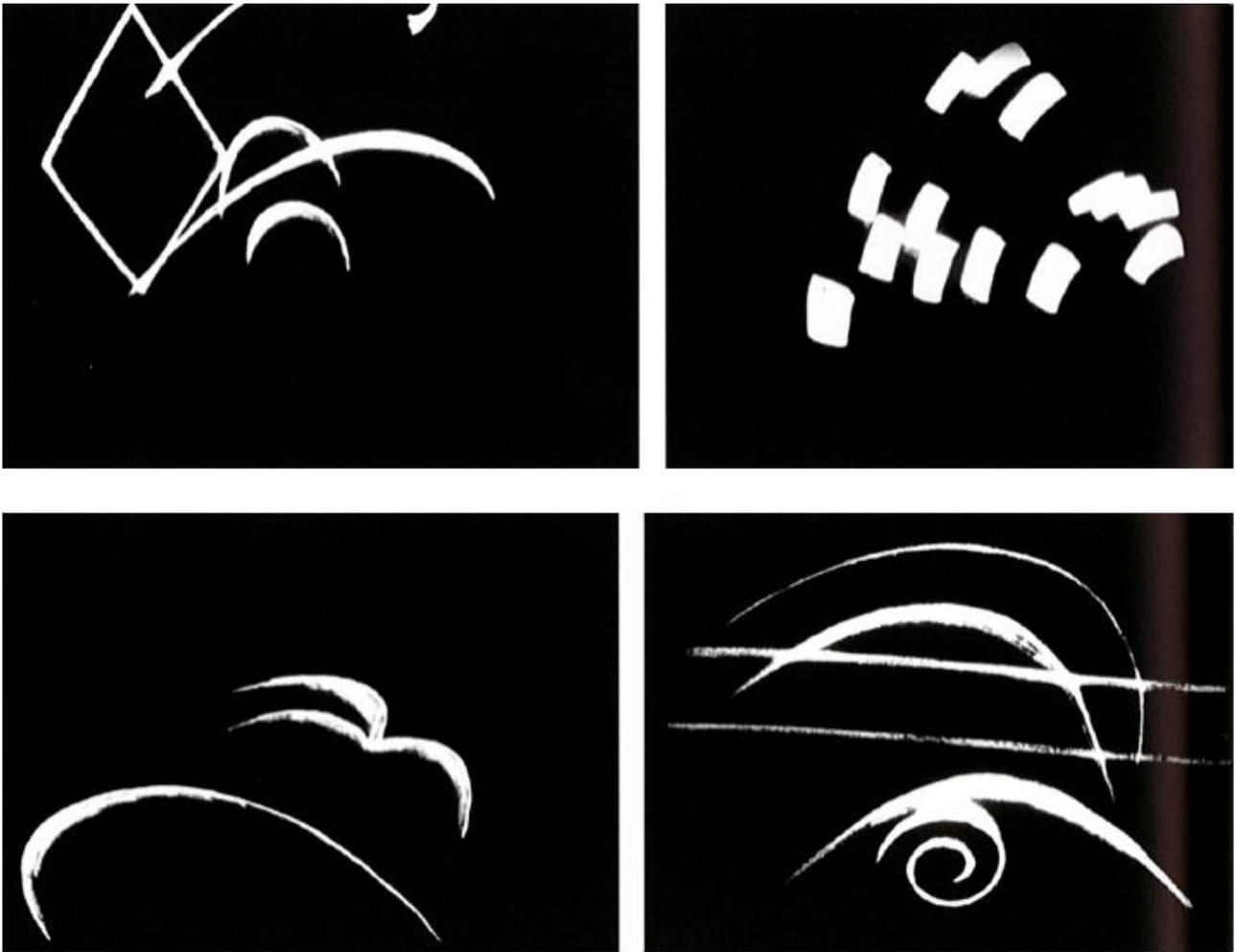


Figure 15 : Clichés de *Study Nr. 7*, Fishinger, 1931

Une autre idée est apportée par *Synchromy*, un film de Norman McLaren de 1971. Aucun instrument n'est source de la musique ; c'est McLaren qui a dessiné les sons, directement sur la piste sonore optique du film. On peut parler de « son animé » au sens premier du terme.

« Ça me fascine de constater que j'étais capable de dessiner le son sans pouvoir l'entendre ». McLaren

Le son dessiné de McLaren n'est pas sans rappeler le variophone (1932) de Yevgeny Scholpo et Georgy Rimsky-Korsakov, instrument qui permettait de dessiner optiquement un son sur une pellicule 35 mm grâce à des formes découpées dans des disques en carton.

Ce cinéma expérimental de Fishinger ou de McLaren a été anticipé par la mise en œuvre d'organes de couleurs (cf. partie I/ § 1c) qui permettaient la projection de lumières accordée sur de la musique. Ces instruments, inventés par Thomas Wilfred ou encore Vladimir Baranoff-Rossiné, sont toujours utilisés aujourd'hui dans les installations scénographiques.



Figure 16 : *Disque optophonique*, Baranoff-Rossiné, 1920

Kandinsky découvrit le travail de Baranoff-Rossiné en 1912. Ce dernier, intrigué par les parallèles entre musique et son, exposait son Piano optophonique, ou Optophone, instrument de projections lumineuses permettant d'associer intensité sonore et rythme du son aux éléments visuels.

Mais malgré les évolutions de la musique visuelle, certaines problématiques sont restées en suspens et ont trouvé leur résolution dans l'art numérique. Si les artistes ont toujours évoqué la synesthésie comme l'union des sens et potentiellement des arts, musique et arts visuels n'ont jamais pu ne faire qu'un avant.

« A characteristic of sound is that it is perceived as ambient, existing in and moving through space. While sound may be directional in origin, it can be perceived no matter what direction the listener faces : though the listener's movement through space can affect the quality and character of sound. By contrast, a painting requires a more-or-less fixed gaze to be perceived, as does a film. »²⁸

Une caractéristique du son est qu'il est perçu comme ambiant, existant et évoluant dans l'espace. Aussi directionnel soit-il à l'origine, il peut être perçu peu importe la direction dans lequel l'auditeur regarde, bien que ses mouvements puissent affecter la qualité et la nature du son. Par contraste, une peinture, comme un film d'ailleurs, requiert un regard plus ou moins fixe.

²⁸ Extrait de *Visual Music, Synaesthesia in art and Music since 1900*

2) Point de vue scientifique

a. Des outils de représentation du son

La visualisation du son est considérée comme évidente et commune dans son étude scientifique. Les différents modes de visualisation du son s'appuient sur ses caractéristiques physiques. Le son est un ensemble de vibrations mécaniques sinusoïdales qui se propagent sous la forme d'ondes.

Cette vibration se caractérise avec :

- une fréquence, hauteur d'une note ;
 - une période (spatiale) ou longueur d'onde, distance entre deux maxima d'intensité et
 - une amplitude, distance entre le maximum et le minimum d'un son.
- Classiquement, les outils de visualisation du son représentent une combinaison de la fréquence d'un son, son énergie et sa variation dans le temps.

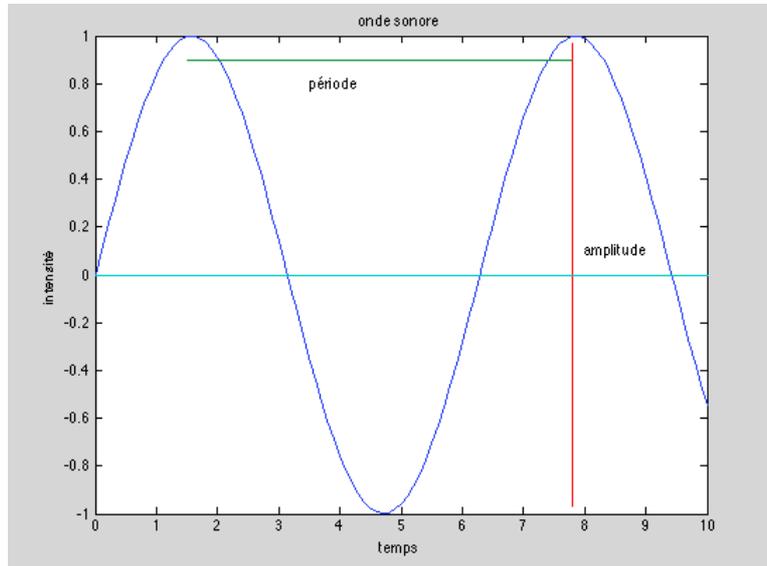


Figure 17 : Représentation physique d'une onde sonore

Deux outils scientifiques de visualisation du son peuvent être considérés comme les plus usités parmi les scientifiques et les techniciens du son.

La représentation temporelle du son permet de mettre en évidence l'évolution de son enveloppe dans le temps.

Sa représentation spectrale détaille sa composition fréquentielle, sa fréquence fondamentale et ses harmoniques. Elle s'appuie sur le théorème de Fourier

qui dit que toute fonction périodique peut être décomposée en fonctions élémentaires sinusoïdales. Mais cette représentation est limitée par l'imposition du discret, qui sera contournée par l'invention de technologies telles que le sonagramme notamment.

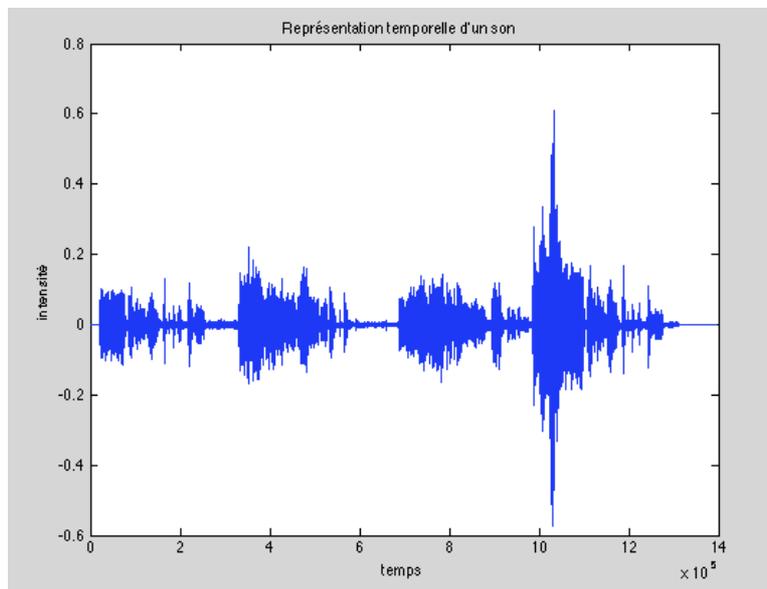


Figure 18 : Oscillogramme d'un son



Figure 19 : Sonographe des années 70

Le sonagramme, ou sonogramme, est également un mode de représentation lié à l'analyse fréquentielle du son. C'est une représentation en trois dimensions qui indique la fréquence et l'intensité en fonction du temps. A chaque fréquence (en ordonnée) correspond une intensité, indiquée par un trait plus ou moins épais de couleur et de luminosité variable.

Cet outil visuel a l'avantage de montrer l'évolution du spectre fréquentiel d'un son dans le temps.

Lors de l'invention du sonagramme, on utilisait un dispositif analogique appelé le sonographe ; de nos jours, on utilise une analyse de Fourier numérique avec une fenêtre que l'on fait coulisser dans le temps.

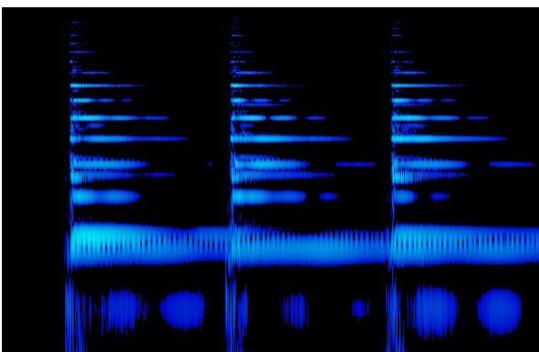


Figure 20 : Sonogramme du son d'une cloche

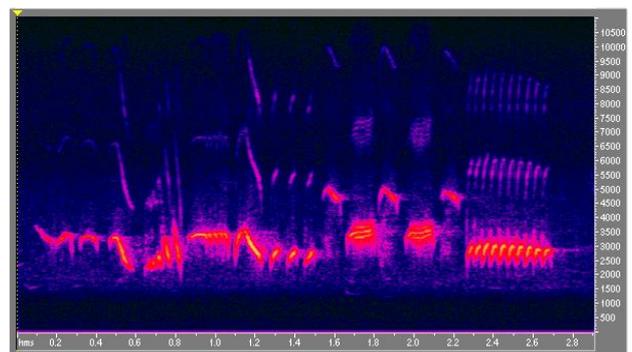


Figure 21 : Sonogramme du chant d'un merle

Le profil IDS est une réponse de Emile Leipp (1977) à un questionnaire concernant l'analyse du timbre des instruments ; en effet même si l'on peut reconnaître un instrument grâce à l'analyse de son spectre sonore par exemple, il sera moins facile de distinguer un Stradivarius d'un autre violon.

Le profil IDS (intégrateur de densité spectrale) est l'intégrateur temporel de la répartition d'énergie spectrale d'un son. L'IDS permet donc de découper en intervalles, en bandes de fréquences l'ensemble du spectre sonore audible (20 Hz à 20 kHz). On compte les bandes basse : 50 Hz à 200 Hz ; grave : 200 Hz à 400 Hz ; médium grave : 400 Hz à 800 Hz ; médium : 800 Hz à 1,2 kHz ; médium aigu : 1,2 kHz à 1,8 kHz ; aigu de 1,8 kHz à 3 kHz ; suraigu de 3 kHz à 6 kHz et stridence de 6 kHz à 15 kHz.

Mais cet analyseur repose sur les technologies analogiques et a vite été dépassé. Il a finalement été repris et largement modifié par Laurent Millot dans une version numérique qui s'appuie sur les systèmes de stockage, filtrage et captation numériques.

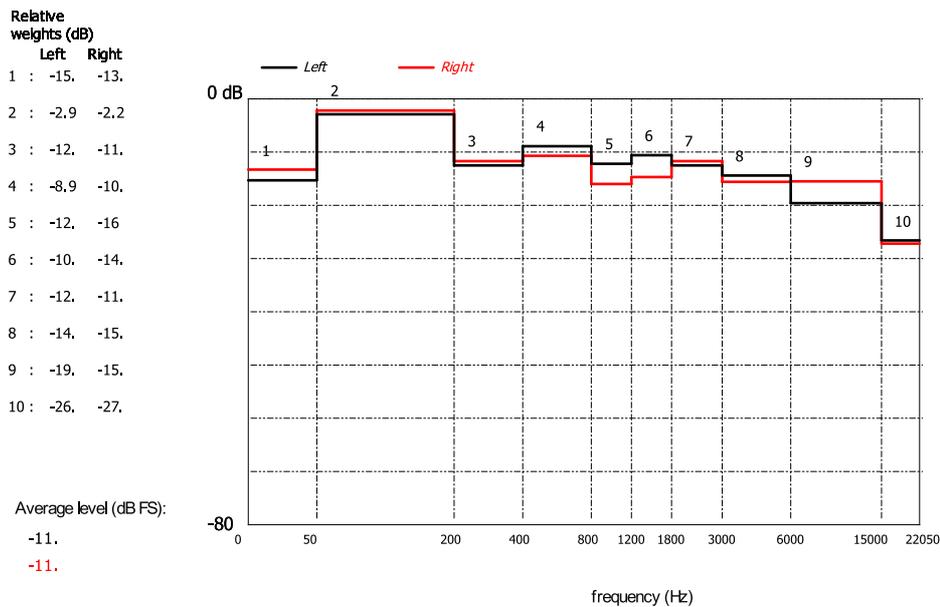


Figure 22 : Profil IDS d'un bruit rose diffusé à 75 dB par des enceintes Meyer et capté par un couple de micros de mesure Behringer

Bien avant l'invention du sonagramme ou de l'IDS, les chercheurs et musiciens cherchaient des moyens de visualiser le son, en s'intéressant toujours aux caractéristiques de ce dernier. Des études particulièrement intéressantes ont été menées sur la vibration sonore et donc sur le timbre et l'harmonie des sons. Aux XIX et XX^{ème} siècles, les expérimentations sont nombreuses, menées par des chercheurs comme Lissajous, Young ou encore Chladni.

b. Figures de vibration

C'est Lissajous qui est parvenu le premier à montrer les vibrations du son « par une élégante méthode de projection. Elle consiste à fixer un petit miroir à la face extérieure d'une des branches d'un diapason et à projeter sur ce petit miroir un rayon de lumière. Tant que le diapason est immobile, le rayon, après réflexion, forme sur un écran une image immobile ; quand au contraire, on fait vibrer le diapason, le rayon réfléchi vibre dans le même plan et trace sur l'écran une image allongée dont l'étendue est proportionnelle à l'amplitude du mouvement vibratoire. »²⁹



Figure 23 : Le tonographe de Holbrook

²⁹ *La science curieuse et amusante*, Ferdinand Faideau, 2012

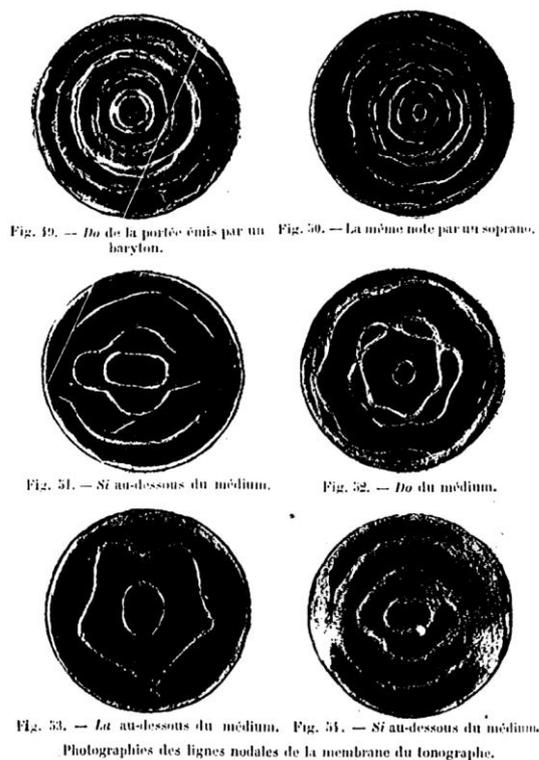


Figure 24 : Photographies de la membrane d'un tonographe excitée par différents sons

Suite aux expériences menées sur les figures de vibration, Henry Holbrook Curtis³⁰ fabrique un instrument d'analyse musicale des notes, le Tonographe. Il s'agit d'un tube dont l'une des extrémités est munie d'une embouchure et dont l'autre extrémité se termine en pavillon sur lequel est tendu une membrane en caoutchouc couverte d'une fine couche de sel.

Lorsque que l'on chante dans l'embouchure du Tonographe, une figure apparaît sur la membrane. Holbrook considérait qu'il s'agissait de « l'expression géométrique de la note chantée »³¹.

Pour une même note, jouée par un même instrument, la figure est toujours la même. Pour autant, les figures varient selon la tension et le diamètre de la membrane.

Si dans un premier temps, les figures vibratoires ont permis de prouver et de montrer concrètement le mouvement vibratoire du son, elles sont vite devenues des expérimentations pour l'établissement de lois sur la vibration. Le premier à entreprendre des recherches poussées sur l'acoustique est Ernest Chladni³².

« En 1785, j'avais observé qu'une plaque de verre ou de métal rendait les sons différents quand on la frappait sur différents points (...). Vers cette époque apparut dans les journaux la description d'un instrument construit en Italie par l'abbé Mazocchi composé de cloches que l'on faisait sonner au moyen d'un ou deux archets de violon. Ce fait m'inspira l'idée de recourir à l'archet pour examiner les vibrations différentes des corps sonores. (...) Les expériences sur les figures électriques à la surface d'un gâteau de résine, découvertes par Lichtenberg (...), me firent présumer que les différents mouvements vibratoires d'une plaque sonore pourraient se présenter sous des apparences différentes, si je répandais à sa surface du sable très fin ou quelque autre matière pulvérulente. Dans le premier essai de ce moyen, la figure qui s'offrit à mes yeux sur la plaque circulaire ressemblait à une étoile à dix ou douze rayons. »³³

³⁰ Holbrook, 1856 – 1920, oto-rhino-laryngologiste américain

³¹ *La science curieuse et amusante*, Ferdinand Faideau, 2012

³² Ernest Florens Frédéric Chladni, 1756 – 1827, physicien allemand, docteur en droit et philosophie

³³ Ernest Chladni, *Die Akustik*, 1802

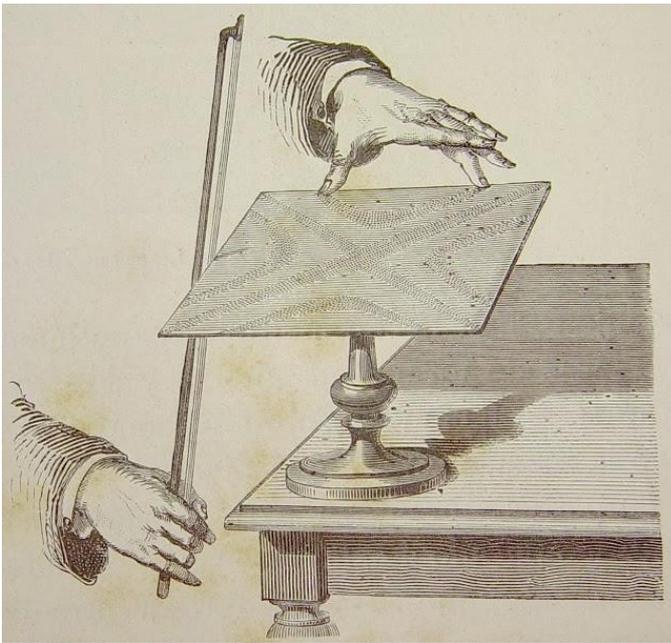


Figure 25 : Plaque vibrante d'après Chladni

Le principe des plaques vibrantes de Chladni est donc simple, il s'agit de rendre visible les vibrations sonores en versant du sable sur une surface solide vibrante. Les grains de sable se déplacent vers les lignes nodales, marquant les endroits où la vibration est nulle, on parle de nœuds de vibration. On étudiera la visualisation du phénomène de vibration sonore de manière plus détaillée en partie II/ paragraphe § 1.

Le nombre et la complexité des lignes varient en fonction de la forme de la plaque (carrée, triangulaire, circulaire, etc.), des sons (selon l'angle d'attaque de l'archet par exemple, de leur hauteur), etc.

On trouve une démonstration simple de cette expérience, réalisée au palais de la découverte en 2012, sur ce site web : <http://www.palais-decouverte.fr/index.php?id=2346>.

c. Timbre et harmonie

Thomas Young fit la même expérience que Lissajous avec son diapason en utilisant la persistance des impressions lumineuses et les oscillations de cordes, tuyaux, plaques, etc. Il met alors en évidence que la vibration d'une corde se produit sur plusieurs plans en créant des courbes plus ou moins complexes. Il en déduit qu'à partir d'une vibration, on produit une série de vibrations particulières, les harmoniques.

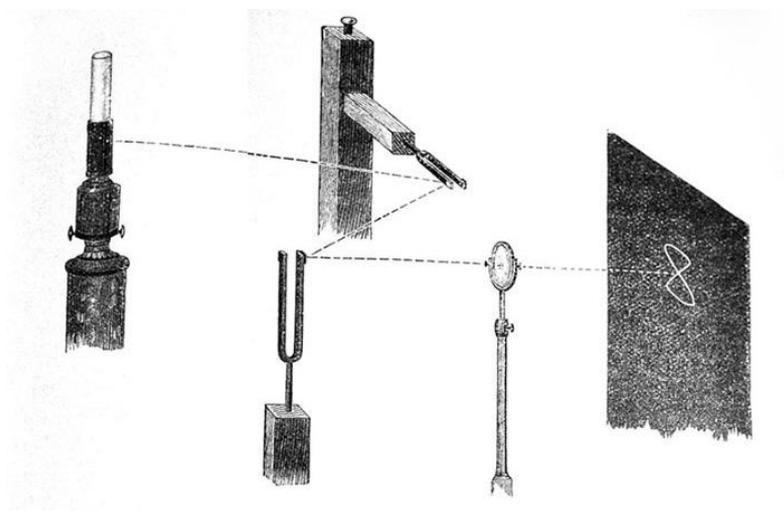


Figure 26 : Premier dispositif de visualisation des courbes de Lissajous

Les courbes de Bowditch (1815) et de Lissajous (1857) sont la trajectoire d'un point donné d'un mouvement sinusoïdal, un son par exemple. On obtient des figures différentes en fonction de l'amplitude des deux mouvements qui composent la sinusoïde (trajectoire horizontale et trajectoire verticale), du rapport de leur vitesse (variable verticale sur le schéma ci-dessous) et de leur déphasage (variable horizontale sur le schéma ci-dessous).

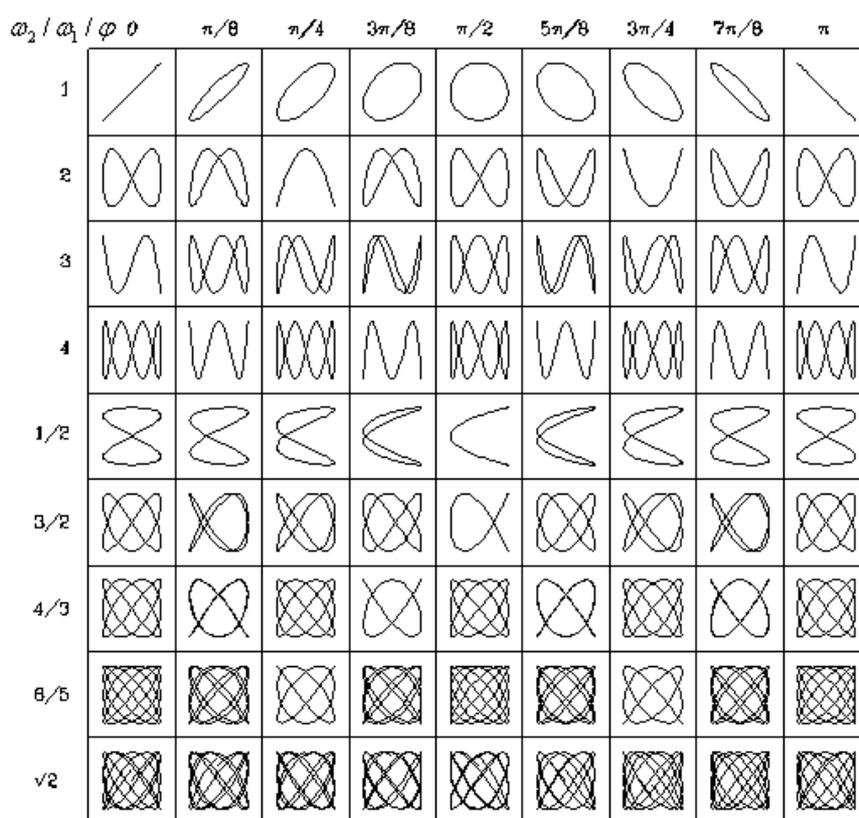


Figure 27 : Figures de Lissajous

Cette variable verticale liée à la période est donc également liée à la fréquence du son. D'un point de vue harmonique, un son est composé de sa fréquence fondamentale et de ses harmoniques, fréquences multiples de la fréquence fondamentale. Cette composition fréquentielle est visible sur le spectre sonore du son. Par exemple, le la_3 à $f = 440$ Hz, a pour deuxième harmonique $2 \times f = 880$ Hz, pour troisième harmonique $3 \times f = 1320$ Hz, etc. Ces associations d'harmoniques sont constitutives du timbre des instruments.

De la même manière, un intervalle musical est un rapport de fréquences entre deux sons. Ainsi les fréquences fondamentales associées à deux notes formant une tierce majeure ont un rapport de $5/4$ (intervalle entre le do_3 et le mi_3 par exemple). Une tierce mineure ($mi_2 - sol_2$) est un rapport de $6/5$; une octave 2 ; une quinte $3/2$, une quarte $4/3$, etc. On retrouve ici les rapports mis en évidence par Pythagore avec le monocorde

En 1882, Koenig³⁴ est à l'origine d'un appareil analysant le timbre des sons musicaux.

Cet appareil fonctionne grâce à deux fabrications de la même période : les capsules manométriques de Koenig et les résonateurs de Helmholtz.

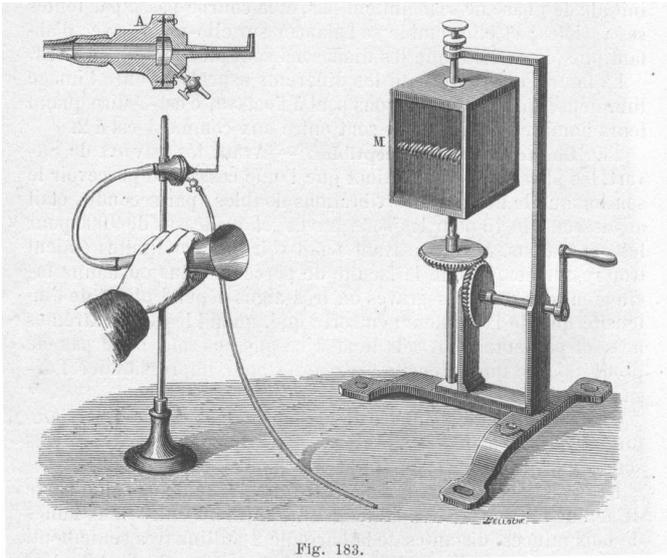


Figure 28 : Capsule manométrique de Koenig

Inventée en 1862, une capsule manométrique est un cylindre en bois creux comportant une ouverture et son embouchure, un tube en caoutchouc. A l'intérieur de la chambre formée par le cylindre, une membrane en caoutchouc vibre sous l'arrivée et le départ d'un gaz combustible par deux autres tubes dont l'un est terminé par un bec. Toute vibration sonore transmise depuis le tube en caoutchouc à la membrane intérieure fera varier la pression de gaz contenu dans la chambre. Le gaz sortant par le bec de combustion formera donc une flamme d'intensité variable.

Un résonateur de Helmholtz est constitué d'un socle de bois sur lequel sont disposés des cavités sphériques de tailles diverses. Chaque sommet et chaque base d'une sphère présente une ouverture destinée à recevoir le son. Dans ces sphères, appelées résonateurs, ne peut s'épanouir que la fréquence fondamentale d'un son, et leurs dimensions sont choisies de telle sorte que ces sons fondamentaux correspondent aux notes de musique.

Pour analyser le son produit à l'intérieur d'une sphère, l'auditeur pose l'une de ses oreilles sur les conduits des résonateurs les uns après les autres ne percevant ainsi que le son fondamental (les harmoniques étant devenus imperceptibles). Ce dispositif met en évidence la présence systématique d'une fréquence fondamentale d'un son, aussi complexe soit-il à analyser par l'oreille seule.



Figure 29 : Résonateurs de Helmholtz

³⁴ Rudolf Koenig, 1832 – 1901, maître luthier, chercheur dans l'étude de la science de la musique

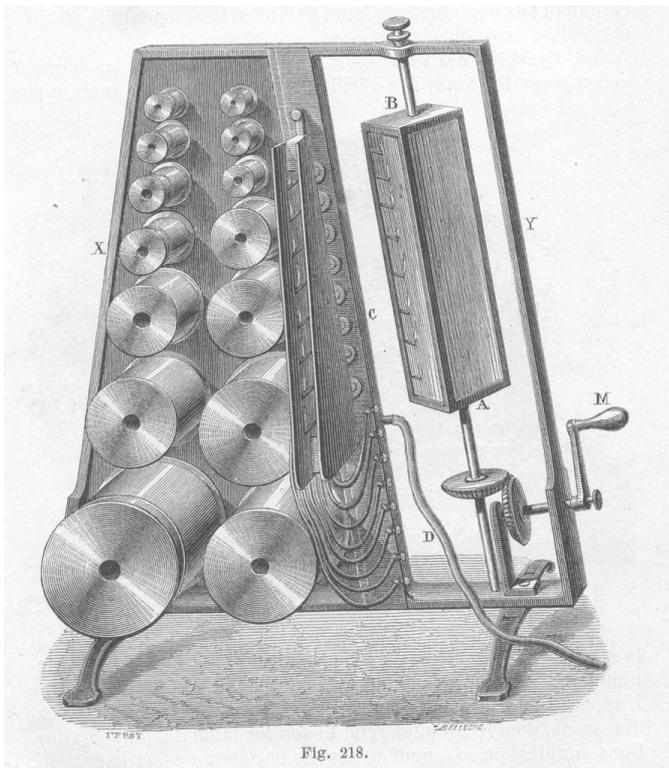


Figure 30 : Analyseur de son de Koenig

L'appareil de Koenig, mesurant un mètre de hauteur, est constitué de huit résonateurs de Helmholtz communiquant avec une capsule manométrique chacun par l'intermédiaire de tubes en caoutchouc; les becs de gaz des capsules étant alignés parallèlement à un élément supportant quatre miroirs tournant selon un axe horizontal grâce à une manivelle. La rotation plus ou moins rapide des miroirs permet de figer les mouvements de la flamme, de les décomposer et permettre ainsi la visualisation de l'état de repos ou d'agitation et l'intensité des flammes issues des becs de combustion associés aux différents résonateurs (qui entrent en vibration ou non).

Par exemple, on fait vibrer un diapason et on le passe ensuite devant l'embouchure des huit résonateurs. Seul le résonateur qui réagit à la fréquence du diapason résonne à son passage, agitant ainsi la membrane de la capsule manométrique associée. Et dans le miroir, seul le bec de gaz associé à cette capsule manométrique émet des flammes. S'il s'agit de sons plus complexes, l'intensité des flammes associées aux différents résonateurs permettra de déterminer les harmoniques principales du son.

Mais les recherches scientifiques et toutes les formules mathématiques qui en résultent, restent insensibles à l'écriture d'intentions ou d'interprétations nécessaires notamment à la musique. L'utilisation des représentations visuelles du son sous forme de graphique temps, fréquence, amplitude a ses limites pour les artistes, qui doivent toujours trouver de nouveaux moyens de s'exprimer et de conserver leurs créations. Face aux évolutions technologiques et musicales, même les partitions classiques deviennent surannées.

3) Convergence numérique

a. Partitions graphiques et logiciels de représentations graphiques pour l'analyse et le contrôle

Si la partition est un moyen ancestral d'archive des œuvres sonores, les expérimentations sonores, le fait de composer directement avec la matière sonore enregistrée sur un support, comme on le fait en musique électroacoustique, imposèrent la création de nouvelles représentations du son. La partition graphique, inventée par les compositeurs, apparaît donc à cette période et offre de nouvelles formes, de nouveaux graphismes pour pallier le problème de support visuel de travail. John Cage, Karlheinz Stockhausen et Iannis Xenakis notamment firent partie des compositeurs qui développèrent des méthodes de retranscription musicale, offrant plus de possibilités et laissant davantage de libertés par rapport aux partitions dites classiques.

A la même période, on cherche également des moyens d'automatiser cette transcription et le sonagramme devient un outil incontournable des logiciels d'aide à la composition et à l'analyse. Toujours développés et perfectionnés aujourd'hui, ces derniers sont devenus une étape presque nécessaire à la construction d'œuvres musicales. Ils proposent tous une association de visualisations scientifiques du son (oscillogramme, spectre sonore, etc.) et des représentations graphiques issues des partitions inventées par les compositeurs de musique électroacoustique et électronique.

L'acousmographe est un outil d'écoute, d'analyse et de représentation graphique des sons à laquelle on peut ajouter des annotations et des descriptions diverses à l'aide de calques de repères, de symboles, d'arrière-plans, etc. Logiciel édité par le Groupe de Recherches Musicales (GRM), avec le soutien du Ministère de l'Éducation, c'est en particulier un outil d'aide à l'analyse de musiques électroacoustiques, souvent non écrites, et à l'enseignement de la musicologie.

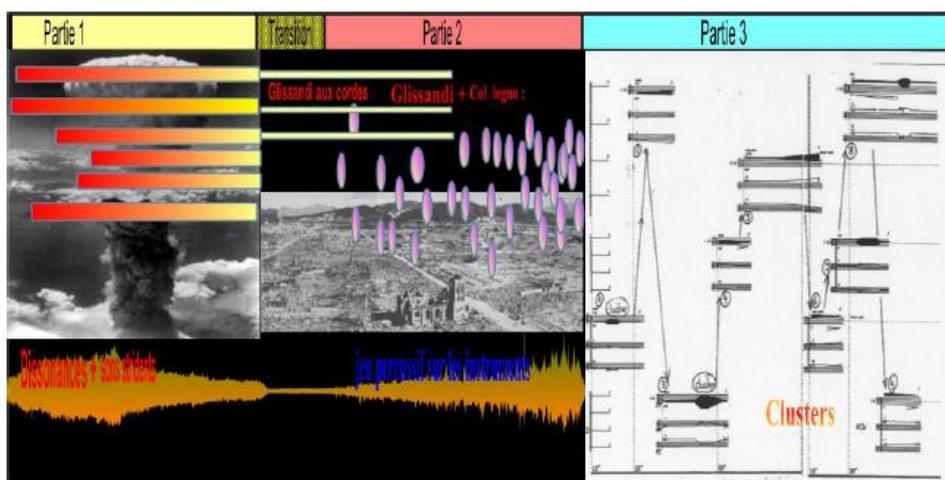


Figure 31 : Exemple d'utilisation de l'acousmographe³⁵

³⁵ Issu du *Tutoriel d'utilisation de l'acousmographe*, réalisé par J.C. Boudet en 2012

iAnalyse est une application d'aide à l'analyse ou la réalisation d'analyse musicale, créée par Pierre Couprie en 2009. Elle permet la synchronisation de partition avec des fichiers audio et vidéo, l'annotation avec des graphismes, textes, images, etc., ainsi que l'animation de ses annotations lors du défilement du curseur qui se déplace pour suivre le rythme de la partition.

Si le logiciel propose les représentations usuelles du son, forme d'onde et sonagramme, il offre également d'afficher la visualisation des variations de tempo, d'intensité, les changements de structure et de faire des diagrammes formels (introduction, développement, etc.).



Figure 32 : Impressions d'écran du logiciel iAnalyse de Couprie

b. Diverses approches de la relation entre image et son

Il est possible de questionner la relation entre image et son de manière très différente. Correspondance par synesthésie, relation de complémentarité utilisée notamment lors de créations intermédiaires ou transduction par le passage d'énergie d'un milieu à un autre. Autant d'approches qui rendent impossible de faire un résumé exhaustif de tout ce qui a été proposé en matière de visualisation du son à partir du XX^{ème} siècle. Voici quelques exemples de travaux qui montrent les idées sur lesquels chercheurs et artistes ont pu travailler.

Le travail de Steina et Woody Vasulka repose sur l'utilisation d'une caméra, de moniteurs vidéo et de synthétiseurs sonores.

« Les synthétiseurs de son nous ont aussi conduits aux oscillateurs. Il y avait là un autre moyen de produire des images après le feedback. Nous injectons des fréquences dans le moniteur pour étudier les modes d'interférence. Et nous

pouvions ajouter d'autres oscillateurs. En jouant de cette interaction – le son produisant de l'image –, nous avons compris qu'il y avait là un unique matériau : ce sont des voltages et des fréquences qui produisent des sons et des images. Cette unicité du matériau de base était pour nous la plus importante découverte avec l'interactivité. »³⁶

Ainsi est né la vidéo *Soundsize*, en 1974, sur laquelle « un motif de points générés est affiché sur un processeur de balayage. Les cycles aléatoires des tensions de contrôle d'un synthétiseur de sons permettent de contrôler à la fois la hauteur du son et la dimension de l'image. »³⁷

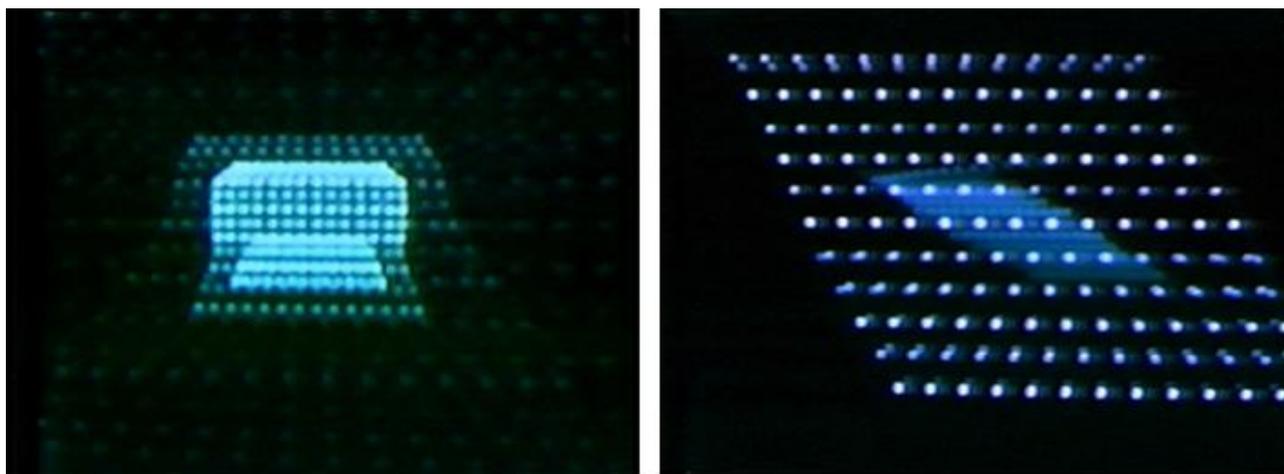


Figure 33 : *Soundsize* de W. & S. Vasulka

Illuminated Music (1972) de Stephen Beck et Warner Jepson est une série de performances issues d'un synthétiseur électronique et d'une vidéo-projection d'images de synthèse. Les compositions issues de l'association de ces deux instruments étaient considérées comme une forme de « jazz visuel » par son aspect de performance live.

« (...) J'ai passé à peu près deux ans à observer tout ce que je voyais de derrière la rétine, de derrière le globe de l'œil, depuis l'intérieur ; je suis finalement parvenu à un modèle graphique sur lequel asseoir les bases du synthétiseur. Une structure n'est utile qu'en fonction des objectifs qu'on lui assigne, et cette structure m'a permis de construire l'instrument. »³⁸

³⁶ Claudine Eizykman, Guy Fihman (sous la dir. de), *Steina et Woody Vasulka, vidéastes*, Paris, Ciné MBXA/Cinédox, 1984 (trad. P. Girard et D. Willoughby)

³⁷ Linda L. Cathcart (sous la dir. de), *Vasulka : Steina, Machine vision : Woody, descriptions : an exhibition*, Buffalo, Albright-Knox Art Gallery, 1978 (Trad. J.-F. Allain)

³⁸ Stephen Beck, dans Douglas Davis et Allison Simmons (sous la dir. de), *The New Television, a Public/Private Art*, Cambridge, The MIT Press, 1977 (Traduit par S. Roussel)

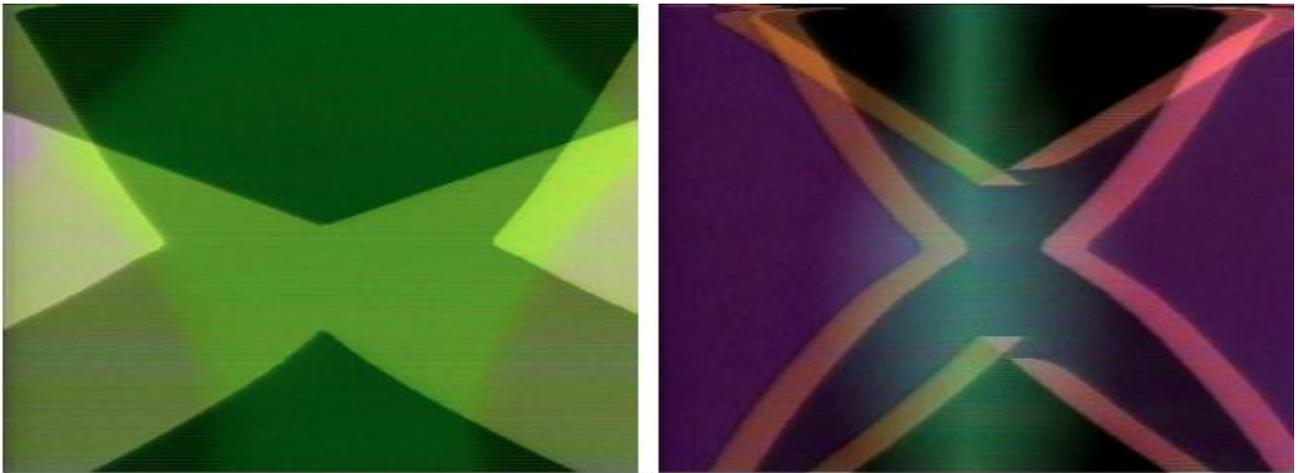


Figure 34 : *Illuminated Music* de Beck

Le Diatope de Iannis Xenakis, 1979, combine quatre formes d'art : musique, architecture, spectacle visuel et art numérique (la programmation). Œuvre électroacoustique autonome, c'est l'un des polytopes le plus connu de Xenakis, avec *le polytope de Cluny* sous-titré « actions de lumière et de son » (1972 - 1974) notamment.

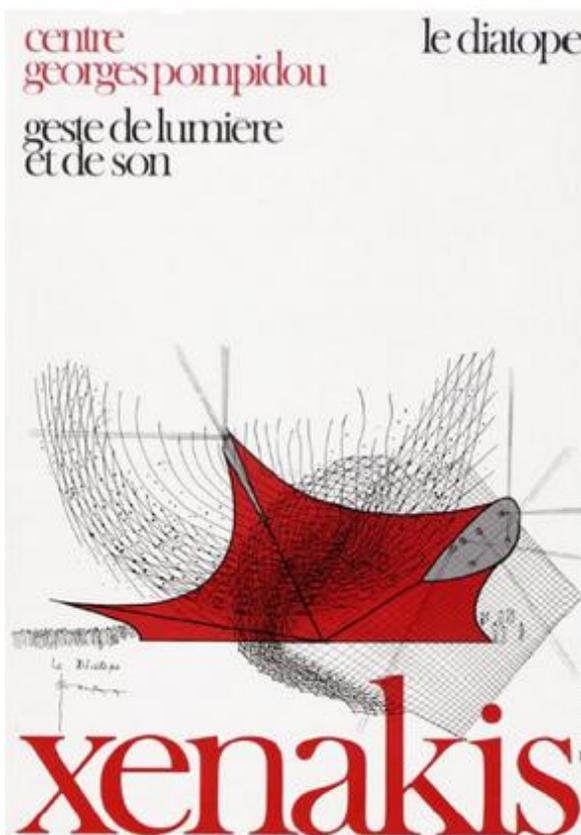


Figure 35 : Affiche de l'exposition *Geste de lumière et de son* au Centre Georges Pompidou en 1979

« La composition musicale, qui s'adresse à l'oreille, nous mène à la composition visuelle, qui s'adresse à l'œil. Le rayon laser et le flash électronique sont les équivalents visuels de sons techniquement réussis, etc. C'est créer une musique pour l'œil que de les faire briller dans l'espace, une musique visuelle, abstraite, qui rendrait accessible à l'homme – à l'échelle terrestre, naturellement – les galaxies, les étoiles et leurs transformations à l'aide de concepts et de procédures issus de la composition musicale. Ce qui en résulte est une nouvelle forme d'art visuel et auditif qui n'est ni le ballet ni l'opéra, mais véritablement un spectacle abstrait au sens où l'est une musique de type astral ou terrestre. »³⁹

³⁹ Iannis Xenakis, « La Légende d'Er (1ère version). Geste de lumière et de son du Diatope au Centre Georges Pompidou », dans *Centre Georges Pompidou-Xenakis, Le Diatope : geste de lumière et de son*, Paris, Centre Georges Pompidou, 1978

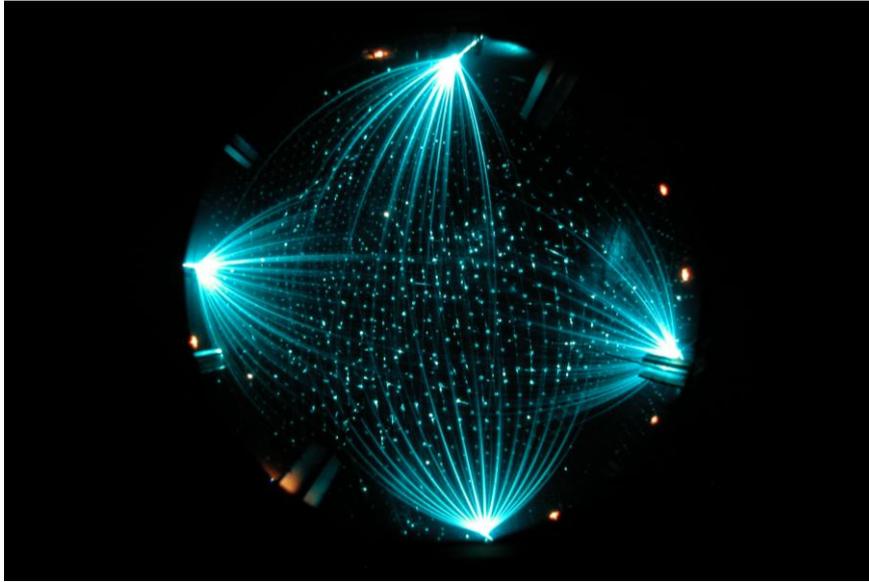


Figure 36 : Photo prise lors du spectacle de Xenakis *La légende d'Eer*

Avec le développement des moyens numériques, une nouvelle effervescence pour les musiques visuelles relance les questionnements sur les alliances entre image et son. Il permet notamment une convergence des médias, des supports, des systèmes d'écriture, des opérations, etc. qui facilitent et donnent un nouveau relief aux compositions audiovisuelles.

Voici quelques exemples de réappropriation de la visualisation du son à l'aide de logiciels de programmations.

c. Convergence numérique des supports et opérations de traitements

L'intention de Martin Wattenberg avec *The shape of song* (2001) est de visualiser la structure de la musique, produisant des images statiques révélant ses caractéristiques. Les technologies n'étant pas encore assez évoluées, *The shape of song* n'est pas une visualisation en temps réel du son. Les spectateurs pouvaient rappeler une musique préenregistrée ou apporter un fichier midi pour fabriquer leur propre visualisation. Le logiciel est fabriqué dans l'idée de révéler les répétitions des passages musicaux, analysant et associant à chacun, des arches translucides colorées.



Figure 37 : *The shape of song*, Wattenberg

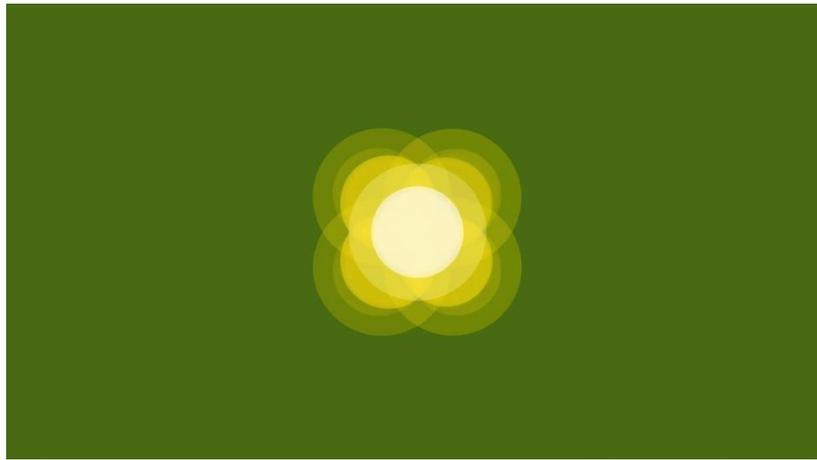


Figure 38 : *The Beach Bells* de Chen

En utilisant une relation mathématique pour relier la circonférence d'un cercle à la hauteur de la voix et en associant un cercle à chaque note d'un morceau, Alexander Chen propose une visualisation des harmoniques de la voix des Beach Boys dans leur titre *You still believe me*⁴⁰. En utilisant de la même manière Processing (logiciel de programmation) et Ableton Live (séquenceur Midi), il avait créé une visualisation avec des lignes de la suite pour violoncelle n°1 de J.S. Bach⁴¹ en 2011.

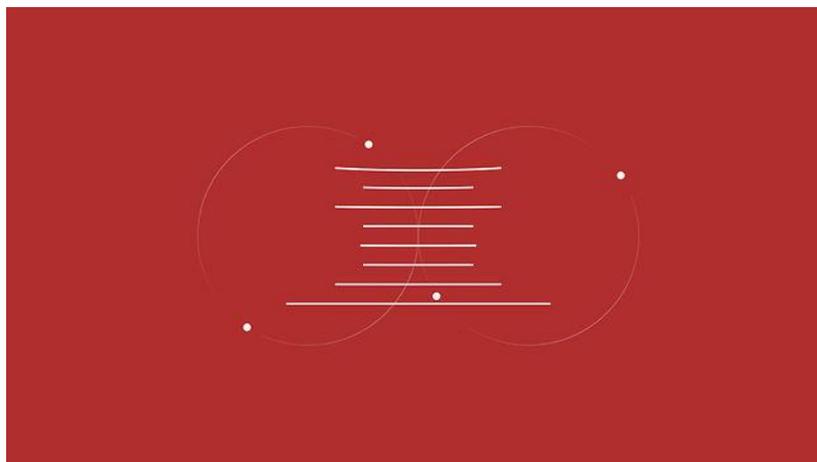


Figure 39 : *Strings* de Chen

Grâce au logiciel de programmation Processing, de l'interface OpenGL et à l'impression 3D, le studio Realität transforme des albums de musique en des objets physiques. Il s'agit d'interpréter graphiquement les musiques choisies. L'algorithme de conversion des fréquences sonores de *Microsonic landscapes* a déjà été appliqué sur cinq albums dont *Für Alina* de Arvo Pärt ou encore *Third* de Portishead. Malheureusement les artistes actuels gardent secrets leurs concepts de fabrication ; il est donc difficile d'expliquer plus avant de quoi est constituée cette visualisation.

⁴⁰ *Beach Bells : You still believe in me* : <http://vimeo.com/69633166>

⁴¹ *Strings : J.S. Bach – Cello Suite No.1 – Prelude* : <http://vimeo.com/31179423>

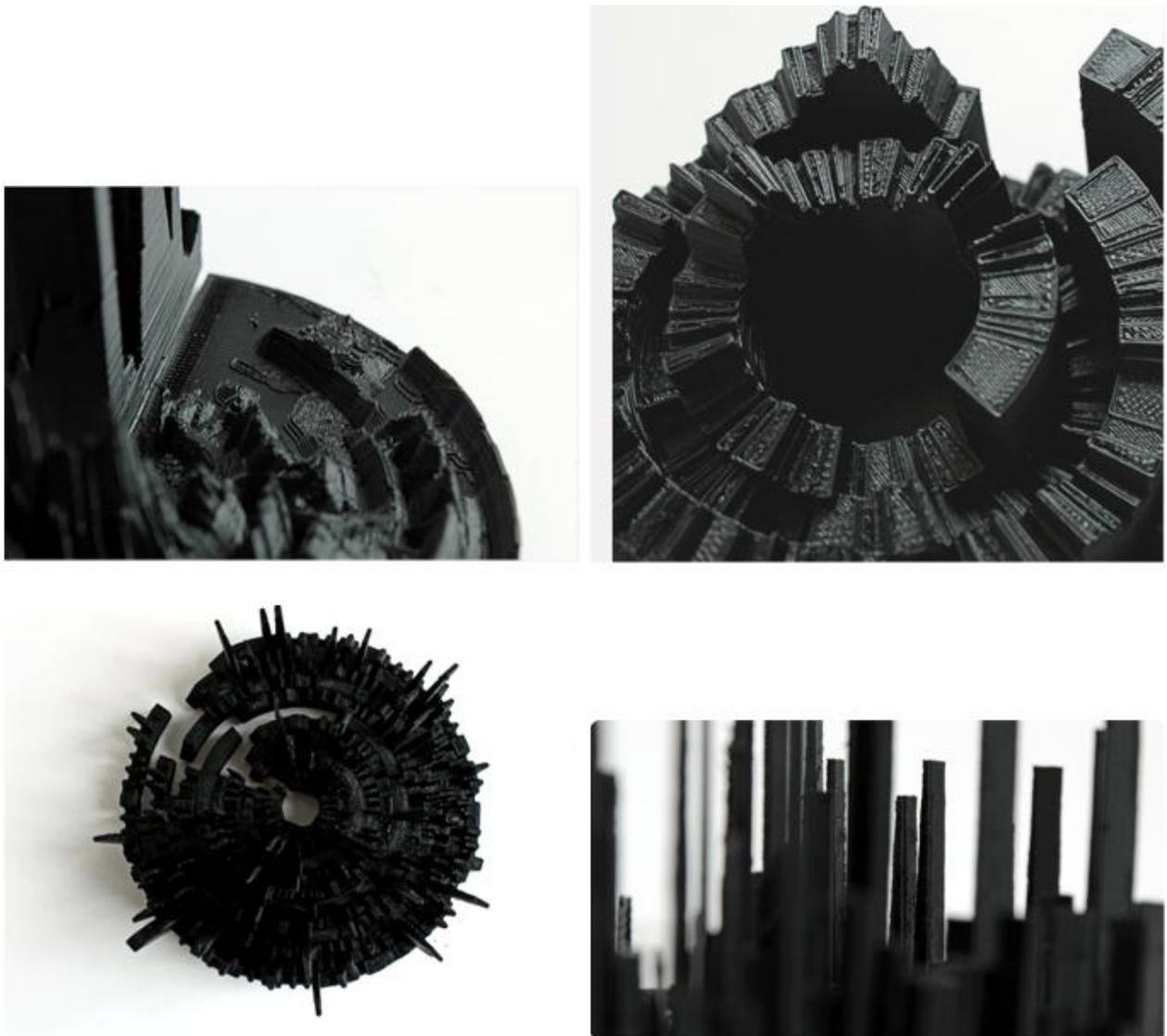


Figure 40 : *Microsonic Landscapes de Realität*

Dans le monde de la scénographie et de l'installation numérique, la visualisation du son est toujours très présente. *Optronica, hybridations visuelles et sonores*, est un festival biannuel qui propose régulièrement des expositions avec des artistes continuellement nouveaux, uniquement sur le principe de la musique visuelle, de la synergie entre éléments sonores et visuels, etc. Une de leurs dernières expositions a notamment eu lieu au Cube, centre de créations numériques à Paris.

II/ ETUDE DES CYMATIQUES

1) Présentation

a. Le son, un phénomène de vibration

« Une vibration est un mouvement des particules d'un milieu élastique de part et d'autre d'une position d'équilibre. »⁴² Il s'agit donc d'un mouvement périodique défini par une fonction du temps. Cette fonction peut être résumée en la superposition de mouvements sinusoïdaux, chaque mouvement évoluant à une fréquence multiple du mouvement fondamental.

« Le son est une sensation auditive produite sur l'organe de l'ouïe par la vibration périodique ou quasi-périodique d'une onde mécanique propagée dans un milieu élastique, en particulier dans l'air. »⁴³

Le son est donc une onde de vibration mécanique qui se propage dans les milieux élastiques (cordes, solides, liquides, gaz) et qui ne se propage pas dans le vide. L'oscillation, mouvement vibratoire du son, est longitudinale car elle s'effectue dans la direction de la propagation de l'onde.

Tous les éléments produisant des sons, instrument à corde ou à vent par exemple, font vibrer l'air. Cette vibration éventuellement amplifiée, par la caisse de résonance d'un piano par exemple, arrive à l'oreille qui transforme cette vibration, ce mouvement périodique, en un signal physiologique.

La période d'un son caractérise sa hauteur. Par exemple le la_3 du diapason correspond à la fréquence de 440 Hz, soit à un motif qui se répète quatre cent quarante fois par seconde. La force du son dépend de son amplitude (différence entre le maximum et le minimum de l'onde de vibration produite). Le timbre du son est ce qui permet de différencier une note émise par une clarinette de la même note émise par un hautbois. Il est constitué d'un ensemble de fréquences, multiples de la fréquence fondamentale du son. Pour une note émise par une guitare par exemple, cette fréquence fondamentale dépendra de la longueur de la corde, de ses caractéristiques (masse notamment) et de la tension à laquelle elle est soumise. Si le la de la guitare vibre à une fréquence fondamentale de 440 Hz, ce sont ses fréquences multiples appelées harmoniques qui donneront en partie son timbre à l'instrument, ce dernier étant aussi déterminé par les partiels⁴⁴.

Les fréquences propres, i.e. l'ensemble fréquence fondamentale et ses harmoniques, correspondent aux vibrations qui n'ont pas besoin d'excitation extérieure continue pour exister, une impulsion seule suffit. C'est le principe des résonateurs de Helmholtz (cf. partie I/ § 2c).

⁴² Larousse

⁴³ Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL)

⁴⁴ Fréquences non multiples de la note fondamentale. Fréquences inharmoniques. Les attaques des instruments percussifs, transitoires, sont constituées en majorité par des partiels.

La vibration d'une corde peut être décrite par une fonction du temps et de l'espace : lorsqu'une corde vibre, elle prend une infinité de positions dans le temps. Elle oscille notamment entre deux positions extrêmes $P(x)$ et $-P(x)$, or toute vibration a une position d'équilibre, celle où $P(x)$ et $-P(x)$ s'annulent. Les points en position d'équilibre du système sont appelés nœuds de vibration. Les points du système qui décrivent l'amplitude maximum sont appelés ventres de vibration.

L'équation des ondes en une dimension (une corde par exemple) s'écrit : $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$ où c est la célérité du son et $u(x, t)$, le mouvement par rapport à l'équilibre avec $t > 0$ et $x \in \mathbb{R}$. C'est le problème de Cauchy.

La solution initiale de l'équation est solvable telle que $u(x, t) = g(x)$ et $\frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = h(x)$ avec $x \in \mathbb{R}$. Soit $g \in \mathcal{C}^2(\mathbb{R})$ et $h \in \mathcal{C}^1(\mathbb{R})$, alors il existe une unique solution $u \in \mathcal{C}^2(\mathbb{R} \times \mathbb{R}_+)$, donnée par la formule d'Alembert :

$$u(x, t) = \frac{1}{2} [g(x + ct) + g(x - ct)] + \frac{1}{2c} \int_{x-ct}^{x+ct} h(y) dy \quad 45$$

Pour transférer le problème sur deux dimensions (sur les plaques par exemple), il faut résoudre le problème de Cauchy sur \mathbb{R}^3 avec la formule de Poisson.

Soit $g \in \mathcal{C}^3(\mathbb{R}^2)$ et $h \in \mathcal{C}^2(\mathbb{R}^2)$, alors l'unique solution $u \in \mathcal{C}^2(\mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}_+)$ est donnée par :

$$u(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{2\pi c} \int_{y \in B} \frac{g(y) dy}{\sqrt{c^2 t^2 - |x - y|^2}} \right] + \frac{1}{2\pi c} \int_{y \in B} \frac{h(y) dy}{\sqrt{c^2 t^2 - |x - y|^2}}$$

où B désigne le disque de centre x et de rayon ct .

L'unique solution $u \in \mathcal{C}^2(\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}_+)$ du problème de Cauchy, en trois dimensions (pour l'eau par exemple) est telle que :

$$u(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{4\pi c^2 t} \iint_S g(x) dS \right] + \frac{1}{4\pi c^2 t} \iint_S h(x) dS \text{ avec } g \in \mathcal{C}^3(\mathbb{R}^3) \text{ et } h \in \mathcal{C}^2(\mathbb{R}^3)$$

où S est la sphère de centre x et de rayon ct .

On appelle unidirectionnelle, une onde qui se propage dans une seule direction. On peut distinguer deux types de propagation : longitudinale (les points de l'onde oscillent dans la direction de propagation) dans le cas des tubes acoustiques ; et transversale (les points de l'onde oscillent perpendiculairement à la direction de propagation) dans le cas des cordes.

Une corde est un milieu élastique qui est mis en tension entre deux points d'appuis. Pour une guitare par exemple, les cordes reposent sur un chevalet qui transmet le mouvement vibratoire de la corde à la caisse de résonance.

⁴⁵ On reconnaît deux ondes progressives : aller et retour.

Pour la fréquence fondamentale du son, ou encore appelée premier mode de vibration de la corde, la corde prend la forme d'un fuseau, qui oscille autour de sa position d'équilibre. Pour le second mode de vibration de la corde, celle-ci prend la forme de deux fuseaux. On note que le point au milieu de la corde ne bouge pas, il s'agit donc du nœud de vibration. Pour le troisième mode de vibration de la corde, celle-ci prend la forme de trois fuseaux, et comptera deux nœuds de vibration situés au tiers de la corde.

Dans un tube acoustique, le milieu de propagation est l'air. Les ondes sonores progressives font des allers et parfois des retours dans le tuyau. La combinaison particulière de certaines ondes allers et ondes retours donne naissance aux ondes stationnaires, provoquant la résonance du tuyau.

Pour la fréquence fondamentale, le tuyau comptera une zone de pression maximum, soit un ventre de vibration. Pour le deuxième mode de vibration, le tuyau comptera deux zones de pression maximum, soit deux ventres de vibration et un nœud au centre du tuyau, etc.

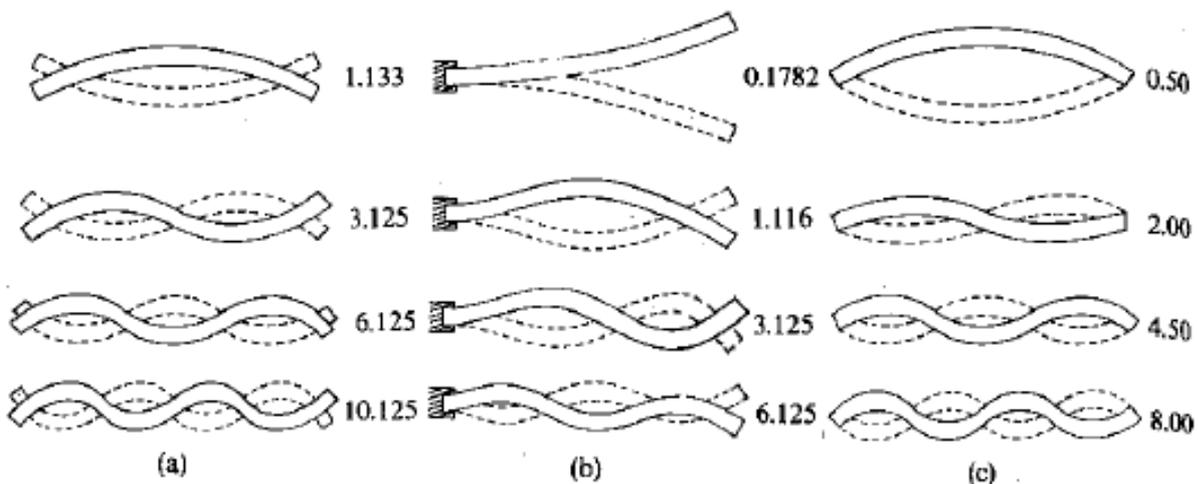


Figure 41 : Schéma de la vibration d'une corde (une dimension)

Lorsque l'on s'intéresse les systèmes de vibration à deux dimensions, il faut considérer en plus la raideur du matériau et la forme de la plaque ou de la membrane. De plus, la vibration va dépendre de la manière dont est fixée la plaque (ses extrémités sont-elles libres ou non).

Comme avec une corde ou un tuyau, il est possible d'établir les lignes nodales des plaques ou membranes en vibration. Le mode de vibration est désigné par un couple d'entiers (m, n) et comporte $m + n - 2$ lignes nodales.

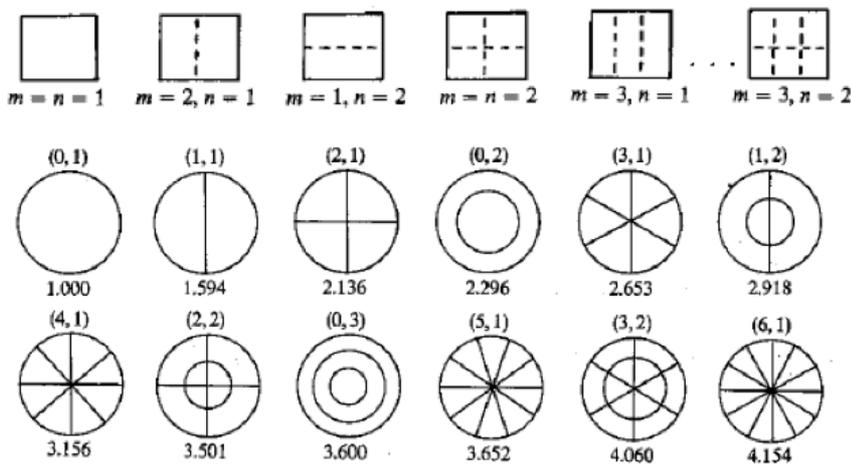


Figure 42 : Lignes nodales

La superposition de deux modes est possible si ceux-ci ont la même pulsation, s'ils sont en harmonie. Le schéma ci-dessous explique la logique d'addition de deux figures. Sur les deux figures à superposer, on donne le signe + ou - à chaque partie (de la plaque) formée par les lignes nodales, de sorte que deux parties adjacentes n'aient pas le même signe. Les lignes nodales nouvelles se forment en joignant les points des deux figures précédentes qui n'ont pas le même signe au même endroit.

Pour la première ligne par exemple, le point tout en haut à droite, sur la première figure est +, il vaut - sur la deuxième. Le point tout en bas à gauche est de la même manière + sur la première figure et - sur la deuxième. Ainsi sur la figure nouvelle formée par la superposition des deux modes, il existera une ligne nodale allant d'en haut à gauche jusqu'en bas à droite.

Par ailleurs, la forme des figures variera également selon la forme de la plaque. Sur la figure 45 ci-dessous, on observe que pour un couple (2,0), plus la plaque est carrée, plus les centres des deux lignes nodales se rapprochent jusqu'à se toucher. Pour un couple (0,2), plus la plaque est carrée, plus les centres des lignes nodales s'écartent vers les centres des côtés des carrés jusqu'à former un carré à l'intérieur du carré.

Sur ce schéma, pour les plaques carrées, m et n désignent également le nombre de ventres verticaux et horizontaux ; pour les plaques rondes m et n correspondent aussi au nombre de diamètres nodaux et de cercles nodaux, le chiffre du dessous à la fréquence.

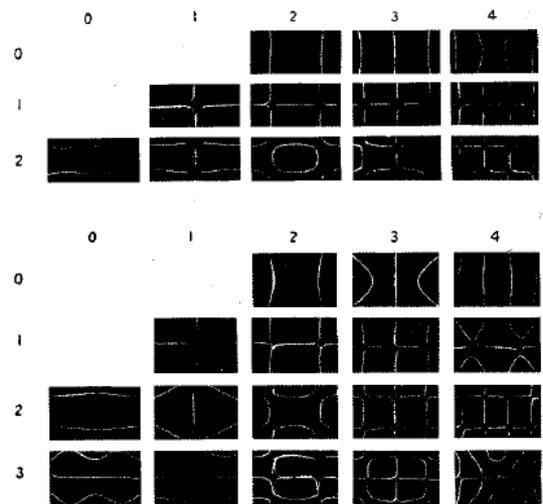


Figure 43 : Figures de vibration fonction de m et n

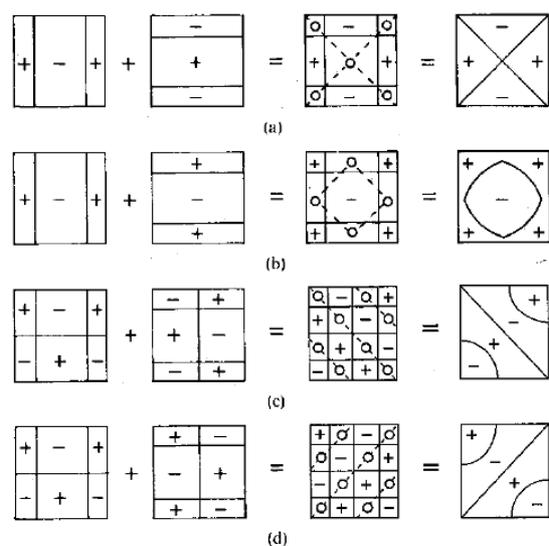


Figure 44 : Mélange de deux figures

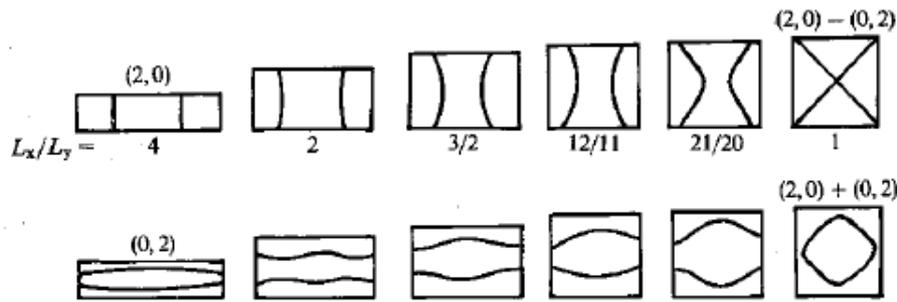


Figure 45 : Figures de vibration (2,0 et 0,2) fonction de la forme de la plaque de vibration

Chaldni avait émis une formule établissant un lien entre la fréquence, m et n : $f = (m + 2n)^2$. Mais cette équation a été de nombreuse fois remise en question au fil des siècles.

L'expression la plus juste est une équation différentielle qui admet autant de fonctions dérivées qu'il y a de modèles de figure dont les inconnues sont la taille des plaques, leur matière, leur forme, la fréquence diffusée et son intensité notamment. Si pour une et deux dimensions elle reste solvable, à trois dimensions (figures aqueuses par exemple) sa résolution est très complexe, même avec des connaissances mathématiques poussées. C'est la raison pour laquelle aucun modèle physique n'a encore été établi.

b. Découverte des cymatiques

La cymatique est, d'après Hans Jenny, l'étude de la vibration sonore rendue visible, notamment à la surface d'une plaque ou d'une membrane. Ce terme, inventé par le physicien Hans Jenny, vient du grec *kuma* tourbillon, vibration.

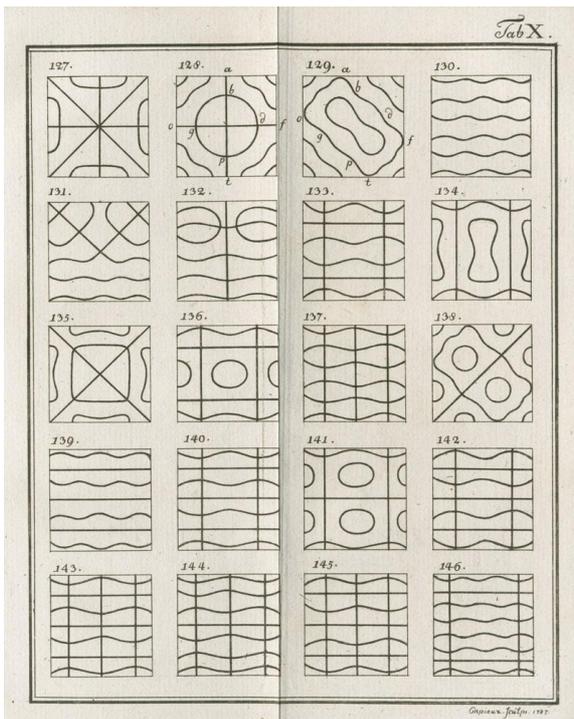


Figure 46 : Figures vibrantes (plaque carrée)

On pourrait accorder la première référence aux cymatiques aux tribus africaines qui utilisaient les peaux de leurs tambours, couvertes de grains, pour prédire l'avenir.

Léonard de Vinci (1452 - 1529) et Galilée (1564 - 1642) décrivaient l'apparition de stries parallèles et équidistantes ou celle de monticules de diverses formes après avoir frappé sur une table poussiéreuse ou gratté sur des plaques en cuivre.

Mais ce n'est qu'en 1680 que Robert Hooke, scientifique anglais, conçoit le premier appareil simple composé d'une plaque de verre recouverte de farine, qu'il jouait avec un archet de violon et qui permettait ainsi de visualiser la vibration.

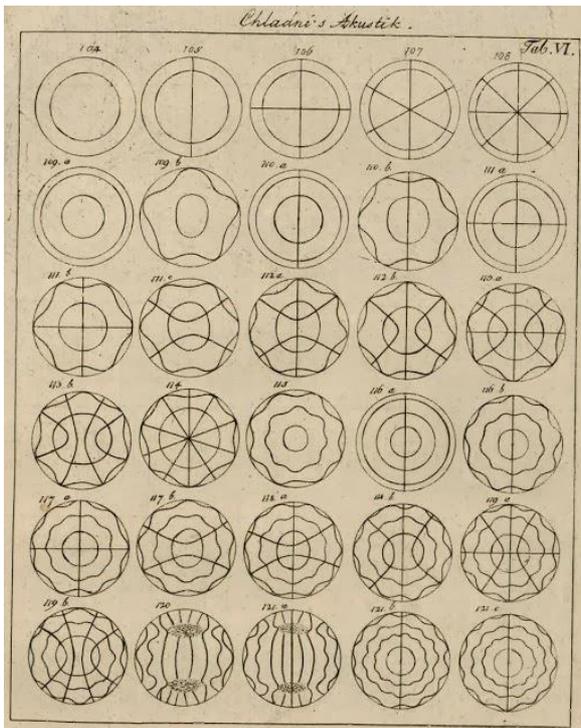


Figure 47 : Figures vibrantes (plaque ronde)

S'il eut sans doute accès aux travaux de Hooke, c'est Ernst Chladni qui sera considéré comme le père de l'acoustique, puisqu'il y consacra la plupart de ses recherches (cf. partie I/ § 2b).

Il fut invité par Napoléon à faire la démonstration de ses découvertes, qui fut si impressionné qu'il sponsorisa une compétition avec l'Académie Française des Sciences pour obtenir une explication du phénomène.

Les figures de Chladni sont la mise en évidence du phénomène de vibration. Les plaques et le sable permettent de visualiser l'équivalent des ventres et des nœuds de vibration, appelées dans ce cas-ci lignes nodales. Quand la plaque vibre sous l'effet du son, les points de la plaque situés le long des lignes nodales ne

bougent pas contrairement aux autres points de la plaque. Le sable vient donc s'y déplacer jusqu'à ne plus se mouvoir, ce sont les point d'équilibre de cette plaque. En s'accumulant ainsi, le sable dessine les lignes nodales, formant des motifs, les figures de Chladni.

Mais s'il est facile de calculer les fréquences propres d'une corde, cela s'avère beaucoup plus complexe pour une plaque, à l'exception de plaques de certaines formes (les carrées⁴⁶ et les rondes⁴⁷ notamment). D'où la complexité d'établir des modèles physiques ou mathématiques quant à l'apparition des figures.

Le chimiste et physicien anglais Michael Faraday étudia en 1831 ce qu'il appela « crispations ». Son journal enregistre de nombreuses expériences dans lesquelles il étudia les effets des vibrations avec de l'eau, de l'huile et des grains fins. Faraday, fasciné par ces phénomènes, en fit la démonstration lors d'audiences à l'institution royale. Après lui, John William Strutt Rayleigh, prix nobel de physique en 1904, accorde un chapitre aux vibrations des plaques dans son traité majeur *Theory of Sound*. En 1885, Margaret Watts-Hughes invente l'Eidophone, dispositif composé d'une chambre de résonance en bois avec une extrémité ouverte à travers laquelle a été tendue une membrane en caoutchouc couverte de sable. Cet instrument permet de visualiser « l'empreinte de la voix » et n'est pas sans rappeler le Tonophone (décrit en partie I/ § 2b). Après elle, Mary Waller, professeur de physique à Londres, reprend le travail de Chladni et écrit *Figures de Chladni, une étude de la symétrie*, qui sera publié à titre posthume en 1961.

⁴⁶ Ernst Chladni, *Entdeckungen über die Theorie des Klanges*, 1787

⁴⁷ Ernst Chladni, *Akustik*, 1802.

Hans Jenny, physicien suisse, étudia de manière intensive la visualisation du son. Il publia notamment deux livres sur les cymatiques en 1967 et en 1972, riches d'images et de descriptions de ses expériences. Il approche les cymatiques en utilisant des cristaux piézo-électriques pilotés par un oscillateur électronique qui n'existaient pas encore à l'époque de Mary Watts-Hughes. Les transducteurs piézo-électriques ont été en mesure d'exciter les plaques sur une bande de fréquences plus large. Cela a permis l'étude de fréquences plus élevées, qui conduisent à la création de figures bien plus complexes.



Figure 48 : Mary Desirée Waller

Alexander Lauterwasser, chercheur et photographe, construisit son travail à partir de celui de Hans Jenny, s'intéressant à la phénoménologie des formes créées par les effets du son sur l'eau. Il les compare notamment aux formes produites dans la nature, la morphogénèse des animaux et des plantes.

Le musicien écossais Thomas J. Mitchel a longuement étudié le plafond de la chapelle de Rosslyn, près d'Edimbourg, célèbre pour ses sculptures mystérieuses. Le musicien établit que ces dernières sont associées aux cymatiques et que les sculpteurs, ayant eu accès aux études de Chladni, ont voulu écrire de la musique dans la pierre. On a ainsi pu traduire la musique puis l'interpréter avec des instruments de musique traditionnelle médiévale en 2006.

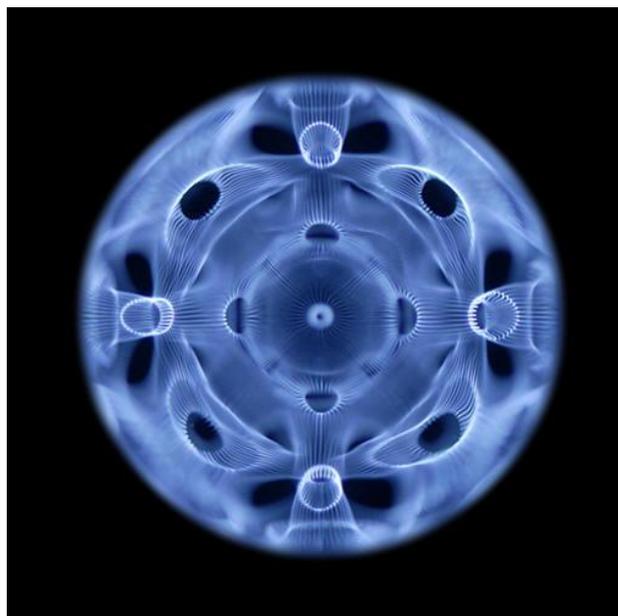


Figure 49 : Image issue du CymaScope

En 2002, John Stuart Reid et Erik Larson inventent le CymaScope, instrument rendant visible le son, en reprenant les idées de Hans Jenny. Il se veut aussi un outil de recherche dans différents domaines de la science : de l'astrophysique à la zoologie (il permet notamment l'étude des sons émis par les dauphins).

Mais si les études menées avec le CymaScope sont limitées, c'est parce que personne jusqu'ici n'a entrepris de recherches poussées pour établir des modèles mathématiques ou physiques afin de prévoir l'apparition de telle ou telle forme. S'il est plutôt clair que certains éléments les influencent, formes, propriétés des membranes, viscosité des fluides en vibration, aucune fonction ou équation n'a pu être établie. John Stuart Reid fait partie des personnes qui continuent les études de nos jours pour percer le mystère.

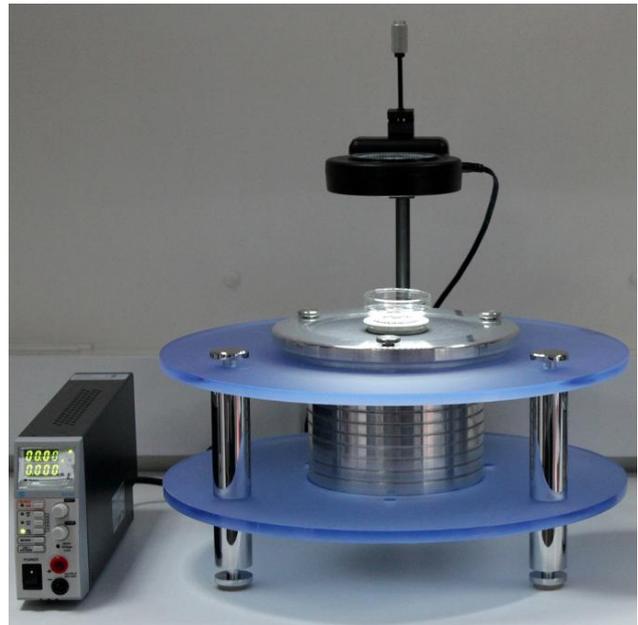


Figure 50 : Le CymaScope de John Reid

De nos jours, on retrouve parfois les cymatiques dans des travaux artistiques comme dans le travail de scientifiques danois. Ils diffusent du son sur une plaque de métal percé d'une multitude de minuscules cavités alignées. Par ces dernières sort du gaz à la manière de l'appareil de Helmholtz, le résultat permettant en outre de visualiser des figures de Chladni en jeu.

Des explications de la fabrication et une vidéo de démonstration est disponible à ce lien : <http://thecreatorsproject.vice.com/blog/danish-scientists-visualize-dubstep-through-fire>

c. Observations sur les expériences de Jenny



Figure 51 : Hans Jenny

« They are images of reality and as such are also real. (...) But they are derived from reality ; they are outside that which really exists ; and the latter is more, much more, than the formula. »

Ce sont des images de la réalité et en tant que telles sont également réelles. (...) Mais ce sont des dérivées de la réalité, en dehors de ce qui existe réellement ; et cela les rend meilleures, bien meilleures que n'importe quel phénomène.

L'observation est un processus sans fin car après avoir observé et décrit, on peut encore étudier ses observations. Pour simplifier son étude, principalement basée sur la perception et l'empirisme, Hans Jenny a choisi d'analyser le phénomène de vibration dans son ensemble, comme un tout. Chercher à décrypter les éléments le constituant les uns après les autres aurait supprimé le sens premier de ces visualisations. Dans ses livres, Jenny analyse donc les paramètres de ses expériences, leurs résultantes, etc.

Lors de ses expériences, Hans Jenny utilise notamment des cristaux piézo-électriques pilotés par des oscillateurs électroniques. Il pouvait ainsi connaître la fréquence et les amplitudes auxquelles il soumettait une plaque ou une membrane. Il produisit un nombre considérable de figures qu'il comparaisait en série.

Pour visualiser au mieux ses figures, Jenny utilisait la méthode schlieren, en illuminant l'eau par dessous pour rendre des structures visibles. Il utilisa également le stroboscope, source de lumière intermittente qui permet d'observer les phénomènes périodiques ; la fréquence d'un tel phénomène est trop élevée pour être vu par l'œil qui ne perçoit pas la discontinuité. Il colora également les matières, en usant notamment des encres de couleurs dans l'idée toujours de faire apparaître les mouvements de matière.



Figure 52 : Utilisation de l'encre pour révéler les mouvements vibratoires

Hans Jenny résume les cymatiques, l'étude de la vibration, en trois éléments principaux et indissociables : la périodicité, la formation de motifs et le processus dynamique.

La périodicité est très présente dans la nature : mouvements de la mer (houles, seiches, marées), monde végétal, monde animal, etc. Or à toute périodicité, s'associent rotations, pulsations, turbulences, circulations, respirations, oscillations, etc.

La vibration, l'onde périodique, est le principe de création des figures. S'il n'y a pas de son, il n'y a pas de figures et à partir du moment où il y a vibration, il y aura phénomène et donc figure. Même avec une plaque oblique sur laquelle on aurait disposé une masse pâteuse, cette dernière ne glissera pas tant que la vibration existera.

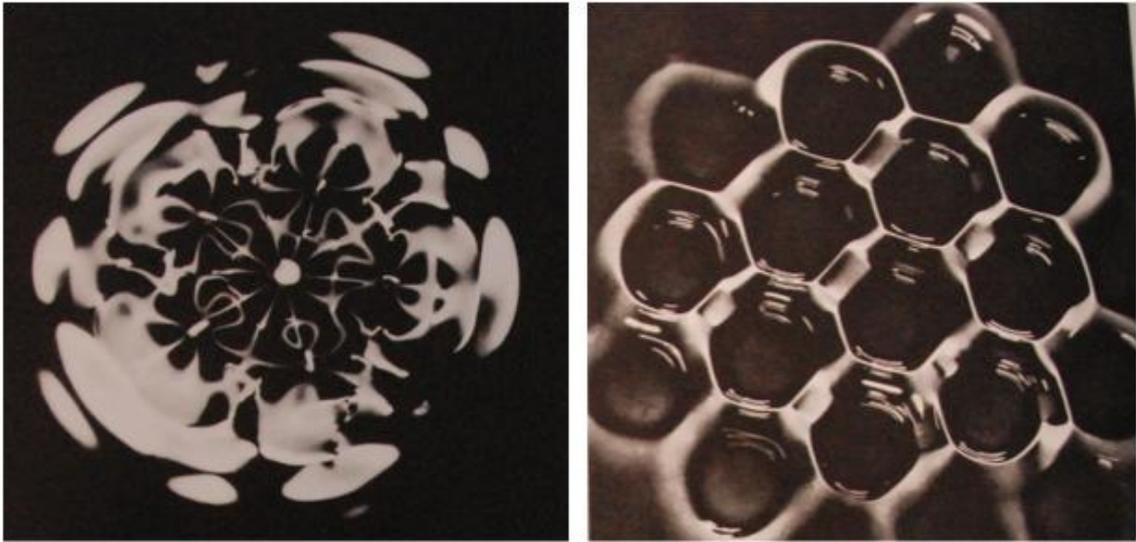


Figure 53 : Motifs de fleur et de ruche

Les figures qui apparaissent dans le sable ou dans l'eau ont en commun l'ordre, la régularité, la symétrie axiale, la rondeur, le caractère défini des motifs qui la composent. Les figures qui apparaissent sont des lobes, toujours de formes arrondies. On compte parmi elles des hexagones, des fleurs, des ruches, des réseaux, des treillis, etc. On y trouve parfois des réminiscences des figures de Lissajous.

Il est également notable que, pour un son continu et pour une même configuration d'expérience, un motif concentrique et radial apparaîtra sur un support rond, et un motif aux lignes parallèles et/ou diagonales, pour un support rectangulaire.

Il faut aussi s'intéresser aux transitions entre les figures ; le sable, bougeant comme un fluide, rend visible les interférences. Elles se traduisent en mouvements opposés pendant une transition, avant qu'apparaisse un motif prédominant.

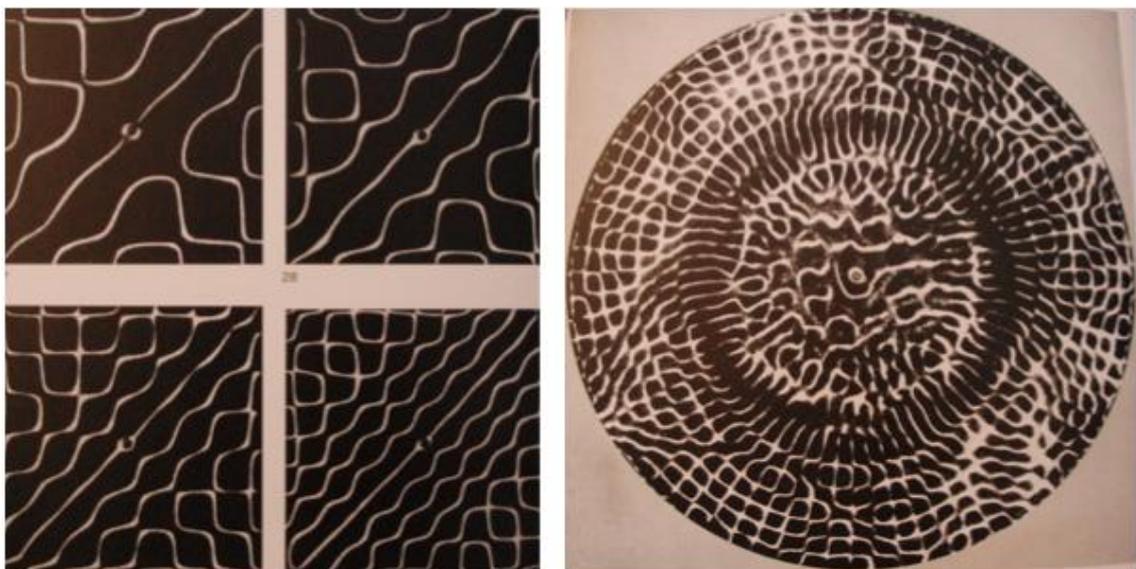


Figure 54 : Motifs sur plaque carrée et plaque ronde

Le nombre incalculable de figures originaires de la vibration est dû au choix des fréquences, de leur association, au changement de leur amplitude mais aussi aux caractéristiques des liquides, des matières, leur quantité et l'épaisseur du diaphragme ou de la plaque.

Plus une fréquence est élevée, plus le nombre d'éléments dans une figure augmentera. Plus un son est fort, plus de lignes de la vibration seront révélées : une amplitude plus importante induit un relief plus marqué, notamment au centre des plaques.

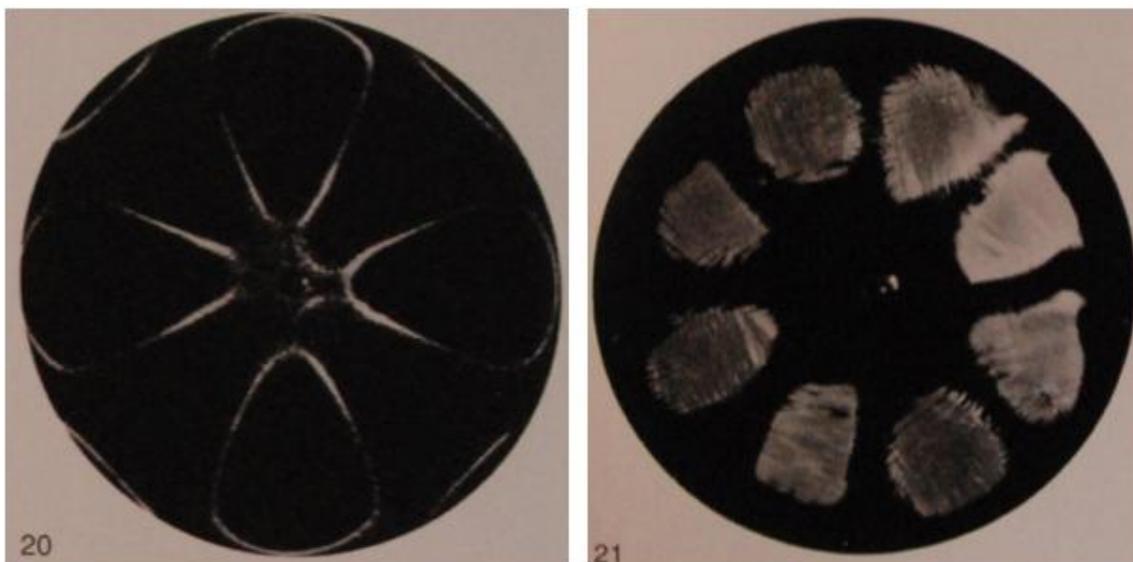


Figure 55 : Figures sonores avec du sable et de l'eau pour une même fréquence

De la même manière, les liquides et le sable ne réagissent pas de la même manière à la vibration. Le liquide met en évidence les ventres quand le sable indique les lignes nodales (figure 55).

Pour finir, aucune plaque ou diaphragme n'est jamais parfaitement uniforme. Ainsi les figures n'apparaissent pas toujours complètement. Parfois, cela va jusqu'à la création de formes variantes ; notamment lorsqu'un élément devrait être fermé et séparé des autres en temps normal, il apparaît ouvert et/ou lié à d'autres éléments (figure 56).

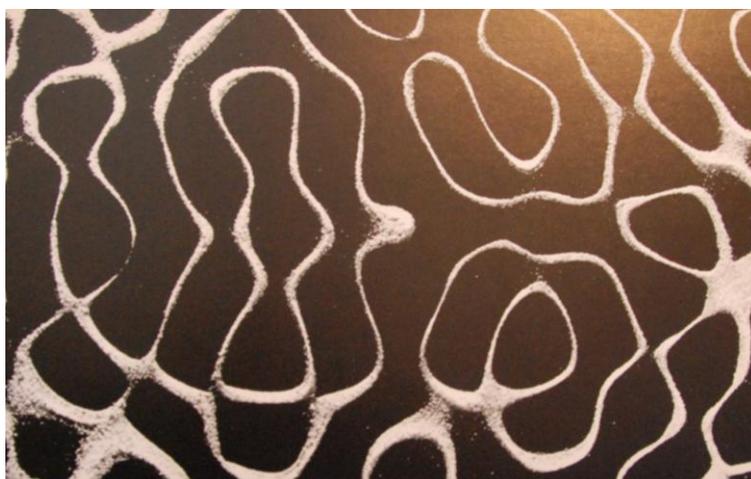


Figure 56 : Apparition de nouvelles formes due à la non-uniformité de la plaque

D'autres formes peuvent également apparaître si on utilise d'autres matériaux ou que l'on ajoute à l'expérience un champ magnétique. Cette idée a également été explorée par Jenny qui a essayé de mettre en vibration des masses ferromagnétiques dans un champ magnétique notamment. Les formes qui en résultent s'apparentent à des spirales et il suffit de changer un tant soit peu les caractéristiques du champ magnétique pour que les formes évoluent.

Jenny utilisa par ailleurs des compositions hybrides, en rendant par exemple une masse ferromagnétique plus visqueuse ou en y ajoutant du plastique. A nouveau, de nouvelles formes apparaissent, plus complexes les unes que les autres (des formes d'œuf de pigeon par accumulation de matière avec la solution plastique par exemple).

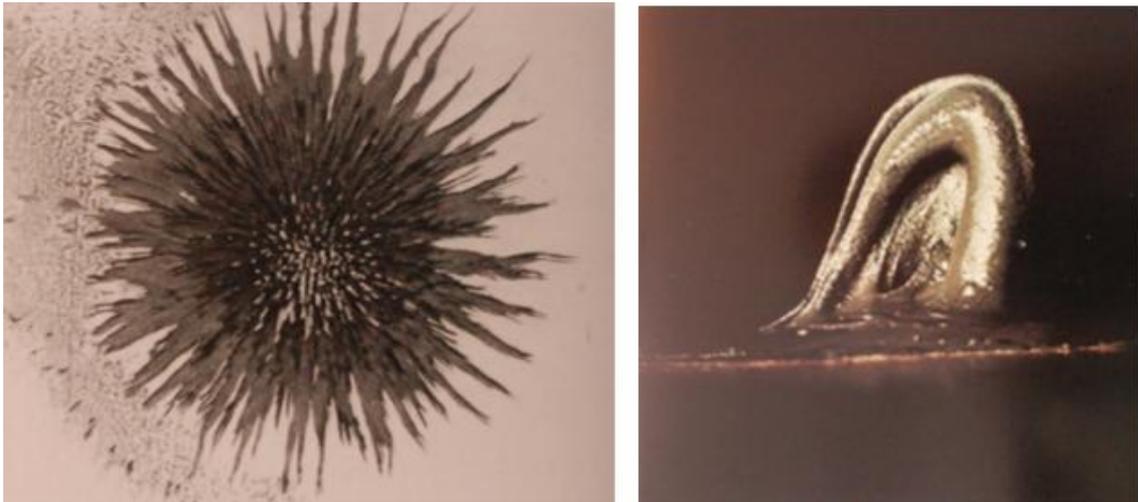


Figure 57 : Masses ferromagnétiques dans un champ magnétique sous vibration

Jenny a également fait des tests avec des gouttes de mercure ; l'apparition de figures géométriques est particulièrement éloquent (du tétragone à l'octogone). Par ailleurs, en parsemant le mercure avec de la poudre de lycopode, on met en évidence les courants de vibration (cf. le paragraphe sur la poudre de lycopode juste en dessous).

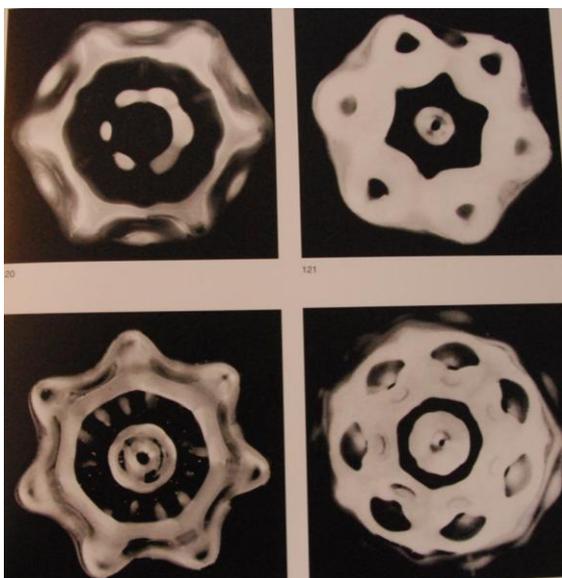


Figure 58 : Gouttes de mercure sur un diaphragme en vibration

Le facteur cinétique est toujours présent dans les cymatiques, particulièrement avec les ondes continues (en constante rotation). Plusieurs effets dynamiques sont récurrents dans les figures, comme l'effet d'aller-retour ou l'effet de rotation (figure 59), valable pour toutes les figures avec un centre de symétrie (et dont les centres adjacents tournent dans l'autre sens), etc.

Il serait même plus judicieux, selon Jenny, de parler de figures cinétiques, surtout pour les expériences menées dans l'eau.

De plus si la plupart du temps une figure précise se crée sur une plaque, il peut arriver qu'une partie de figure soit sur une zone de vibration et d'inactivité en même temps. Ainsi la forme apparaît puis disparaît incessamment dans la même zone. Pour Jenny, ses formes cinétiques sont « irrégulièrement régulières » ou « régulièrement irrégulières ».



Figure 59 : Allers retours et rotations du sable sur les plaques de métal

La poudre de lycopode, obtenue à partir de spores de champignon, est une matière consistant en des particules identiques donc uniformes. Si l'action de la poudre de lycopode sous l'effet de la vibration n'a pas été entièrement comprise et assimilée malgré les nombreuses expérimentations menées, il est évident qu'elle permet de révéler les courants et les flux de matière.

Sur un diaphragme, la poudre de lycopode en vibration permet l'apparition de formes rondes en rotation. En augmentant l'amplitude de la vibration, ces ronds migrent pour en former de nouveaux, plus gros, jusqu'à ne former plus qu'une énorme bille. Les particules du dessus tournent du centre vers la périphérie, les particules du dessous tournent de la périphérie vers le centre, créant ainsi un sillon entre les deux courants de circulation. Si on augmente toujours plus l'amplitude, les mouvements vont se faire plus violents jusqu'à éruption de la poudre. Il se crée ainsi un nuage de poussière au-dessus du diaphragme.

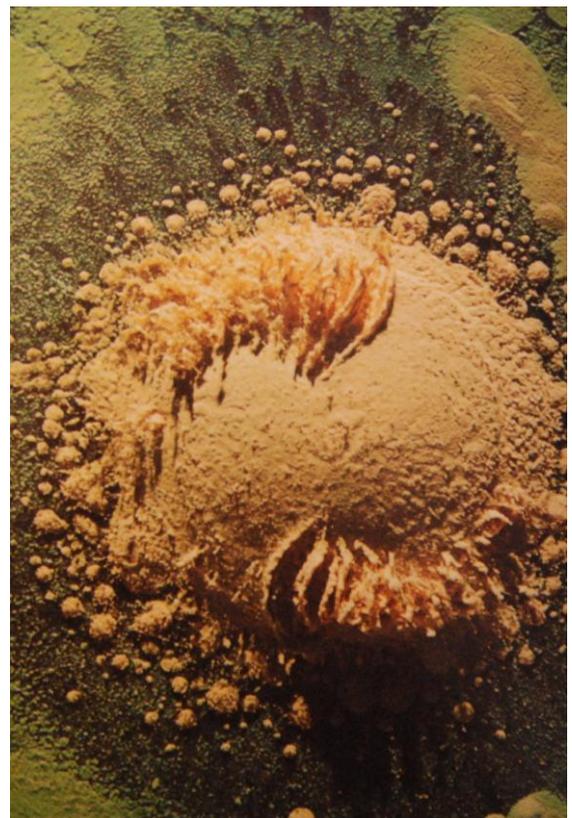


Figure 60 : Mouvements de rotation dus à la vibration

A l'inverse un changement de la fréquence de vibration a beaucoup moins d'effet sur la poudre, dont les particules ne semblent pas se séparer. Selon Jenny, on peut pourtant observer, grâce au stroboscope, qu'il y a séparation des particules sous certaines conditions.

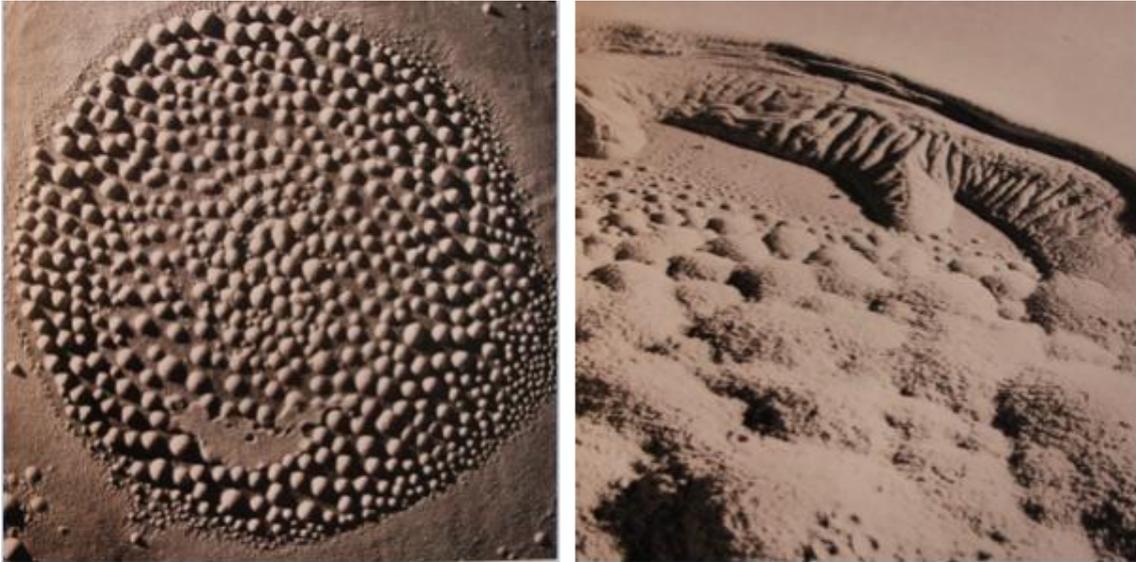


Figure 61 : Poudre de lycopode en vibration

Parmi les autres effets dynamiques, on compte les différences de phase avec la création d'un début de figure en périphérie avant qu'elle ne se déplace vers le centre. Ce mouvement de figure est particulièrement visible avec une goutte d'eau sur une feuille de métal. A la naissance de la vibration, le liquide part vers l'extérieur avant de revenir au centre.

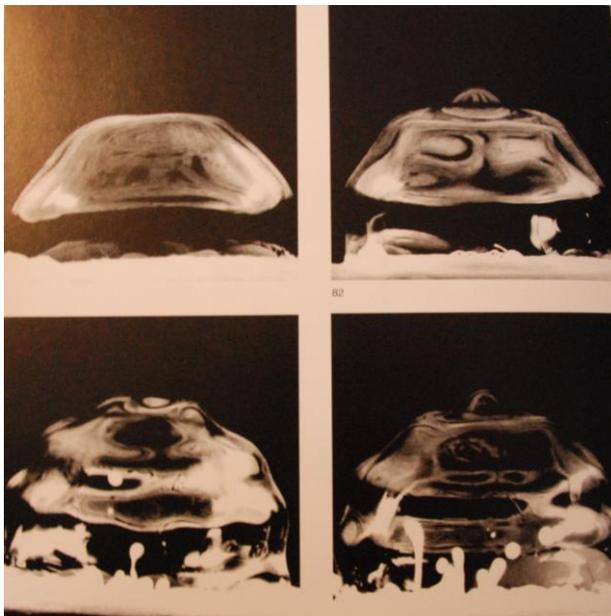


Figure 62 : Gouttes d'eau soumise à la vibration

L'autre avantage expérimental qu'apporte la goutte d'eau est qu'elle permet de visualiser la vibration en trois dimensions ; plus la fréquence est haute, plus la bulle montre des sections de division, et c'est la force de congglomération qui donne son unité à la structure.

De même que certaines matières permettent la visualisation de nouvelles formes, d'autres solutions et pâtes visqueuses mettent en évidence d'autres dynamiques vibratoires. Parmi ces solutions, deux exemples sont particulièrement intéressants car, changeant de texture au fil de l'expérience, les formes ne cessent d'évoluer, en fonction de cette texture.

En utilisant une solution saline (ou saumure) par exemple, une balle de sel se crée au centre, alors que l'eau est expulsée vers l'extérieur. Apparaissent ensuite des fissures puis des brisures sur la formation saline, et les éléments devenus solides sont éjectés vers la périphérie. Recouvrant leur flottabilité, ils retournent alors vers le centre pour se re-agglomérer, etc. On peut parler de cycle dynamique.



Figure 63 : Résultat de la liquéfaction puis solidification de la pâte de kaolin sur une plaque en vibration

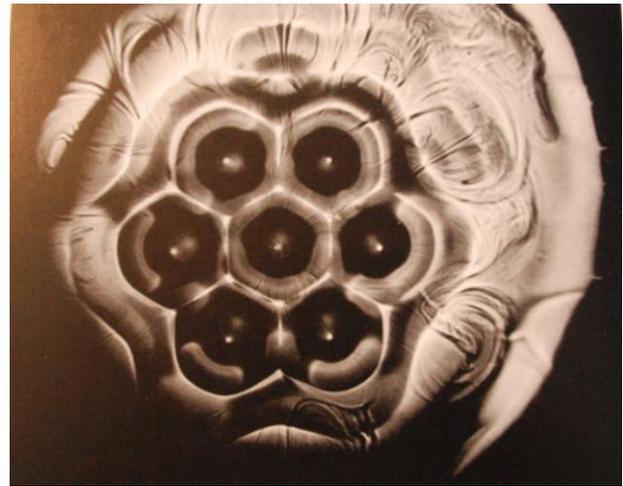


Figure 64 : Mélange d'essence de térébenthine et d'huile soumis à la vibration

2) Expériences

a. Champ d'expérimentation et mise en place

Dans le cadre de ce mémoire, les expérimentations sont limitées à l'étude des plaques et des membranes. Elles reprennent donc en partie les études de Hans Jenny. Les variables étudiées pour chacune des expériences sont la fréquence et l'intensité du son diffusé.

Pour une plaque, les expériences concernent sa matière, sa taille, son épaisseur et sa forme. Il est question de plaques en acier, en cuivre, en bois et en verre. Elles ont entre 0,5 et 3 mm d'épaisseur, sont triangulaires, carrées, rectangulaires, rondes ou hexagonales et la plus grande mesure 30 cm de côté. Les matières mises en mouvements par la vibration sont du sable fin, du gros sel, de la poudre de lycopode et des pigments de couleurs.

Pour les membranes, les expériences concernent en particulier la taille du haut-parleur et la matière excitée par le son : eau, glycérine, maïzena, huile, etc.



Figure 65 : Haut-parleur Meyer Sound 18 pouces

Le tableau ci-dessous récapitule les différentes combinaisons des variables des tests effectués.

PLAQUE				
FORME	MATERIAU	DIMENSION	EPAISSEUR	MATIERE
Carré	Aluminium	30 x 30 cm	0,5 mm	Sable fin
Carré	Aluminium	25 x 25 cm	0,5 mm	Sable fin
				Gros sel
				Poudre de lycopode
				Glycérine
				Pigments
				Pigments + sable
				Limaille de fer
Carré	Aluminium	20 x 20 cm	0,5 mm	Sable fin
Triangle	Aluminium	20 cm de côté	0,5 mm	Sable fin
Rond	Aluminium	10 cm de diamètre	0,5 mm	Sable fin
Hexagone	Aluminium	10 cm de diamètre	0,5 mm	Sable fin
Carré	Aluminium granité	25 cm de côté	0,5 mm	Sable fin
Carré	Acier	25 x 25 cm	0,6 mm	Sable fin
Rectangle	Acier	25 x 50 cm	1 mm	Sable fin
Carré	Bois (MDF)	20 x 20 cm	3 mm	Sable fin
Carré	Verre	20 x 20 cm	2 mm	Sable fin
HAUT-PARLEUR				
Gros HP (Meyer Sound)		18 pouces		Eau
				Eau et encre
Intermédiaire HP (JBL)		13 pouces		Eau et encre
Petit HP (Roselson)		5 pouces		Eau
				Blanc d'œufs
				Poudre de lycopode
				Huile et eau
				Glycérine
				Eau et glycérine
				Eau et encre
				Eau et sel
				Eau et farine
				Eau et maïzena
				Ferrofluide

Par ailleurs, on teste l'effectivité de différents signaux sur les plaques : forme d'onde sinusoïdale, forme d'onde carrée, ou en dents de scie. On essaie également de chercher les différences entre les 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème}, ... , jusqu'à 7^{ème} harmonique d'une même fréquence pour voir s'il existe plusieurs figures pour une même note quand son harmonique est paire ou impaire.

La réalisation de ces expériences résulte en la transmission d'une ou plusieurs fréquences pures à une plaque ou à un diaphragme. Pour ce faire, il faut mettre au point une configuration avec une source originale de la ou des fréquences et la bonne transmission de ce son.

Comme source sonore, on utilisera Pure Data, logiciel de programmation Open Source. C'est un logiciel qui sert notamment à générer du son et intègre l'utilisation d'interfaces, qui seront utiles pour la construction de la scénographie de l'installation. Ici, on utilise en particulier le bloc-fonction oscillateur pour générer la fréquence.

Une interface Motu UltraLite possédant huit sorties niveau ligne, sert de convertisseur numérique analogique. Plusieurs systèmes sont testés pour conduire le son aux plaques : premièrement, des micros piezos en céramique précédés d'un transformateur pour augmenter la tension diffusée ; deuxièmement, des haut-parleurs sans membrane, autrement appelés excitateurs.

En sortie d'interface audio, le son est transmis aux amplificateurs avant d'être émis par les haut-parleurs. Et pour finir, lors du test avec les piezos, une pointe de mousse flexible sert de ressort entre la table et la plaque pour permettre à la vibration de se développer sans être gênée par un support physique.

Concernant les haut-parleurs, par respect pour le matériel prêté, il n'est pas question de poser les matières à même leur membrane. Pour les protéger, des boîtes rondes en métal fin posées sur la membrane accueillent le liquide. De plus, un fin film de cellophane est installé sous cette boîte afin de réceptionner toute matière éjectée hors de la boîte ronde.

Le budget de ce mémoire est consacré en grande majorité à l'achat du matériel nécessaire aux expériences et à l'installation :

- surfaces de vibration : plaques d'aluminium, d'acier, de verre et de bois (MDF) ; haut-parleurs (Meyer Sound 18", Tannoy 6,5", JBL 13" et Roselson 4") ;
- matières de visualisation : sable fin, gros sel, farine, maïzena, poudre de lycopode, pigment ; eau, huile, glycérine, blanc d'œuf ; liquide ferromagnétique, limaille de fer ;
- matériel technique : tiges à ressort (clous et vis), mousse ; carte son, câble FireWire, PureData, câbles ; piezos, transformateurs, Monacor AR30, Visaton EX60S et BS130 ; aimants, pâte américaine, scie et lime à métaux ; encre bleue, colorants, film cellophane, boîte métal ronde.

b. Résultats des expériences

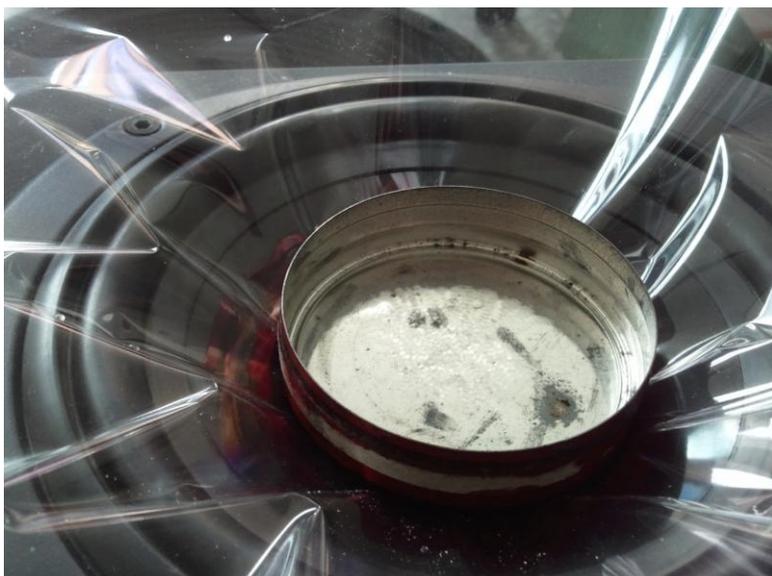


Figure 66 : Enceinte Tannoy protégée par un film en cellophane

Outre leur taille et leur marque, plusieurs caractéristiques différencient les quatre haut-parleurs. A l'inverse des autres, le haut-parleur Tannoy de 6,5 pouces est le seul coaxial⁴⁸. Les membranes des haut-parleurs ne sont également pas de la même matière, peut-être cela influence-t-il le résultat des expériences. Peut-être qu'est dû à une de ces différences le fait que ce haut-parleur ait besoin de moins de puissance que les autres pour que les matières entrent en vibration.

Les expériences avec l'eau constituent une référence de travail : elles ont permis de déterminer les conséquences principales qu'ont les changements d'intensité et de fréquence.

Dans un premier temps, on peut noter que plus la fréquence diffusée par les haut-parleurs est aiguë, plus il faut augmenter l'intensité pour voir les formes. Ainsi, les fréquences les plus aiguës demandent tellement de puissance qu'il est difficile de les visualiser sans atteindre un niveau désagréable aux oreilles. Avec le haut-parleur de taille moyenne (6,5 pouces), on peut visualiser sans difficultés jusqu'à 440 Hz et à cette fréquence, la forme apparente est déjà suffisamment complexe ; en effet, plus la fréquence est élevée, plus la figure compte de divisions (figures 67, 68, 69). Ainsi, plus l'intensité est élevée, plus la figure aqueuse prend du relief et plus les détails de sa composition apparaissent. Si on augmente trop la puissance transmise au haut-parleur, l'eau finira par jaillir en gouttelettes jusqu'aux éclaboussures.



Figure 67 : Fréquence de 10 Hz

⁴⁸ Une enceinte coaxiale possède un haut-parleur qui accueille un tweeter en son centre, cela permet notamment de réduire les problèmes de déphasage.



Figure 68 : Fréquence de 20 Hz



Figure 69 : Fréquence de 40 Hz

Dans un deuxième temps, on note qu'il est presque impossible de comparer les figures de deux haut-parleurs pour une même fréquence (figures 70 et 71). Même pour une basse fréquence, l'eau s'agite trop rapidement pour qu'un observateur puisse prendre des repères à l'œil nu. Il est également difficile de prendre des photos au même moment du processus périodique auquel est soumis le fluide.



**Figure 70 : Fréquence de 10 Hz
sur l'enceinte JBL 13 pouces**



**Figure 71 : Fréquence de 10 Hz
sur l'enceinte Meyer Sound 18 pouces**

Ajouter de l'encre ou du colorant alimentaire n'est pas une solution intéressante pour visualiser les mouvements de l'eau et l'apparition des figures. En effet, si l'on dépose une goutte d'encre dans l'eau en vibration, une faible quantité de cette encre va très brièvement et rapidement se déplacer et ce vers l'extérieur de la membrane. Puis le reste de l'encre ne semble plus bouger, laissant le processus se poursuivre. Elle se mélange ensuite petit à petit avec l'eau pour la colorer.



Figure 72 : Fréquence de 8 Hz avec de l'eau colorée à l'encre bleue

La richesse des expériences menées dans le cadre de ce mémoire vient notamment des différences observées entre les matières mises en vibration.

L'expérience avec le mélange eau/sel est moins réussie que l'on pouvait l'espérer. On note qu'à une certaine intensité, l'eau est poussée vers l'extérieur, permettant au sel de former un début d'îlot au milieu de la solution saline. Une fois sur les bords, l'eau est soumise à une vibration plus

forte, car elle est plus proche de la membrane. Elle s'éjecte donc du haut-parleur et retombe en partie au milieu de l'îlot salé, ce qui empêche ce dernier de s'assécher vraiment.

L'huile, plus visqueuse que l'eau, a plus de difficulté à entrer en vibration. De plus, elle n'est pas miscible avec l'eau. Ainsi, si on les place toutes les deux dans un pot en métal placé sur l'enceinte, l'eau entrera en vibration la première. L'huile formera des limites, comme des remparts, à la forme vibrante constituée d'eau.



Figure 73 : Résultat obtenu après que toute l'eau a giclé

Si l'on augmente l'intensité diffusée par le haut-parleur, la tâche aqueuse commence à se mélanger avec l'eau, en quelque sorte, formant quelques petits îlots dans la masse huileuse. En augmentant encore l'intensité, l'eau jaillit en éclaboussures pour retomber un peu partout, notamment dans l'huile. Ainsi la quantité d'îlots aqueux augmente rapidement. Lorsqu'enfin toute l'eau a jailli pour retomber prisonnière de l'huile, le phénomène s'arrête et les îlots ne bougent plus. On arrive à un état d'équilibre, une sorte de mélange le plus homogène qu'il soit possible entre ces deux liquides (figure 73). Pour finir, si l'on augmente violemment l'intensité du son diffusé, l'eau se libère de sa prison d'huile pour gicler à nouveau.

La glycérine est aussi visqueuse que l'huile mais miscible avec l'eau. On constate simplement que mélangée avec l'eau, elle se contente de rendre l'eau moins vibrante. Plus le fluide est visqueux, moins il vibre à faible intensité.

La farine, posée seule sur un film transparent à même la membrane s'échappe vers l'extérieur du haut-parleur avant de retomber dans l'enceinte. Les particules de farine effectuent des mouvements d'aller-retour entre le centre et l'extérieur du haut-parleur.

A une intensité plus faible, les particules de farine remontent légèrement sur les parois du haut-parleur avant d'être happées vers l'intérieur, leur mouvement forme un cycle qui se répète tant que le son est diffusé. Quelques agglomérats de farine se retrouvent à la surface de la masse farineuse et restent sur place, tournant sur eux-mêmes quand des particules plus fines sous eux roulent vers l'intérieur.

Mélangée avec un peu d'eau, la maïzena prend une consistance particulière qui la définit comme un fluide non newtonien, i.e. dont le comportement dépend du temps. Comme un liquide rhéoépaississant, au repos la maïzena se comporte comme un fluide, mais plus on la manipule vite, plus elle devient visqueuse. Ainsi, plus la fréquence est élevée moins il est facile de l'agiter.

Pour l'expérience, on place de la maïzena mélangée à de l'eau directement dans le haut-parleur et on l'excite à basse fréquence. Puis, quand on augmente l'intensité, des volutes de matière se tortillent sur les bords du haut-parleur et commencent à remonter la pente. Pour ce faire, l'intensité sonore doit être très forte. Le mouvement est finalement le même que celui qu'entamait la farine sèche mais il est ici bien plus visible.



Figure 74 : Réaction d'un fluide non-newtonien à basse fréquence



Figure 75 : La poudre de lycopode se rassemble pour former la demi-sphère

Si les expériences avec la poudre de lycopode sont également impressionnantes et hypnotisantes, les observations faites n'apportent rien de plus que celles de Hans Jenny.

La poudre de lycopode est constituée de si fines et si légères particules qu'en la versant doucement dans une fine boîte de métal, elle s'est déjà en partie envolée. C'est cette légèreté qui lui permet de se déplacer très facilement, particulièrement sur des surfaces lisses.

Cette caractéristique a également quelques défauts : en effet, lorsque la petite boîte de métal est placée en vibration dans le haut-parleur, beaucoup de particules de lycopode s'envolent puis retombent dans le plastique de protection, le rendant très glissant. La boîte de métal glisse donc régulièrement jusqu'à se renverser, rendant les observations difficiles à accomplir.



Figure 76 : Rotation de matière sur la demi-sphère à une intensité plus forte

La forme ronde en rotation, décrite par Hans Jenny dans ses expériences, s'est formée sur un côté de la boîte, à cause de cette difficulté à garder la boîte à niveau. Formant une demi-sphère, les particules de lycopode glissent par dessous vers le centre et reviennent par-dessus sous forme de petits amas de matière. Sur la masse de matière principale, on observe également des rotations très rapides d'agglomérats de particules dont le sens et la vitesse changent selon la fréquence du son diffusé. Le changement d'intensité, lui, permet de mettre plus ou moins en évidence tous les détails des mouvements de la poudre soumise à la vibration.

Les expérimentations avec les plaques sont plus compliquées à mettre en place. En effet, faire vibrer les plaques avec des cellules piézo-électriques s'avère impossible. D'impédance trop importante, la puissance des cellules n'est pas assez élevée.

Placer une plaque de métal à même les haut-parleurs n'est pas non plus une solution : sans doute à cause des protections en cellophane, la vibration ne se transmet pas correctement de la membrane à la plaque. De plus, si l'on augmente beaucoup l'intensité du son diffusé, le sable glisse entre la plaque et le cellophane pour finir au fond du haut-parleur, au plus proche du noyau.

La solution utilisée est donc de faire vibrer les plaques avec des excitateurs, i.e. des haut-parleurs sans membrane. Le premier test, effectué avec un Monacor AR30, s'est avéré un échec : le rendement de l'excitateur n'est pas assez élevé pour



Figure 77 : Excitateurs Monacor AR30 et Visaton EX60S

l'usage des expériences. Le deuxième test, avec un Visaton EX60S, a par contre permis la mise en vibration des plaques, le déplacement du sable et l'apparition des figures.

On teste donc les différentes plaques – verre, acier, bois, aluminium – et leurs diverses formes avec l’excitateur Visaton. Les résultats sont très hétérogènes selon les matériaux. De plus il n’est pas toujours facile de reconnaître les figures théoriques sur les plaques, sans doute car elles ne sont pas assez planes pour que les figures soient parfaitement régulières.

On observe dans un premier temps que le verre vibre plus difficilement que le métal. Le sable se déplace légèrement mais pas de manière assez prononcée pour qu’apparaissent des figures claires ; exception faite pour les fréquences de 230 Hz, 660 Hz et 1200 Hz, dont on peut déduire qu’elles sont les modes propres de la plaque. A ces fréquences, la plaque vibre bien plus, le son émit semble plus fort et une figure se forme.

Si le bois vibre plus facilement que le verre, les figures ont également du mal à se former, et comme précédemment, elles ne se forment qu’à certaines fréquences seulement : 210 puis 320 Hz forment deux figures différentes. On note que ces fréquences ne sont pas les mêmes que pour le verre.

Le Visaton n’est pas assez puissant pour faire vibrer la plaque d’acier, ce dernier est sans doute trop lourd ou trop dense. Pour pouvoir tester ce matériau, on aurait pu utiliser un pot vibrant, excitateur plus puissant possédant un accéléromètre et fréquemment utilisé lors d’essais mécaniques dans l’industrie. Mais cet outil est bien trop cher à l’échelle de ce mémoire et n’était pas ouvert au prêt dans les différentes universités et écoles contactées.



Figure 78 : Fréquences de 210 et 320 Hz diffusées sur une plaque de 3mm de MDF

La matière la plus facile à faire vibrer est l’aluminium. C’est donc avec cette matière que nous avons fait les tests entre les différents matériaux : sable, sel, limaille de fer, etc.

On remarque rapidement que si l’on met trop de sable sur la plaque, même disposé de manière homogène, celui-ci a plus de mal à se déplacer. En effet, formant des paquets de sable aggloméré, sa masse devient plus grande et la force à émettre pour le mouvoir doit donc être plus élevée.

On observe également que plus fort est diffusé le son, plus vite se déplace le son. Par voie de conséquence, il est éjecté plus vite et en plus grande quantité hors de la plaque.

Les changements de figure se font par palier. En effet, lors de ces expériences, il semble que ce n'est pas à une fréquence que correspond une figure, mais à un palier de fréquences. Les changements de forme s'effectuent donc par intervalle.

Pour obtenir une figure claire, il est plus efficace, pour chaque fréquence, d'éteindre l'amplificateur, de retirer le sable sur la plaque, l'étaler à nouveau de manière homogène, régler sa fréquence puis l'émettre. Repartir à chaque fois par une répartition homogène du sable permet de visualiser les figures au mieux. C'est donc le protocole qui a été appliqué systématiquement.

Enfin, sans doute à cause de la déformation – les plaques d'aluminium sont si fines qu'elles se sont légèrement tordues à la découpe, sans possibilité de les redresser parfaitement –, les figures sur la grande et la petite plaque carrée ne se ressemblent pas.

Concernant les tests avec les différents signaux – formes d'ondes sinusoïdales, carrées et en dents de scie –, aucune différence n'est observable, si ce n'est le temps que mettent les figures pour apparaître à une même intensité.

Pour les différentes harmoniques, les figures sont les mêmes deux à deux. 2^{ème}, 4^{ème} et 6^{ème} harmonique d'une même fréquence sont semblables, mêmes choses pour les 3^{ème}, 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques. Ainsi pour une note, deux figures différentes apparaissent. De la même manière que plus une fréquence est aigue, plus il faut de puissance pour la visualiser, plus l'harmonique d'une note est élevée, plus la figure se dévoile difficilement. Ainsi, si les harmoniques sont intéressantes, elles sont aussi plus complexes à visualiser.

La figure 79 permet de comparer les figures aux successives harmoniques de la fréquence de 146 Hz.



Figure 79 : 1^{ère} à 7^{ème} harmonique de la fréquence 146 Hz



La première figure correspondant clairement aux théories de Chladni apparaît, sur la petite plaque, pour la fréquence de 335 Hz (figure 80). Souvent, si les figures n'apparaissent pas totalement, on reconnaît quand même leur forme et en cherchant les points de symétrie, on pourrait les redessiner (figure 81).

Figure 80 : Fréquence de 335 Hz sur une plaque en aluminium de 20 x 20 cm

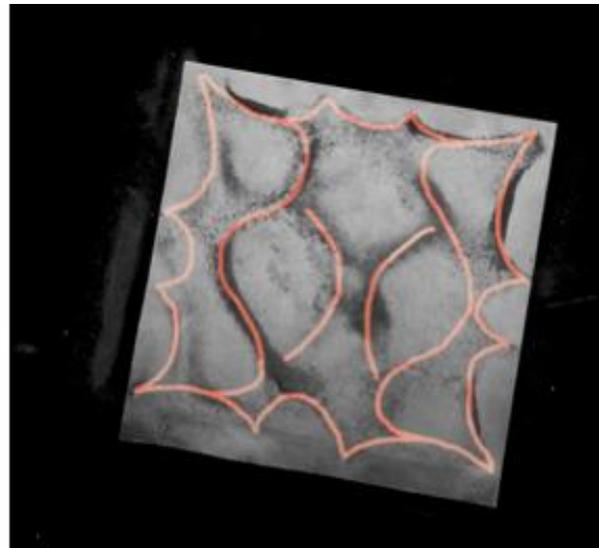
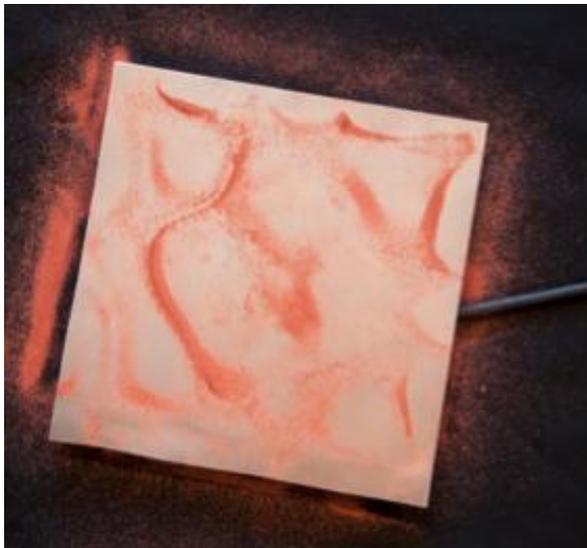


Figure 81 : Fréquence de 819 Hz diffusée sur la même plaque

Comme pour les expériences avec les haut-parleurs, plus haute est la fréquence, plus le niveau de diffusion doit être élevé. Lors de nos expérimentations, on s'est arrêté à 6000 Hz pour ne pas abîmer le Visaton. A partir de 3000 Hz, au vu du niveau de diffusion sonore, il est de toute manière difficile d'écouter le son sans se blesser les oreilles.

Les formes des figures vont ensuite dépendre des formes des plaques, ainsi pour une même fréquence, la figure ne sera pas la même sur une plaque ronde, carrée, hexagonale ou triangulaire.

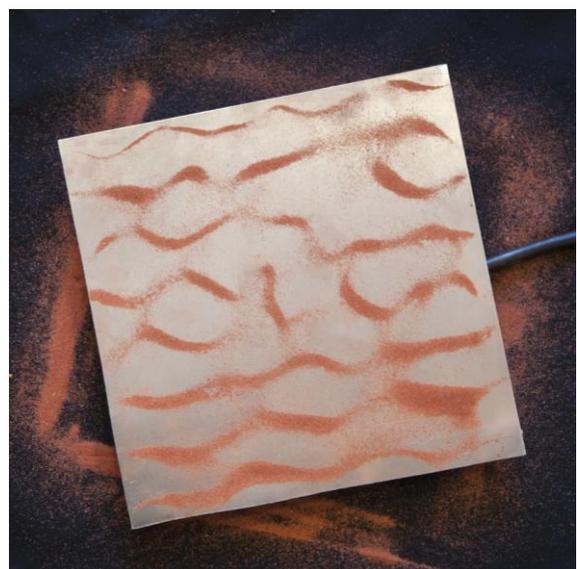


Figure 82 : Fréquence de 1610 Hz sur une plaque carrée

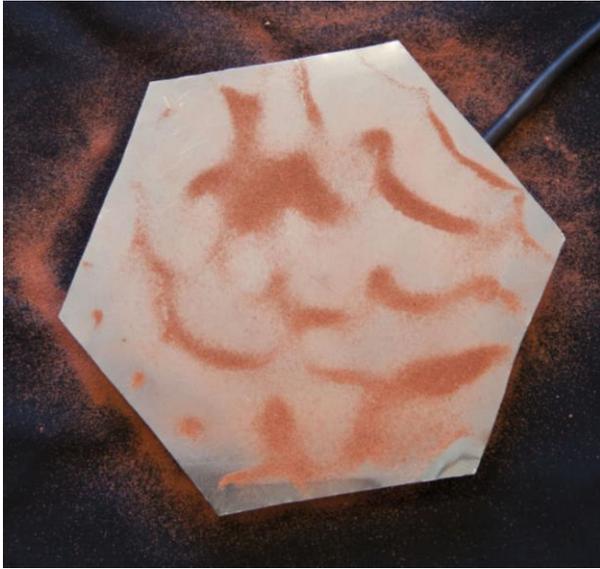


Figure 83 : Fréquence de 1610 Hz sur une plaque hexagonale



Figure 84 : Fréquence de 1610 Hz sur une plaque triangulaire

Les pigments d'oxyde de fer, rouges, se comportent comme le sable, même s'ils glissent moins facilement sur la plaque. Sur les figures précédentes (figures 82, 83, 84), la matière est composée d'un mélange de sable et de pigments, ces derniers venant colorer les grains de sable.



Figure 85 : Fréquence de 510 Hz visualisée par des pigments rouges sur une plaque en aluminium

Les plaques d'aluminium granité n'empêchent pas les grains de sable de se déplacer, sauf à fréquences plus élevées où ils viennent se placer dans le creux des aspérités.



Figure 86 : Fréquence de 1180 Hz avec du gros sel, sur une plaque d'aluminium

Comme pour les expériences avec les haut-parleurs, la farine adhère trop à la plaque pour pouvoir se déplacer et former les figures. A condition que la fréquence soit suffisamment basse et que la farine soit tamisée en petite quantité, des petits amas se mettent en rotation sur eux-mêmes au niveau des ventres de vibration. Une nouvelle fois, utiliser la poudre de lycopode est bien plus révélateur.

Le gros sel ne change rien aux figures que l'on connaît, elles sont juste plus grossières et moins précises.

La limaille de fer a pour particularité sa réaction magnétique avec l'aimant du haut-parleur ; elle a ainsi tendance à se diriger vers le centre de la plaque. Sous l'effet de la vibration, les figures apparaissent doucement ; mais sous l'effet de la force magnétique, le fer forme des filets ralliant petit à petit le centre. Se dévoile ainsi une figure différente de celles formées par le sable, ressemblante mais plus complexe.



Figure 87 : Action de la vibration sur la limaille de fer



Figure 88 : Formation d'une figure dans la poudre de lycopode sur une plaque en aluminium

Pour finir, le matériau le plus intéressant pour visualiser la dynamique vibratoire est la poudre de lycopode. Comme pour les haut-parleurs, elle permet de contempler les mouvements de la matière sous l'effet de la vibration. Pour la fréquence résonante de la plaque, la poudre se regroupe doucement en amas. Si on augmente l'intensité du son diffusé, les amas se regrouperont plus vite et deviendront rapidement plus gros. On observe les mêmes phénomènes de rotation qu'avec les haut-parleurs ; mais en plus des précédentes expériences, une fine figure apparaît également en filigrane, on ne l'avait pas vu auparavant, lors des expériences avec cette matière sur les haut-parleurs.



Figure 89 : Formation d'amas en rotation dans la poudre de lycopode mise en vibration

c. Quelques explications scientifiques

Soient γ , la tension de surface de la matière de la plaque, σ la masse volumique de la plaque, L_x et L_y les dimensions de la plaque, f_m la fréquence modale et m et n les modes.

$$f_m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma}{\sigma}} \sqrt{\frac{m^2}{L_x^2} + \frac{n^2}{L_y^2}}$$

Pour la même fréquence f_m , si L_x et L_y changent, alors m et n seront différents. Les dimensions de la plaque influent donc sur la figure qui apparaît pour une même fréquence.

γ est la tendance d'un liquide à résister à une force externe ; elle explique notamment que certains insectes puissent marcher sur l'eau. Elle se mesure en newton par unité de longueur, dépend de la densité de la matière et de la température ambiante.

Le tension de surface de l'huile est de 48 dyn/cm⁴⁹, celle de l'eau vaut 72 dyn/cm et celle du glycérol 48 dyn/cm. Ainsi le glycérol et l'huile vont se déplacer plus difficilement que l'eau parce que l'énergie nécessaire pour créer une unité de surface de contact entre l'huile et l'aluminium est inférieure à celle nécessaire pour créer cette même unité entre l'eau et l'aluminium.

Cette formule permet également d'expliquer pourquoi quand la fréquence augmente, la figure devient plus complexe : simplement parce que si f_m augmente alors m et n augmentent aussi.

La force de l'onde mécanique progressive est fonction d'une déformation de matière, par exemple de la constante de raideur k d'un ressort. En effet avec F la force appliquée et x la déformation, on a : $k = \frac{F}{x}$. Or cette déformation va dépendre de la densité et de la masse des matériaux des plaques.

Pour finir, les expériences présentées ont également leurs limites. La première vient de la manière dont le son est conduit aux plaques. Si le visaton est une solution intéressante, elle n'en reste pas moins limitée par sa puissance acceptée en entrée et son faible rendement. De la même manière, l'excitateur était fixé aux plaques avec de la pâte américaine. Peut-être que si on avait pu les visser, la vibration se serait mieux transmise. Mais cela impliquait de faire des trous dans les plaques qui auraient également eu une influence sur les résultats de l'expérience.

Du plus, avoir découpé les figures à la main plutôt qu'avec une machine à découper le métal précise a également joué son rôle sur les formes des figures. Les bords des plaques étant légèrement déformés, les figures étaient moins précises en ces endroits.

En dehors des défauts d'expérimentations, il n'en reste pas moins que les figures sont intéressantes, artistiquement et scientifiquement et qu'elles mériteraient que des mathématiciens se penchent sur l'établissement de leurs modèles physiques.

⁴⁹ Une dyne vaut 10⁻⁵ Newton

III/ TOCCATA POUR LES YEUX

1) Conception

a. Exploitation des expériences

Montrer l'eau soumise à la vibration paraît un processus incontournable à présenter au public. En effet, tout spectateur a déjà dû expérimenter cette forme de visualisation du son. A la manière du caillou que l'on jette dans la mare, c'est la référence en matière de visualisation des ondes sonores, et des ondes mécaniques en général. Proposer ce procédé pour débiter lui permettra de s'ancrer dans l'installation et d'être plus ouvert à ce qui lui est présenté par la suite.

Les ondes sonores, dans l'eau, ont une vitesse de propagation de 1495 m/s. La masse volumique de l'eau est de 1 kg/m³.

La plaque de métal avec du sable fin est également une manière connue de voir la vibration sonore, surtout des personnes travaillant avec le son, même si sans doute peu d'entre eux s'y sont déjà confrontés de cette manière, en cherchant à en comprendre les principes. Elle semble une visualisation incontournable également, d'autant plus qu'elle permet d'étudier comment agit de la vibration, comment elle se transmet, comment elle agit sur l'élément qui la diffuse, etc.

Les ondes sonores ont, dans l'aluminium, une vitesse de propagation de 6400 m/s. La masse volumique de l'aluminium est de 2,69 g/cm³, celle du sable d'environ 1,8 kg/m³.

A défaut de pouvoir montrer le principe du liquide rhéoépaississant – cela abimerait le haut-parleur de vibrer aussi fort et aussi longtemps –, l'expérience avec la limaille de fer introduit le questionnement de la réaction de la vibration dans un champ magnétique. De plus, des figures intéressantes et plus complexes apparaissent, tirillées entre ces deux forces.

Pour finir, l'expérience avec la poudre de lycopode apporte la dimension périodique et dynamique. Elle permet de visualiser, mieux qu'aucune autre manière, les mouvements de matière, les rotations, les allers retours des matières soumises au son. De plus, ce processus paraîtra sans doute impressionnant pour le spectateur : comment le son pourrait-il avoir un tel effet et créer de telles formes ?

b. Intentions scénographiques

Cette installation se veut une démonstration des expériences menées en amont. Intrigante, elle doit amener le spectateur à s'interroger sur le son, ses caractéristiques et tout ce qu'il est capable de produire outre une sensation à nos oreilles.

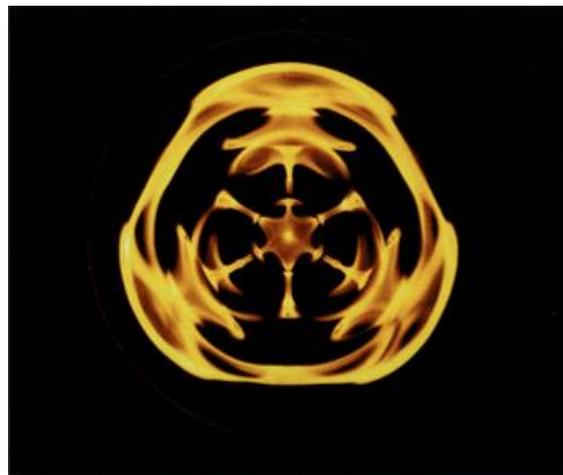
Par rapport à ce que l'on découvre et apprend à l'ENS Louis-Lumière, cette proposition d'installation semble un prolongement intéressant, notamment au rapport entre son et l'image ou encore aux différents traitements que l'on applique au son seul par contraste au son cinéma.

En effet, la puissance de la dimension sonore est immense : évoquer des événements qui n'existent pas, créer de toutes pièces des univers, des présences. C'est également lui souvent qui évoque des sensations, fait appel à notre sensibilité et nos souvenirs, etc.

Etudier son fonctionnement, décortiquer sa structure, ressemble en quelque sorte à un moyen de chercher comment il agit sur nous et sur ce qui nous entoure. Choisir la dimension scientifique pour réfléchir à tout cela paraît une transposition intéressante de ce questionnement.

L'idée n'est pas pour autant de partir en questionnements ésotériques comme l'ont fait certains chercheurs et artistes dans leurs propres recherches. Siegfried et Alexandre Lauterwasser vont même jusqu'à reconnaître les figures de Chladni sur les carapaces des tortues, les tâches des léopards, les rayures des zèbres, les formes des fleurs, les pattes des insectes, etc.

Plus simplement, l'installation, partie pratique de ce mémoire, veut interroger les qualités du son, en tant qu'onde de vibration, processus physique.



Onde stationnaire d'une structure triangulaire bipolaire, 28,9 Hertz.



Fleur de lys à deux pétales bipolaires d'ordre 3.

Figure 90 : Etude de Lauterwasser sur les fleurs

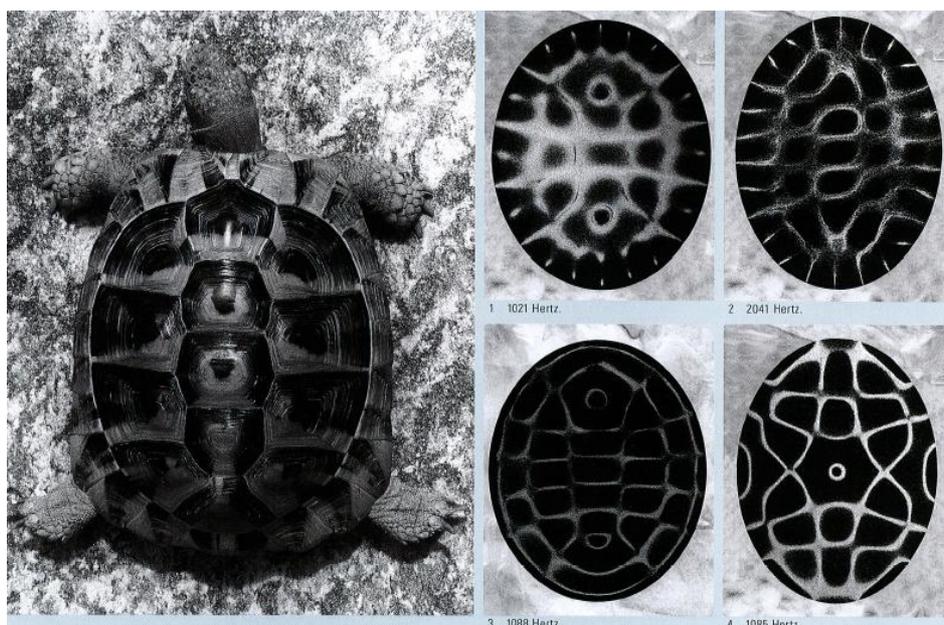


Figure 91 : Etude de Lauterwasser sur les tortues

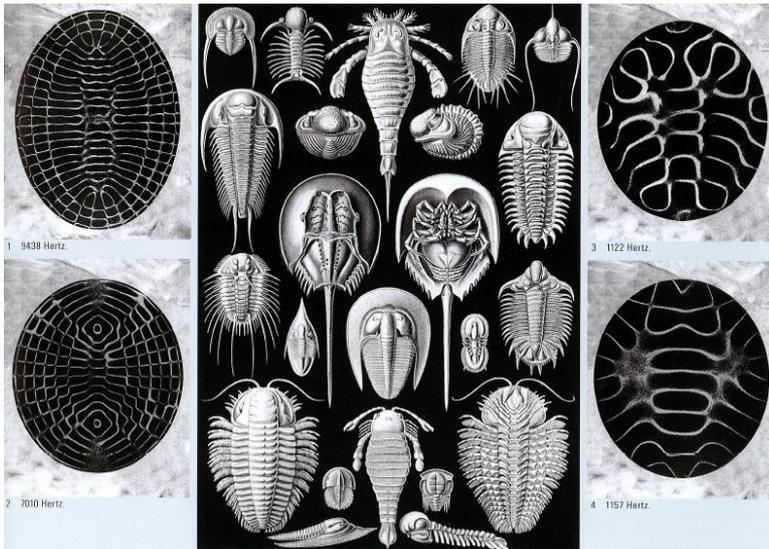


Figure 92 : Etude de Lauterwasser sur les insectes

L'idée scénographique principale est de proposer aux spectateurs un parcours plutôt qu'une déambulation. L'installation prendra alors une portée démonstrative et pédagogique, avec une évolution du degré d'évidence des procédés.

Le spectateur pourra également interagir directement avec les processus via des interfaces qui leur permettront de changer la fréquence et l'intensité des sons diffusés.

Par ailleurs, les limites de ce qu'il est possible de présenter dans cette installation sont largement influencées par le budget du mémoire. Pour pouvoir montrer d'autres processus, d'autres matières, il sera proposé au spectateur un court film des expériences menées en amont.

L'installation s'appelle *Toccata pour les yeux*. Toccata fait référence au son et à la musique. C'est une des formes musicales la plus libre, comparable aux fantaisies. Avec Bach, elle est devenue un prélude à une fugue plus codifiée. L'idée d'une composition aux règles réduites paraît correspondre à la facette de l'art que montre cette installation : on utilise la représentation d'un phénomène scientifique, qui obéit à des règles mathématiques pour faire une visualisation artistique du son. Et on l'utilise pour proposer aux spectateurs une installation qui se veut expressive.

Cette installation choisit de réduire la distance entre ce qu'elle propose et le spectateur. Elle lui permet d'entrer doucement dans un phénomène qu'il connaît sans pourtant l'avoir éprouvé dans toute sa complexité. Elle souhaite donner à voir la vibration du son et ses caractéristiques, sans avoir la prétention d'en détailler les règles de fonctionnements ou prouver son influence sur les éléments qui l'entourent. Et sans avoir l'ambition d'émouvoir ou perturber le spectateur, elle souhaite le faire s'interroger sur ces choses auxquelles on se confronte quotidiennement mais auxquelles on n'accorde pas plus d'attentions qu'un son. Il est en effet rare de prendre le temps d'écouter l'ambiance sonore autour de soi, l'ensemble des sons plutôt que de s'arrêter sur chacun d'eux, d'être attiré par ceux qui sortent du lot (comme un klaxon, un craquement de branche, le cri d'une personne, etc.).

Sans doute que ces intentions ne seront pas perçues directement par le spectateur, de la même manière qu'un naïf⁵⁰ ne saurait pas décomposer une bande son de film comme le ferait un ingénieur du son. Et peut-être même que certains les appréhenderont d'une façon totalement étrangère aux intentions initiales.

⁵⁰ Personne ne travaillant pas dans le domaine du son

Cette installation se place humblement dans la suite des musiques visuelles, les procédés présentés dans ce mémoire ont déjà servi dans d'autres scénographies. La plupart des spectateurs auront sans doute déjà entendu parler de ce type de figures, de ses visualisations et de ce travail de mémoire. Ainsi des explications explicites risqueraient d'alourdir le propos et comme je serai présente tout le temps, je pourrai répondre aux questions si quelques visiteurs en ont. De plus, j'aimerais récolter leurs remarques et critiques. Le spectateur de cette installation n'est pas un simple « regardeur », il doit se sentir libre d'influencer l'installation et d'énoncer ce qu'il en pense ; en quelque sorte, il collabore à l'œuvre mais aussi au mémoire.

c. Cahier des charges très précis

Pour exposer les quatre procédés présentés précédemment, seront construits quatre blocs de bois de 50 cm par 50 cm et de 95 cm de haut. Les deux d'entre eux qui supporteront une enceinte seront renforcés par des tasseaux verticaux. Ces blocs de bois permettront par ailleurs de cacher les câbles.

Afin de maîtriser au maximum les phénomènes avec les plaques, des bâches de protection transparentes seront installées par terre. Il s'agira de rassembler le sable de temps en temps pour ne pas le laisser se répandre dans la salle. Pour les phénomènes avec haut-parleurs, on utilisera, comme pour les expériences, des films de cellophane pour protéger la membrane ; il faudra sans doute changer de temps en temps le film du procédé avec la poudre de lycopode à cause de la volatilité de cette dernière.

Par ailleurs, l'eau ne sera pas présentée directement sur la membrane, mais dans un plat à tarte. Cette astuce permet de mieux remarquer la symétrie des figures, le film cellophane déformant les contours du haut-parleur. De la même manière pour le procédé avec la poudre de lycopode, cette dernière sera exposée dans une petite boîte ronde en métal. En effet, ce dernier est plus conducteur de la vibration que d'autres matières.

Les deux haut-parleurs seront présentés hors de leur enceinte. Ils seront donc moins hauts et le spectateur aura plus de facilité à se pencher pour observer le phénomène. Cela répond aussi à l'idée pratique de peser moins lourd sur le bloc de bois et d'être plus facile à protéger des projections ; en effet les événements agitent le cellophane, faisant bouger son contenu.

Pour faciliter l'observation au spectateur, de l'encre bleue sera diffusée dans l'eau et le sable sera mélangé à des pigments rouges. Cela ajoute de plus un apport esthétique supplémentaire à ces deux premiers procédés.

Des projecteurs 500 watts seront installés pour mettre en lumière chacun des procédés. En plus de les mettre en valeur, ils permettront de créer des reflets dans l'eau notamment et ainsi de faciliter la visualisation des figures aqueuses une nouvelle fois.

Le spectateur sera en mesure d'interagir avec chacun des procédés ; des interfaces midi leur permettront de changer la fréquence et l'intensité du son diffusé. Celles du procédé avec l'eau et avec le sable seront des iconcontrols, qui présentent neuf faders et neuf potentiomètres. Le spectateur pourra choisir les fréquences et l'intensité de chacune d'entre elles. Celles du procédé avec la limaille et la poudre de lycopode seront des ipads. Ces deux derniers procédés ne fonctionnant que pour des fréquences très précises, elles seront enregistrées dans des mémoires que le spectateur rappellera en appuyant sur les différentes touches de l'interface.



Figure 93 : Iconcontrols et ipad Icon

Pour les procédés avec le sable, la limaille de fer et la poudre de lycopode, des petits pots seront posés sur les blocs de bois, le spectateur pourra ainsi remettre lui-même de la matière sur la plaque. Et puisque les figures apparaissent plus facilement lorsque l'on repart d'une couche de sable étalée de manière homogène, des pinceaux seront proposés au spectateur, pour les procédés de la limaille et du sable, afin de pouvoir retirer le sable de la plaque et faire apparaître une nouvelle figure.

Pour finir, il sera proposé aux spectateurs une courte vidéo faite de photos et de vidéos des expériences menées en amont. Elles seront enregistrées sur deux tablettes tactiles présentées sur des cubes à côté de deux fauteuils. En face des fauteuils, quatre tirages de gros plans de procédés seront exposés, suspendus à des cimaises.

L'organisation des différents éléments de l'installation est visible sur le plan.

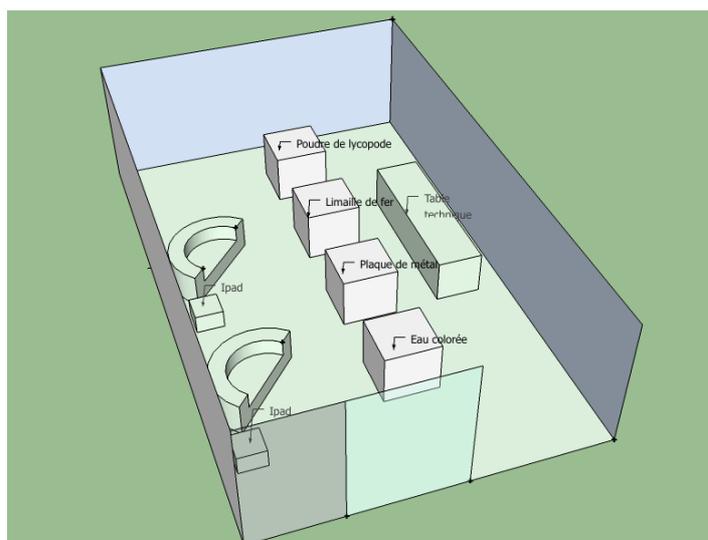


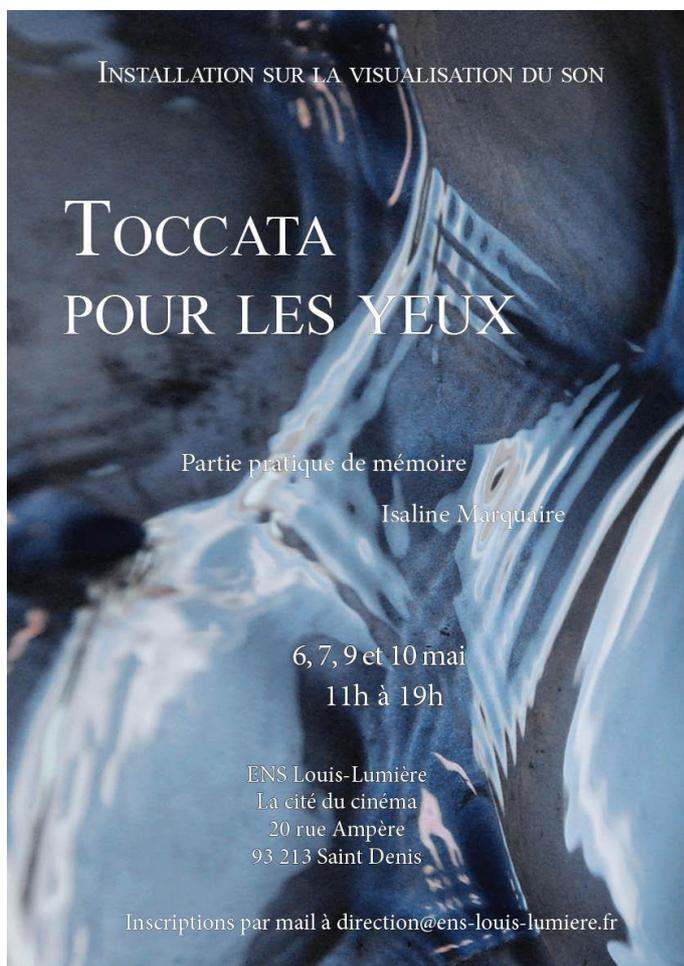
Figure 94 : Plan de l'installation

2) Réalisation

a. Considérations pratiques

Surfaces de vibration :	- Meyer Sound 18", Tannoy 6,5", Visaton EX60S et BS130 ;
Matières de visualisation :	- Sable et oxyde de fer, eau et encre, poudre de lycopode, limaille de fer ;
Matériel technique :	- Carte son, câble FireWire, PureData, amplificateurs ; - câbles de haut-parleurs, câbles speakon, jack vers xlr ; - Hub usb, rallonge usb, convertisseur usb vers Ethernet ;
Scénographie :	- 2 icontrols, 2 ipads, salières, pinceaux, notices d'explication ; - film cellophane, plat à tarte, boîte métallique, bâche de protection ; - plaques de bois MDF et tasseaux en sapin ; - tirages et cadres photos ; - montage vidéo sur deux Ipads, deux fauteuils, deux cubes ; - éclairages 500W, rallonges et ampoules de rechange, gaffeur.

L'installation se déroulera dans le foyer de l'école Louis-Lumière, lieu d'expositions des travaux des élèves. Elle aura lieu les 6, 7, 9 et 10 mai de 11h à 19h (jusqu'à 17h le samedi). Des photos et des vidéos en seront diffusées le jour de la soutenance.



Une courte description de l'installation a été établie pour le site de l'école :

« Cette installation interactive est la partie pratique d'un mémoire portant sur la visualisation des ondes sonores. Elle se construit notamment sur des expériences menées préalablement, reprenant les découvertes d'Ernst Chladni et de Hans Jenny. *Toccata pour les yeux* propose une manière décalée d'aborder le son et l'influence qu'il a sur ce qui nous entoure. Quand le son devient visible, prend-il une dimension qu'il n'aurait pas à la simple écoute ou un sens auquel nous ne pensons pas au quotidien ? »

Figure 95 : Affiche de l'installation

b. Mise en place

Le schéma de la figure 96 explique simplement l'installation technique.

La carte son est réglée sur 0 décibel en sortie. Les amplificateurs KH SA240 ont une puissance de deux fois 120 watts. Utilisés pour l'eau, la limaille de fer et la poudre de lycopode, ils seront réglés très faibles. L'amplificateur Yamaha Professional Series P2050 a une puissance de 45 watts en sortie. Utilisé pour les plaques, il sera réglé au quart de sa puissance.

L'excitateur Visaton EX60S a une puissance maximum de 25 watts sous 8 ohms avec une bande de fréquence correcte entre 90 Hz et 10 kHz. Son diamètre est de 32,5 mm et son poids de à 120 grammes. Le BS130 admet lui 100 watts sous 4 ohms avec une bande de fréquence 45 Hz à 35 kHz. Son diamètre est de 158 mm et son poids de 1,2 kg.

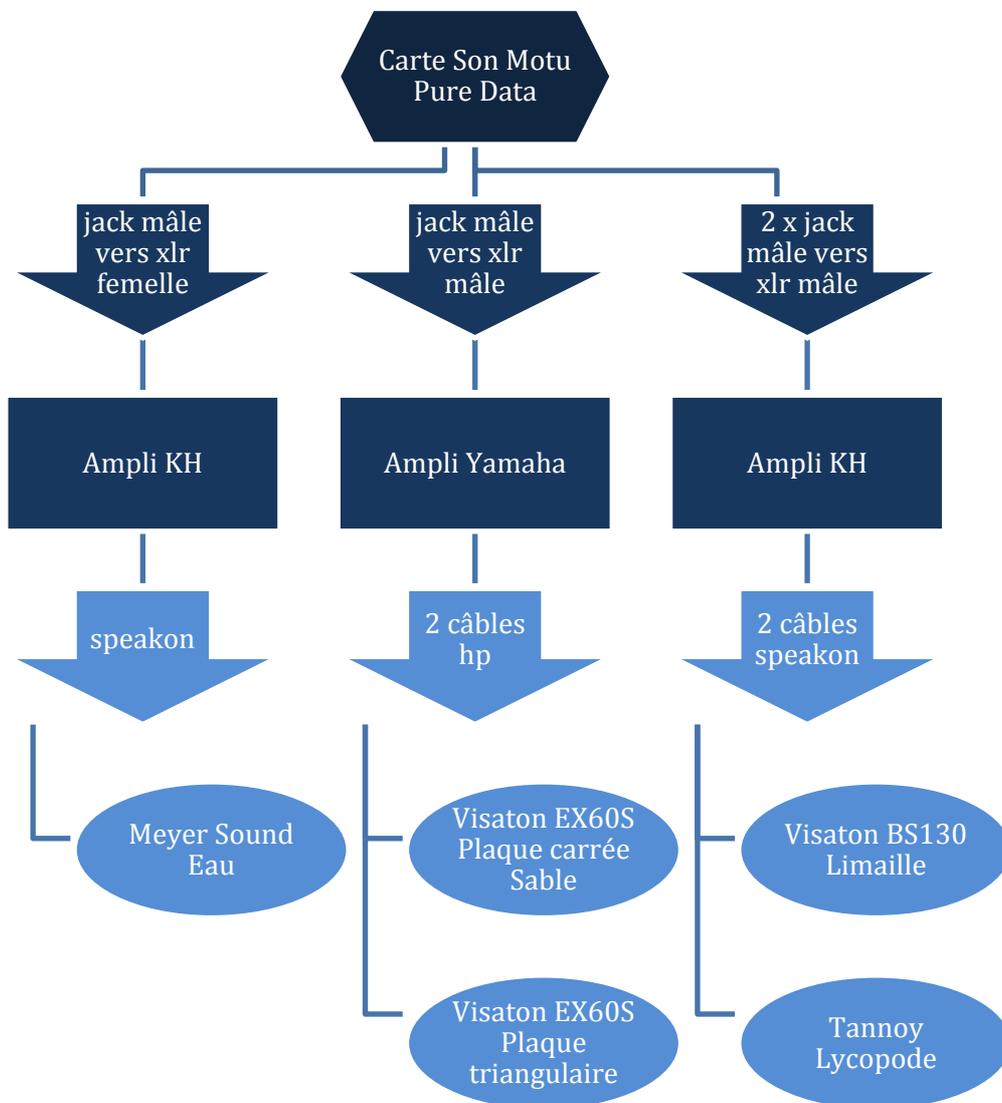


Figure 96 : Plan de câblage audio de l'installation

Le schéma de la figure 97 explique le câblage usb des interfaces jusqu'à PureData.

Deux sous-parties du patch de l'installation sont présentées en figures 98 et 99. Il s'agit des procédés avec l'eau et la limaille, les deux autres patches leur ressemblent grandement.

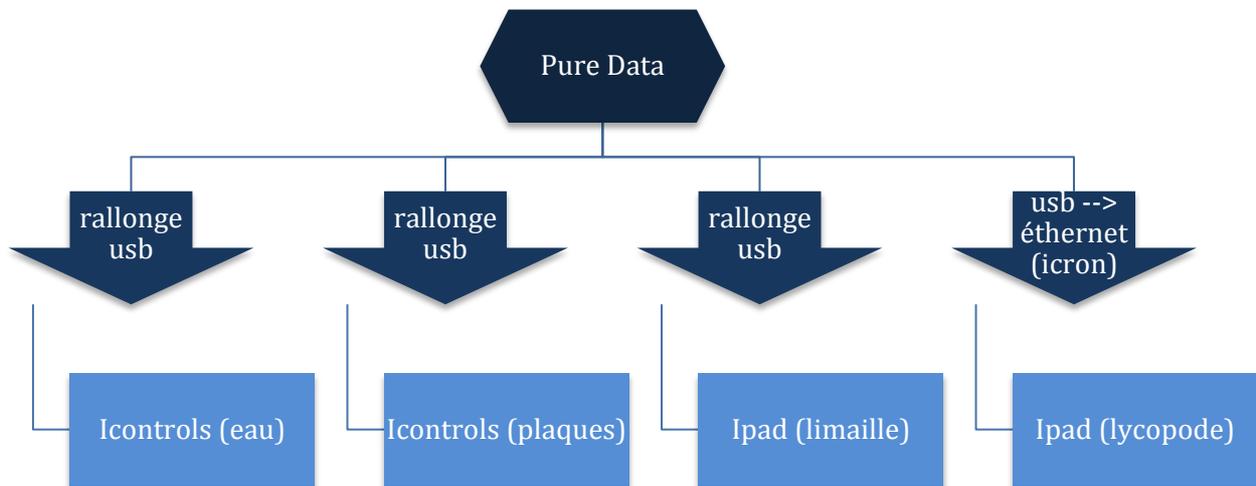


Figure 97 : Plan de câblage des interfaces midi

L'interface du procédé avec l'eau permettra de changer l'intensité et la fréquence diffusée par le haut-parleur. Chacun des neuf faders aura une bande de fréquence différente : 10 à 20 Hz, 20 à 40 Hz, etc. que les spectateurs pourront changer avec les faders. Et l'intensité de ses bandes de fréquence sera réglable grâce aux neuf potentiomètres de l'interface iconcontrols. Les intensités de chaque bande de fréquences seront réglées de manière à ce que l'eau ne puisse pas gicler hors du haut-parleur, afin de préserver la solidité du bloc de présentation en bois. L'avant-dernier fader sera réglé de sorte qu'une seule fréquence de la bande de fréquence fasse apparaître une figure, et ce à fort volume ; cela permettra au spectateur de comprendre les limites de l'expérience.

Il sera prévu un arrêt d'urgence de la diffusion, en cas de problème, lors des réglages notamment.

L'interface iconcontrols du procédé avec le sable permettra simplement d'augmenter, grâce aux faders, l'intensité de chacune des fréquences, sélectionnées préalablement pour l'apparition de figures différentes. Il y aura par exemple la fréquence de 337 Hz dont la photo a été présentée en partie II/ § 2b. Il y aura également une fréquence si aigue qu'elle n'apparaîtra, même à fort volume, pour montrer à nouveau aux spectateurs les limites de l'expérience.

Sur les interfaces des procédés avec la limaille et la poudre de lycopode, six fréquences seront proposées au spectateur. En appuyant sur chacun des pads de l'ipad, il pourra émettre une fréquence différente et voir son effet sur la matière exposée.

Pour le procédé avec la limaille, les fréquences sont choisies de telle sorte qu'elles fassent vibrer des parties différentes de la plaque et ce avec plus ou moins d'effectivité. En effet, les basses fréquences ont plus d'effet sur les plaques que des hautes fréquences.

Pour le procédé avec la poudre de lycopode, les fréquences sont choisies de telle sorte que la poudre ne s'agite pas de la même manière. Par exemple pour une fréquence, la poudre entre en rotation dans le sens horaire et pour une autre fréquence, dans le sens antihoraire. De plus, le pot réceptionnant la poudre, et placé dans l'enceinte, tend à se renverser sous l'effet de la vibration. Si un aimant est là pour réduire le mouvement du pot, les fréquences sont également choisies de telle manière que pour chaque position du pot, elles puissent agir sur la poudre.

Chaque procédé utilise des canaux midi différents : 1 et 2 pour les fréquences et les intensités du procédé à eau ; 53 pour les intensités du procédé avec le sable ; 33 à 38 pour les pads du procédé avec la limaille, 42 pour l'intensité de ses fréquences ; 39 à 43 pour les pads du procédé avec la poudre de lycopode, 43 pour l'intensité de ses fréquences.

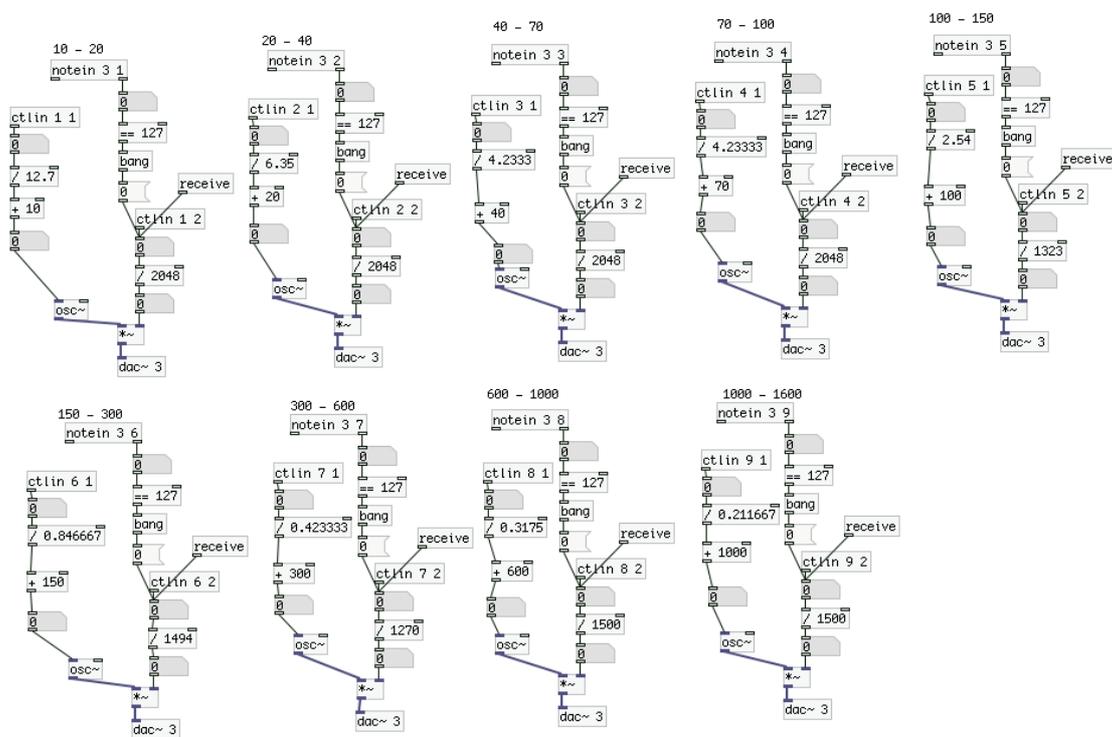


Figure 98 : Patch PureData du procédé avec l'eau

Le bloc-fonction « ctlin » de PureData permet de recevoir les données des faders et des potentiomètres. Les valeurs acquises vont de 0 à 127. Il est ensuite possible, via un autre bloc-fonction, de diviser ou de multiplier ces valeurs pour obtenir celles qui nous intéressent pour chaque fréquence ou bande de fréquences.

Le bloc-fonction « notein » reçoit les données des pads et des boutons. Il suffit de le configurer pour que quelle que soit la valeur qui arrive, les fréquences choisies s'allument ou s'éteignent (pads des procédés avec limaille et poudre de lycopode).

Le logiciel PureData est réglé pour que la sortie 3 concerne l'eau, le bloc-fonction dac~ servant de convertisseur numérique-analogique. La sortie 4 intéresse les plaques, la 5 se dirige vers la limaille de fer et la 6^{ème} sortie part vers la poudre de lycopode.

Pour le procédé avec l'eau, les bandes de fréquence sont : 10 à 20 Hz, 20 à 40 Hz, 40 à 70 Hz, 70 à 100 Hz, 100 à 150 Hz, 150 à 300 Hz, 300 à 600 Hz, 600 à 1000 Hz et 1 à 1,6 kHz. Si les bandes de fréquence sont de plus en plus grandes c'est parce que plus on monte dans les aigus, plus la différence entre les fréquences est tenue à observer.

Pour le procédé avec le sable, les fréquences choisies sont 146 Hz ; 218 Hz ; 337 Hz ; 400 Hz ; 525 Hz ; 733 Hz ; 930 Hz ; 1,610 kHz et 3 kHz.

Pour le procédé avec la limaille de fer, les fréquences choisies sont 50 Hz ; 150 Hz ; 377 Hz ; 510 Hz ; 700 Hz et 900 Hz.

Pour le procédé avec la poudre de lycopode, les fréquences choisies sont 50 Hz ; 80 Hz ; 150 Hz ; 330 Hz ; 500 Hz et 700 Hz.

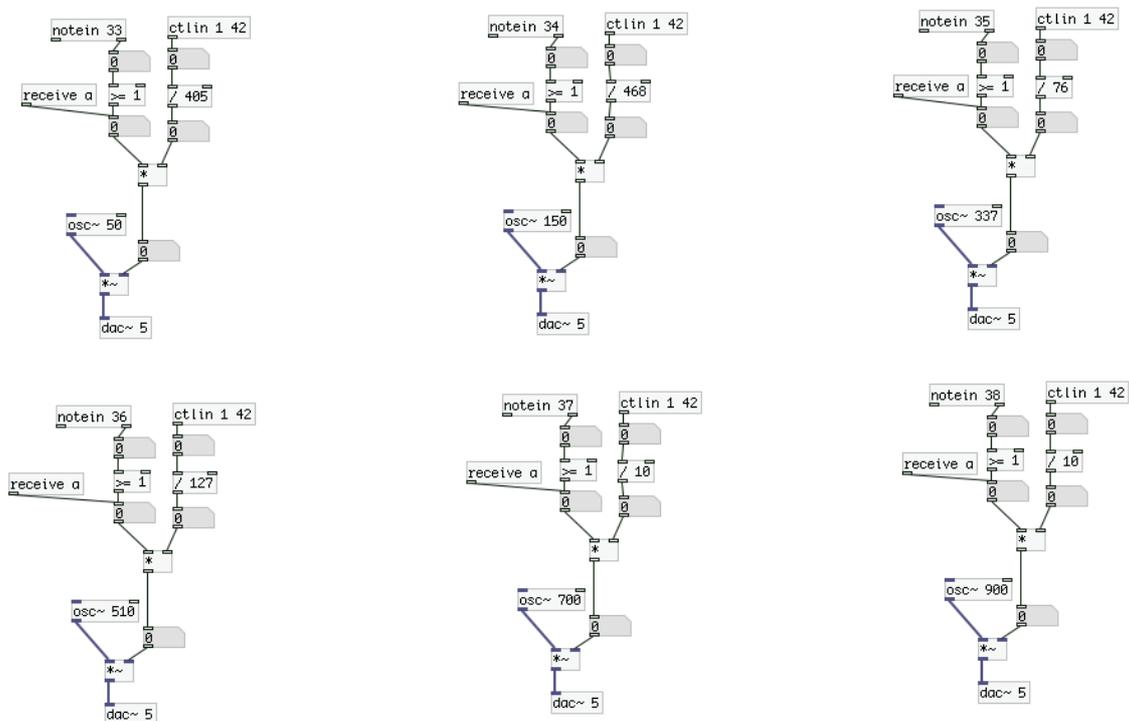


Figure 99 : Patch PureData du procédé avec la limaille

En annexe 1, on trouvera les quatre photos dont les tirages ont été exposés lors de l'installation. L'annexe 2 présente le tableau utilisé pour le montage de la vidéo diffusée sur les ipads.

c. Retours sur l'installation

De manière générale, les spectateurs, en particulier les élèves de la section photo de l'école, ont été sensibles à l'esthétique et à la présentation de l'installation. Les élèves en son, eux, se sont laissés tromper par la manière dont sont programmés les faders et les potentiomètres, dont l'utilisation habituelle est détournée au service des différents procédés. Pour celui de l'eau par exemple, les faders servent à changer la fréquence et non l'intensité.

Par ailleurs, la plupart des spectateurs ne prennent pas le temps de lire les indications, aussi courtes et simples soient-elles. Mais s'ils passent à côté des intentions premières du procédé, ils finissent aussi plus vite par détourner le procédé et jouer avec d'une manière inattendue. Avec le sable par exemple, certains tentaient de mettre le sable en ligne et le déplacement du sable était donc plus intéressant à regarder que la figure qui tentait d'apparaître.

Pour finir avec la scénographie, la plupart des spectateurs n'ont pas pris le temps de se poser : s'installer dans les canapés, vidéos à la main, etc. Cela est sans doute dû au contexte de présentation, i.e. dans une école et non une salle de spectacle ou d'installation. Peut-être aurait-il fallu organiser une inauguration pour inciter chacun à rester un peu plus et à discuter.



Figure 100 : Mise en place dans le foyer de l'ENS Louis-Lumière

Les spectateurs aiment revenir plusieurs fois, avantage dû au contexte cette fois-ci. La deuxième fois, ils regardent souvent les autres faire, pour découvrir comment eux interagissent avec les procédés ; ils prennent facilement la position de « regardeur », laissant les autres manipuler pour eux en quelque sorte. Ou alors, ils invitent d'autres personnes à les accompagner et ils prennent plaisir à leur montrer comment l'installation fonctionne. Il est particulièrement intéressant d'entendre ce qu'ils ont compris et comment ils l'expliquent à leurs compagnons.

Parmi les détournements opérés par les spectateurs, souvent ils s'amuse à construire des jeux musicaux en additionnant les sons de manière à créer des rapports de fréquences intéressants ou mélodiques. Ils vont parfois jusqu'à oublier le visuel, même si le procédé ajoute aux fréquences des bruits de matière : agitation de l'eau, déplacement du sable, mouvement du cellophane, etc.



Figure 101 : Procédé avec la limaille de fer

Parmi les spectateurs, beaucoup sont demandeurs d'explications sur le fonctionnement des procédés, les relations physiques qu'il y a entre le son et sa visualisation. On peut alors constater que cette interaction n'est pas si évidente ni facile à comprendre. A défaut, ils trouvent à l'installation un côté pédagogique et ludique qui les distraient. De plus, ils reproduisent eux-mêmes des expériences qu'ils ont parfois perçues sur internet sans bien comprendre comment cela fonctionnait.

Malgré cela, la plupart des visiteurs ne restent pas suffisamment longtemps pour trouver toutes les subtilités des différents procédés. Généralement, une fois qu'ils ont saisi le concept général, ils passent au suivant. Par exemple, peu d'entre eux remarquent que l'avant-dernier fader de l'eau ne fait apparaître de figure que pour une seule fréquence.

Le procédé avec l'eau est le plus populaire ; son côté hypnotique captive les spectateurs et comme l'interaction admet plus de possibilités, que les figures sont plus nombreuses, ils s'amusent plus longtemps, créant des formes, les mélangeant. C'est le côté créatif qui plaît. Les plus téméraires cherchent à tester les limites de l'exercice ; en effet des éclaboussures peuvent se produire par le mélange de certaines fréquences à forts niveaux.



Figure 102 : Devant le procédé à eau

Les dispositifs avec les plaques passionnent moins, même si le limaille est le plus hypnotisant et intrigant pour les spectateurs. C'est le procédé avec lequel ils s'amuse le plus à déplacer la matière sur la plaque, la force magnétique réagissant de manière très intéressante au milieu de la plaque.

La plupart des visiteurs aiment la relation que l'on trouve dans l'installation entre le scientifique et l'artistique : le fait de partir d'une onde physique, un procédé scientifique pour faire des visualisations esthétiques.

Concernant la vidéo, les spectateurs ne se rendent pas toujours compte qu'elle existe. Ils se dirigent vers les interfaces ludiques, attirés par les haut-parleurs et les blocs de présentation. Malgré tout, la courte durée de la vidéo incite les gens plus pressés à prendre le temps de la regarder.

Sans le son et sans avoir de notions d'échelle, certains se demandent à quoi cela pourrait correspondre dans la réalité et comment est-ce que les matières sont mises en vibration : séisme ? tremblements ?

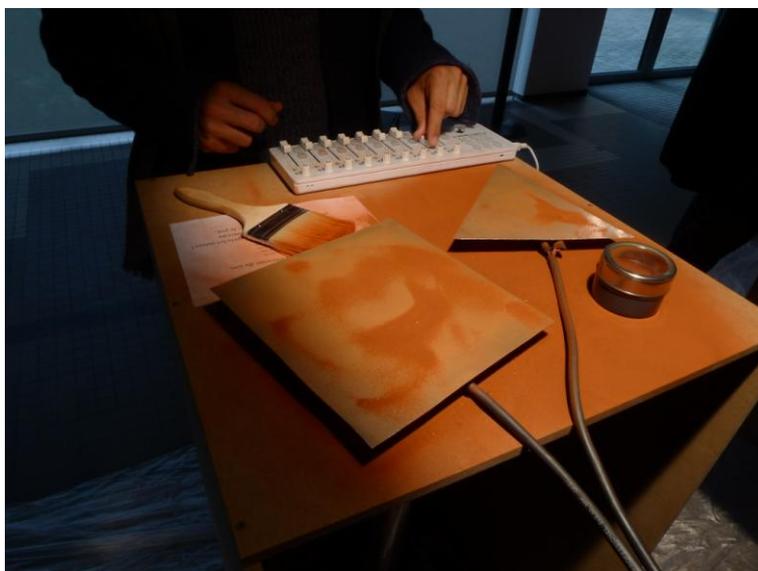


Figure 103 : Devant le procédé avec le sable



Figure 104 : Procédé avec la poudre de lycopode

Souvent les procédés évoquent des choses connues aux spectateurs et ils y font références auprès de leurs camarades. Certains citent *Jurassic Park*, quand le dinosaure arrive, que l'on ne l'entend pas encore, mais que ses pas font trembler l'eau du verre. D'autres ont fait référence à Parreno et son installation récente au Palais de Tokyo. Un autre a parlé des drogues sonores et suggère de proposer du LSD à l'entrée de l'installation. Autre remarque intéressante, *Toccata pour les yeux*

faisait s'interroger un étudiant sur la construction de l'univers et la mise en place des planètes. Elle n'est pas sans rappeler les travaux d'Alexandre Lauterwasser avec ses comparaisons entre les figures de Chladni et la morphologie des plantes ou des animaux.

Conclusion

Puisque la visualisation du son est un sujet vaste et intemporel, ces différentes composantes n'en sont que plus riches et ainsi toutes n'ont été explicitées. Au fur et à mesure que l'artiste exploite de nouvelles idées, en relation avec l'image et le son, de nouvelles problématiques se manifestent.

Pour exemple, lorsque le cinéma 3D est apparu, on a dû inventer de nouvelles solutions multicanales : l'ambisonie, le WFS, etc. C'est un thème qui suscite toujours de nouvelles remises en question, de par les horizons qui ne cessent de s'ouvrir avec lui.

Si ce mémoire fait un tour horizon de ce qui a été découvert et interrogé sur la visualisation du son depuis Newton, les créations contemporaines et la convergence numérique ont fait apparaître tellement d'idées et de problèmes nouveaux que l'on pourrait aisément dédier un autre écrit uniquement aux quelques décennies passées.

Toccata pour les yeux évoquait indirectement ce thème, indépendamment de celui de la relation image/son, à laquelle la confrontation entre sciences et arts procure ici un élément de réponse. Si cette dernière ne permet pas de mettre en équation toutes les approches de la transduction image/son, elle propose des procédés artistiques, qui en partie parce qu'ils ne sont pas modélisables scientifiquement, n'en sont que plus passionnants.

Au public de cette installation a été proposée une variante insolite de traitement du son. Elle a été reçue avec intérêt, d'autant plus que si le public connaissait quelques matérialisations de son, il n'avait jamais pu interférer avec les procédés présentés. De plus, si les spectateurs ne se sont pas toujours appropriés les intentions initiales de création, il paraît évidemment que quelle que soit la forme que prend la visualisation du son, celle-ci est source d'expression et éveille de nombreuses interprétations.

De manière réciproque, il est possible d'aborder toutes ses problématiques depuis l'angle opposé : la sonification est le double inversé de ce mémoire. Si on prend pour exemple les partitions, et en particulier celles de la musique électroacoustique, ces dernières sont parfois écrites dans un sens, visualisation et, parfois dans l'autre, sonification.

En effet, cette dernière est un sujet qui peut être approché de manière scientifique, notamment avec la traduction de données en signaux acoustiques, et artistique, avec la création de champs lexicaux sonores porteurs de sens. Ces deux représentations sont tellement liées qu'il semblerait même judicieux de consacrer une étude approfondie à leur inhérence.

Annexes

Annexe 1 – Tirages présentés lors de l'installation

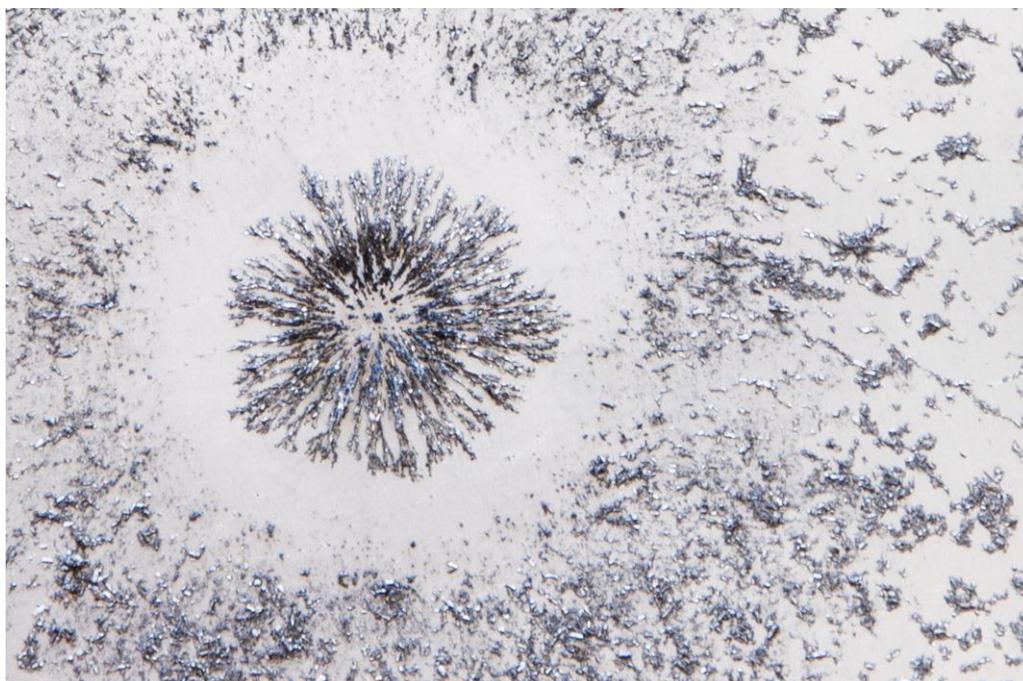


Figure 105 : Agrandissement de la limaille de fer en vibration

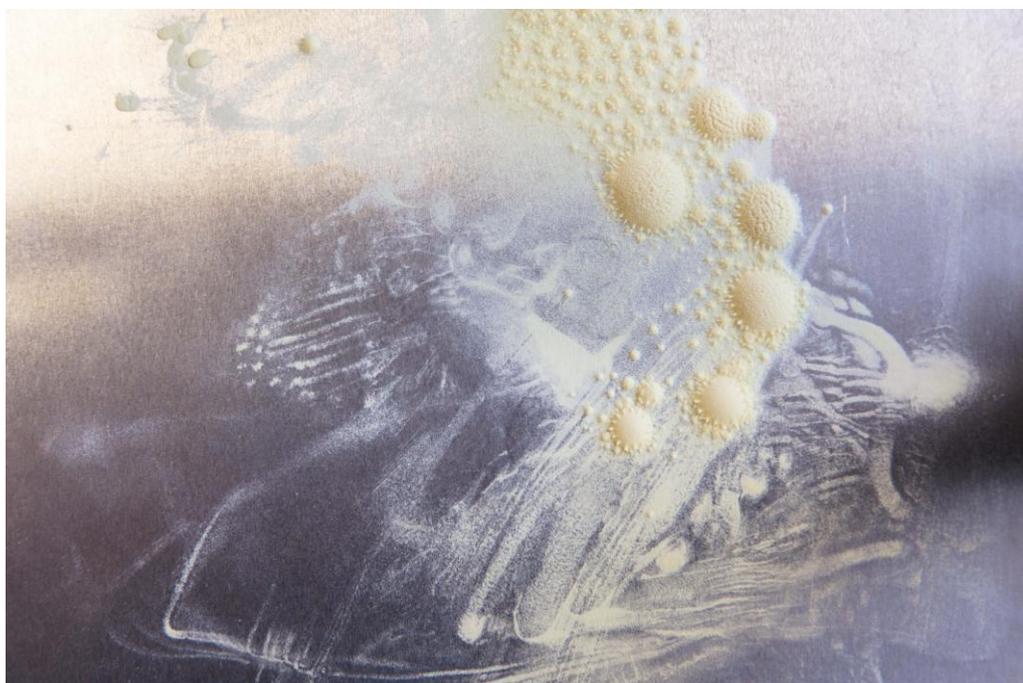


Figure 106 : Agrandissement de la poudre de lycopode en vibration

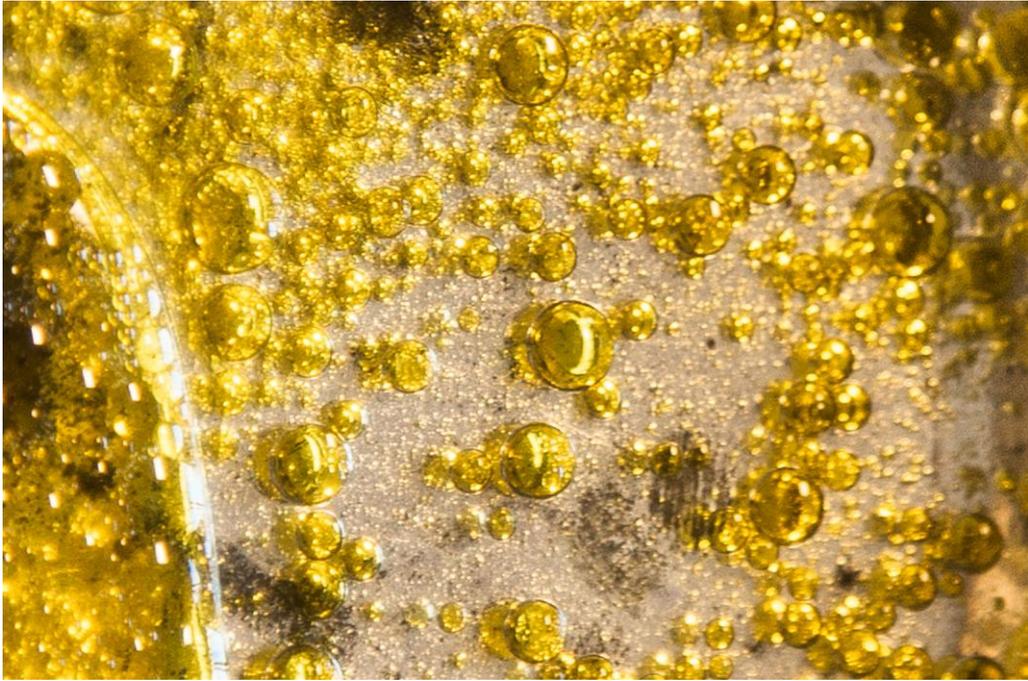


Figure 107 : Agrandissement de l'huile après vibration



Figure 108 : Agrandissement du sable après vibration

Annexe 2 – Conduite pour le montage de la vidéo présentée lors de l’installation

TIME IN	PHOTO (P) / VIDEO(V)	PROCEDE	MONTAGE	Texte
00 :00 :00			Noir	
00 :01 :10	P 45 (01-39)	Plaque Sable Hexagone 3000	Suite photos rapide	
00 :02 :05	P 41 (01-41)	Plaque Sable Hexagone 1995		
00 :03 :00	P 39 (01-43)	Plaque Sable Hexagone 819		
00 :03 :20			Noir	
00 :04 :15	P 6170	Photo limaille de fer agrandie	Fondu in et out	“Toccata pour les yeux”*
00 :06 :15			Noir	
00 :07 :20	V 6016	Plaque Sable Hexagone	Fondu in	“Fréquence de 3000 Hz’
00 :15 :20	P 80	Plaque Sable Rond T1 510	Split screen	“Fréquence de 510 Hz”
	P 49	Plaque Sable Triangle T1 510		
00 :17 :15	P 82	Plaque Sable Rond 510	Split screen	
	P 51	Plaque Sable Triangle 510		
00 :19 :10	P 90	Plaque Sable Rond T1 1610	Split screen	“Fréquence de 1610 Hz”
	P 58	Plaque Sable Triangle T1 1610		
00 :21 :05	P 92	Plaque Sable Rond 1610	Split screen	
	P 61	Plaque Sable Triangle 1610		
00 :23 :00	P 94	Plaque Sable Rond T1 1995	Split screen	“Fréquence de 1995 Hz”
	P 63	Plaque Sable Triangle T1 1995		
00 :24 :20	P 97	Plaque Sable Rond 1995	Split screen	
	P 65	Plaque Sable Triangle 1995		
00 :26 :15			Noir	
00 :27 :23	V 6017	Plaque Sable Carré 337	Split screen	“Fréquence de 1610 et 337 Hz”
	V 6018	Plaque Sable Carré 1610		
00 :38 :01			Noir	
00 :39 :03	P 6068 (150)	Haut-parleur Eau colorée 10 Hz	A agrandir	“Fréquence de 10 Hz”
00 :40 :18	P 6069 (151)			
00 :42 :08	P6071 (153)			
00 :43 :23	P 6061 (143)	Haut-parleur Eau colorée 20 Hz	A agrandir	“Fréquence de 20 Hz”
00 :45 :13	P 6064 (146)			
00 :47 :03	P 6066 (148)			
00 :48 :18	P 6073 (155)	Haut-parleur Eau colorée 40 Hz	A agrandir	“Fréquence de 40 Hz”
00 :50 :08	P 6074 (156)			
00 :51 :23	P 6081 (163)			
00 :53 :13	P 6084 (166)			

00:55:03	P 6095 5177)	Haut-parleur Eau colorée 140 Hz	A agrandir	"Fréquence de 140 Hz"
00:56:18			Noir	
00:58:05	V 6047	Plaque avec limaille de fer		"Limaille de fer"
01:21:06			Noir	
01:22:16	P 6111	Photo jaune œufs	Très zoomée	
01:24:11	P 6117			
01:26:06			Noir	
01:27:22	V 6160	Haut-parleur huile et eau	Fondu in	"Huile et eau"
01:46:08	P 6141 (206)			
01:48:03	P 6145 (210)			
01:49:23	P 6154 (219)			
01:51:18			Noir	
01:53:15	V 6021	Plaque et poudre de lycopode	Fondu in et out	"poudre de lycopode"
02:36:06			Noir	
02:37:10	P 108	Poudre de lycopode sur plaque	A recadrer	"poudre de lycopode"
01:39:00	P 109			
02:40:15	P 121			
01:41:05	P 128			
02:43:20	P 6182 (239)	Poudre de lycopode sur HP	A recadrer	"poudre de lycopode"
02:45:10	P 6185 (242)			
02:47:00	P 6189 (246)			
02:48:15	P 6198 (255)			
02:50:05	P 6202 (259)			
02:51:20	P 6203 (260)			
02:53:10	P 6205 (262)			
02:55:00			Noir	
02:56:14	P 6170	Photo limaille de fer agrandie		"Présenté par Isaline Marquaire et Hélène Mauri Partie pratique de mémoire La visualisation du son, dans un contexte artistique Ens Louis-Lumière"
02:59:05			Noir	

Tables des figures

Figure 1 : Le monocorde.....	8
Figure 2 : Comparaison des associations entre couleurs et notes	10
Figure 3 : L'orgue à couleurs de Bainbridge Bishop	13
Figure 4 : Rimington devant son orgue de couleur (1912).....	14
Figure 5 : Extrait de la partition de <i>Prometheus, le Poème de Feu</i> de Scriabine	14
Figure 6 : <i>Sonata No. 6 (Sonata of Stars), Andante</i> , Ciurlionis, 1998.....	15
Figure 8 : <i>Disks of Newton (Study for "Fugue in Two Colors")</i> , Kupka, 1912	16
Figure 7 : <i>Fuga</i> , Kandinsky, 1914	16
Figure 9 : <i>Songs of the Sky</i> , Alfred Stieglitz, 1929.....	17
Figure 10 : Clichés de <i>Chartres Series</i> , Stan Brakhage, 1933	17
Figure 11 : Clichés de <i>Colored Rhythm</i> , Léopold Survage, 1913	18
Figure 12 : Clichés de <i>Side Phase drift</i> , John Withney, 1965.....	18
Figure 13 : Clichés de <i>Spirals</i> , Sadin, 1979.....	19
Figure 14 : Clichés de <i>Radio Dynamics</i> , Fishinger, 1942	19
Figure 15 : Clichés de <i>Study Nr. 7</i> , Fishinger, 1931	20
Figure 16 : <i>Disque optophonique</i> , Baranoff-Rossiné, 1920.....	21
Figure 17 : Représentation physique d'une onde sonore.....	22
Figure 18 : Oscillogramme d'un son	22
Figure 20 : Sonagramme du son d'une cloche.....	23
Figure 21 : Sonagramme du chant d'un merle	23
Figure 19 : Sonagraphe des années 70	23
Figure 22 : Profil IDS d'un bruit rose diffusé à 75 dB par des enceintes Meyer et capté par un couple de micros de mesure Behringer	24
Figure 23 : Le tonographe de Holbrook.....	24

Figure 24 : Photographies de la membrane d'un tonographe excitée par différents sons.....	25
Figure 26 : Premier dispositif de visualisation des courbes de Lissajous	26
Figure 25 : Plaque vibrante d'après Chladni.....	26
Figure 27 : Figures de Lissajous	27
Figure 28 : Capsule manométrique de Koenig	28
Figure 29 : Résonateurs de Helmholtz	28
Figure 30 : Analyseur de son de Koenig.....	29
Figure 31 : Exemple d'utilisation de l'acousmographe	30
Figure 32 : Impressions d'écran du logiciel iAnalyse de Couprie	31
Figure 33 : <i>Soundsize</i> de W. & S. Vasulka.....	32
Figure 34 : <i>Illuminated Music</i> de Beck	33
Figure 35 : Affiche de l'exposition <i>Geste de lumière et de son</i> au Centre Georges Pompidou en 1979	33
Figure 36 : Photo prise lors du spectacle de Xenakis <i>La légende d'Eer</i>	34
Figure 37 : <i>The shape of song</i> , Wattenberg	34
Figure 38 : <i>The Beach Bells</i> de Chen.....	35
Figure 39 : <i>Strings</i> de Chen.....	35
Figure 40 : <i>Microsonic Landscapes</i> de Realität	36
Figure 41 : Schéma de la vibration d'une corde (une dimension)	39
Figure 42 : Lignes nodales	40
Figure 43 : Figures de vibration fonction de m et n.....	40
Figure 44 : Mélange de deux figures.....	40
Figure 45 : Figures de vibration (2,0 et 0,2) fonction de la forme de la plaque de vibration.....	41
Figure 46 : Figures vibrantes (plaque carrée).....	41
Figure 47 : Figures vibrantes (plaque ronde)	42
Figure 49 : Image issue du CymaScope	43

Figure 48 : Mary Desirée Waller	43
Figure 50 : Le CymaScope de John Reid.....	44
Figure 51 : Hans Jenny	44
Figure 52 : Utilisation de l'encre pour révéler les mouvements vibratoires.....	45
Figure 53 : Motifs de fleur et de ruche.....	46
Figure 54 : Motifs sur plaque carrée et plaque ronde.....	46
Figure 55 : Figures sonores avec du sable et de l'eau pour une même fréquence.....	47
Figure 56 : Apparition de nouvelles formes due à la non-uniformité de la plaque	47
Figure 57 : Masses ferromagnétiques dans un champ magnétique sous vibration.....	48
Figure 58 : Gouttes de mercure sur un diaphragme en vibration.....	48
Figure 59 : Allers retours et rotations du sable sur les plaques de métal	49
Figure 60 : Mouvements de rotation dus à la vibration	49
Figure 61 : Poudre de lycopode en vibration.....	50
Figure 62 : Gouttes d'eau soumise à la vibration.....	50
Figure 63 : Résultat de la liquéfaction puis solidification de la pâte de kaolin sur une plaque en vibration.....	51
Figure 64 : Mélange d'essence de térébenthine et d'huile soumis à la vibration	51
Figure 65 : Haut-parleur Meyer Sound 18 pouces	51
Figure 66 : Enceinte Tannoy protégée par un film en cellophane	54
Figure 67 : Fréquence de 10 Hz.....	54
Figure 68 : Fréquence de 20 Hz.....	55
Figure 69 : Fréquence de 40 Hz.....	55
Figure 70 : Fréquence de 10 Hz sur l'enceinte JBL 13 pouces.....	55
Figure 71 : Fréquence de 10 Hz sur l'enceinte Meyer Sound 18 pouces.....	55
Figure 72 : Fréquence de 8 Hz avec de l'eau colorée à l'encre bleue.....	56

Figure 73 : Résultat obtenu après que toute l'eau a giclé.....	56
Figure 74 : Réaction d'un fluide non newtonien à basse fréquence.....	57
Figure 75 : La poudre de lycopode se rassemble pour former la demi-sphère.....	57
Figure 76 : Rotation de matière sur la demi-sphère à une intensité plus forte.....	58
Figure 77 : Excitateurs Monacor AR30 et Visaton EX60S.....	58
Figure 78 : Fréquences de 210 et 320 Hz diffusées sur une plaque de 3mm de MDF.....	59
Figure 79 : 1 ^{ère} à 7 ^{ème} harmonique de la fréquence 146 Hz.....	60
Figure 81 : Fréquence de 819 Hz diffusée sur la même plaque.....	61
Figure 80 : Fréquence de 335 Hz sur une plaque en aluminium de 20 x 20 cm.....	61
Figure 82 : Fréquence de 1610 Hz sur une plaque carrée.....	61
Figure 83 : Fréquence de 1610 Hz sur une plaque hexagonale.....	62
Figure 84 : Fréquence de 1610 Hz sur une plaque triangulaire.....	62
Figure 85 : Fréquence de 510 Hz visualisée par des pigments rouges sur une plaque en aluminium....	62
Figure 87 : Action de la vibration sur la limaille de fer.....	63
Figure 86 : Fréquence de 1180 Hz avec du gros sel, sur une plaque d'aluminium.....	63
Figure 89 : Formation d'amas en rotation dans la poudre de lycopode mise en vibration.....	64
Figure 88 : Formation d'une figure dans la poudre de lycopode sur une plaque en aluminium.....	64
Figure 91 : Etude de Lauterwasser sur les tortues.....	67
Figure 90 : Etude de Lauterwasser sur les fleurs.....	67
Figure 92 : Etude de Lauterwasser sur les insectes.....	68
Figure 93 : Icontrols et ipad Icon.....	70
Figure 94 : Plan de l'installation.....	70
Figure 95 : Affiche de l'installation.....	71
Figure 96 : Plan de câblage audio de l'installation.....	72
Figure 97 : Plan de câblage des interfaces midi.....	73

Figure 98 : Patch PureData du procédé avec l'eau	74
Figure 99 : Patch PureData du procédé avec la limaille	75
Figure 100 : Mise en place dans le foyer de l'ENS Louis-Lumière.....	76
Figure 101 : Procédé avec la limaille de fer.....	77
Figure 102 : Devant le procédé à eau.....	77
Figure 103 : Devant le procédé avec le sable.....	78
Figure 104 : Procédé avec la poudre de lycopode	78
Figure 105 : Agrandissement de la limaille de fer en vibration.....	80
Figure 106 : Agrandissement de la poudre de lycopode en vibration	80
Figure 107 : Agrandissement de l'huile après vibration.....	81
Figure 108 : Agrandissement du sable après vibration	81

Bibliographie

Livres

DUPLAIX Sophie et LISTA Marcella (sous la dir. de), *Sons et Lumières, une histoire du son dans l'art du XXème siècle*, Editions du Centre Pompidou, Paris, 2004

LEMOINE Serge, ROUSSEAU Pascal (sous la dir. de), *Aux origines de l'abstraction 1800-1914*, Paris, Réunion des musées nationaux, 2003

COGEVAL Guy et NECTOUX Jean-Michel (sous de la dir. de), *Debussy, la musique et les arts*, Musée de l'Orangerie, Paris, 2012

ROSSING Thomas et FLETCHER Neville H., *Principles of vibration and sound*, New York : Springer-Verlag, Etats-Unis, 2004

PISANO Giusy, *Une archéologie du cinéma sonore*, CNRS Editions, Collection « Cinéma & Audiovisuel », Paris, 2004

FAIDEAU Ferdinand, *La science curieuse et amusante – curiosités, récréations et fantaisies sur les sciences et leurs applications*, Maxtor, mars 2012

JUNOD P., *Contrepoints : dialogues entre musique et peinture*, Contrechamps, Genève, 2006

BRENEZ Nicole et McKANE Miles (sous la dir. De), *Poétique de la couleur, une histoire du cinéma expérimentale*, coédition Auditorium du Louvre et Institut de l'Image, 1995

JENNY Hans, *Cymatics : A Study of Wave Phenomena & Vibration*, B&W Publishing, 2001

FISCHINGER Oskar, *Experiments in Cinematic abstraction*, Eye Film Institute Netherlands, 2013

LAUTERWASSER Alexander, *Water Sound Images : The Creative Music of the Universe*, Macromedia Publishing, 2007

KANDINSKY Wassily, *Du Spirituel dans l'art, et dans la peinture en particulier*, Gallimard, Folio Essais, 1988

DENIZEAU Gérard, *Musique et arts visuels*, Honoré Champion, Musique et Musicologie, 2004

BOISSELIER Charlotte, *Synesthésie et matérialisation du son en art à l'ère du numérique : Approche théorique et applications artistiques*, Editions universitaires européennes, 2011

CHION Michel, *Audio-vision : Sound on Screen*, Columbia University Press, 1994

BROUGHER Kerry, STRICK Jeremy, WISEMAN Ari, ZILCZER Judith, *Visual Music : Synaesthesia in Art and Music Since 1900*, Thames & Hudson, 2005

Articles

THIEBAUT Jean-Baptiste, BELLO Juan Pablo, SCHWARZ Diemo, *How musical are images ? From Sound Representation to Image Sonification : An Eco Systemic Approach*, Copenhagen, 2007

THIEBAUT Jean-Baptiste, *Visualisation du son et réversibilité – l'exemple du logiciel Sonos*, CICM, Université Paris VIII, MSH Paris Nord, juin 2005

GAYOU Evelyne, « Identity and Analysis », *Organised Sound* 11 (2), Cambridge University Press, Août 2006

GARRO Diego, « From Sonic Art to Visual Music : Divergences, convergences, intersections », *Organised Sound* 17 (2), Cambridge, 2012, p. 103-113

IKESHIRO Ryo, « Audiovisual Harmony : The realtime audiovisualisation of a single data source in Construction in Zhuangzi », *Organised Sound* 17 (2), Cambridge, 2012, p. 148-155

KALINOWSKI Isabelle, « Hans-Robert Jauss et l'esthétique de la réception », *Revue germanique internationale*, 1997

HOUGUE Clémentine, « L'art et son public au XXème siècle », *Acta fabula*, vol 9, n°6, Notes de lecture, juin 2008

Mémoires et Thèses

CHAPALAIN Gilles, *Les instruments de 'musique des couleurs'*, mémoire sous la direction de Darasse François, section animation, juin 2003

VIOLLET Marion, *Les comportements du spectateur comme enjeux d'art contemporain*, thèse sous la direction de Dominique Clévenot et Christine Buignet, Toulouse, 2011

Colloques et Rapports de travail

ZENOUDA Hervé, De l'illustration sonore à la fusion multi-nodale, Colloque à l'IUT de Bobigny, 2006

BILLON Marc et SEDES Anne, *Musiques visuelles, composition (musique) audiovisuelle*, 2013

SEDES Anne, Visualisation du son, Rapport du groupe de travail AFIM, mars 2008

Mc DONNELL Maura, Notes for lecture on Visual Music by Maura McDonnell, Researched and presented for Music and Image Course, Trinity College, Dublin, 2003

Sites internet

Sonore Visuel, histoire et actualité des arts audiovisuels

<http://www.sonore-visuel.fr/>

SOLOMOS Makis, *Le Diatope et La légende d'Eer*, novembre 2007

<http://www.iannis-xenakis.org/fxe/actus/Solom3.pdf>

ANONYME, "Expanding Cinema's Synchrony 2", *Literary Digest et Letters and Art column*, 1936

<http://www.centerforvisualmusic.org/ButeLitDigest.htm>

MORITZ William, *Mary Allen Bute : Seeing Sound*, Animation World Network, 1996

<http://www.awn.com/mag/issue1.2/articles1.2/moritz1.2.html>

McDONNELL Maura, *Visual Music*, 2007

<http://www.soundingvisual.com/visualmusic/VisualMusicEssay.pdf>

PAQUETTE Daniel, *Le Piano à couleurs*, Hommage au clavecin oculaire du Père Castel et essai de synesthésie, Séminaires scientifiques et rencontres culturelles de Peyresq, 2013

<http://www.peiresc.org/Paquette.pdf>

COUPRIE Pierre, site du logiciel iAnalyse

<http://logiciels.pierrecouprie.fr/>

ARNAUD Gilles, *Architecture et poème électronique : Edgard (Edgar) Varèse, Iannis Xenakis et Le Corbusier*, novembre 2008

<http://www.gilles-arnaud-sphere.com/?p=2176>

LONJON Vincent, *Artikulation, Composition électronique de Gyogy Ligeti (né en 1923)*, cours donné à l'option musique du lycée Millet de Cherbourg, mis en ligne en janvier 2009

http://www.musique-millet.com/analyses_musicales_diverses/ligeti_artikulation.htm

MANOURY Philippe, *Stockhausen au-delà...*, décembre 2007

<http://brahms.ircam.fr/documents/document/20045/>